



**República Federativa do Brasil**  
Ministério da Indústria, Comércio Exterior  
e Serviços  
Instituto Nacional da Propriedade Industrial

**(11) PI 0616617-2 B1**

**(22) Data do Depósito:** 16/05/2006

**(45) Data de Concessão:** 10/10/2017



---

**(54) Título:** CONJUNTO SENSOR E MÉTODO PARA DETERMINAR O ESTADO DE FADIGA DE UMA FISSURA

**(51) Int.Cl.:** G01N 27/26

**(30) Prioridade Unionista:** 30/09/2005 US 11/240,677

**(73) Titular(es):** FATIGUE SOLUTIONS CORP.

**(72) Inventor(es):** MONTY MOSHIER; WILLIAM I. BERKS

Relatório Descritivo da Patente de Invenção para "**CONJUNTO SENSOR E MÉTODO PARA DETERMINAR O ESTADO DE FADIGA DE UMA FISSURA**".

CAMPO DA INVENÇÃO

5 A presente invenção refere-se geralmente a dispositivos de sensor de fadiga eletroquímica, e sistemas e métodos para usar tais dispositivos.

ANTECEDENTES DA INVENÇÃO

Com referência agora à figura 1, é mostrado um diagrama esquemático de um dispositivo de sensor de fadiga eletroquímica (EFS) 10, de acordo com a técnica anterior. O dispositivo de EFS 10 pode ser usado para implementar um método de inspeção de fissura por fadiga não destrutiva para determinar se as fissuras por fadiga inspecionadas estão crescendo ativamente. Por exemplo, o dispositivo de EFS 10 pode ser aplicado a um local crítico de fadiga em um espécime ou estrutura de laboratório a ser inspecionado. O dispositivo de EFS 10 consiste em um eletrólito 12, um sensor 14, e um potenciostato (20) para aplicar uma voltagem de polarização constante entre a estrutura (substrato 16) e o sensor 14.

O dispositivo de EFS 10 funciona em princípios eletroquímicos. A estrutura é anodicamente polarizada para criar um filme protetor e passivo na superfície a ser testada. Uma voltagem de polarização entre a estrutura e o eletrodo produz uma corrente de base CC na célula. Se a estrutura que está sendo interrogada pelo EFS suporta uma tensão crítica, então a corrente que flui na célula flutua em uma relação complexa para a variação do estado de tensão mecânica. Por conseguinte, uma corrente CA é sobreposta na corrente de base CC. Dependendo do material da estrutura e das condições de carregamento bem como do estado de avaria por fadiga na estrutura, a corrente transitória da célula fornece informação no estado de avaria por fadiga.

As condições eletroquímicas impostas durante interrogação de EFS de uma estrutura são desenhadas para induzir um filme óxido passivo estável na superfície do material. Durante o carregamento cíclico, o processo de fadiga causa microplasticidade e localização de esforço em uma esca-

la muito fina. A interação do deslizamento cíclico e o processo de passivação causam alterações temporárias e repetidas nos filmes passivos. Essas alterações, incluindo processos de dissolução e repassivação, dão origem a correntes transitórias.

5               As correntes transitórias de EFS são complexas, envolvendo mudanças cíclicas na camada elétrica dupla na interface do metal e do eletrólito EFS, geralmente possuindo a mesma frequência que a da tensão mecânica, mas tendo uma relação de fase complexa dependendo do metal específico interrogado. Além disso, o rompimento dos filmes óxidos na superfície metálica através de escorregamento cíclico faz com que um componente adicional da corrente transitória que dobrou a frequência da corrente elástica por causa dos efeitos de plasticidade ocorra tanto durante as partes de tensão quanto de compressão do ciclo. Como a avaria por fadiga se desenvolve com ciclos acumulados e forma de fissuras, as fissuras induzem uma plasticidade localizada em diferentes partes do ciclo de fadiga daqueles em que a microplasticidade residual ocorre e em que as fissuras ainda não se formaram. A plasticidade induzida por fissura, por conseguinte, introduz maiores componentes de harmonia na corrente transitória EFS. A análise e calibragem desses vários componentes de corrente permitem que o crescimento da fissura por fadiga seja determinado.

Os dispositivos de EFS existentes, tais como os mostrados na figura 1, sofrem de numerosos inconvenientes. Por exemplo, os dispositivos EFS são desajeitados para anexar a um substrato e encher com eletrólito. Os dispositivos de EFS conhecidos também sofrem de sensibilidade insuficiente, e as técnicas de processamento de sinal para analisar os sinais de EFS gerados por tais dispositivos também parecem ser inadequados. A presente invenção endereça tais deficiências na técnica anterior.

### SUMÁRIO DA INVENÇÃO

A presente invenção é dirigida a um método para determinar um estado de fadiga de um crescimento de fissura em um substrato. É fornecido um dispositivo de sensor eletroquímico e inclui um eletrodo formado de uma malha de aço inoxidável. O dispositivo eletroquímico tem uma superfície de

fundo que contata o substrato. A superfície de fundo é revestida com uma camada adesiva, e um papel de desengate é anexado à camada adesiva. O papel de desengate é separado da camada adesiva, expondo dessa maneira a camada adesiva. O dispositivo de sensor eletroquímico é segurado ao  
5 substrato colocando a camada adesiva em contato com o substrato e desse modo formando uma cavidade de eletrólito ligada em parte pelo substrato. O adesivo sela a superfície de fundo do dispositivo ao substrato de modo a impedir vazamento de eletrólito da cavidade. A cavidade é preenchida com o eletrólito. Quando o substrato é submetido a carregamento cíclico, o estado  
10 de fadiga da fissura em crescimento no substrato é determinado de acordo com uma corrente medida entre o eletrodo de referência e o substrato.

De acordo com um aspecto adicional, a presente invenção é direcionada para um dispositivo de sensor eletroquímico para determinar um estado de fadiga de uma fissura em crescimento em um substrato. O siste-  
15 ma inclui um eletrodo de referência formado de um material de malha de aço inoxidável que é substancialmente impermeável a um eletrodo. O eletrodo de referência tem um lado de fundo que faceia o substrato e um lado de topo que faceia para longe do substrato. Pelo menos uma abertura é fornecida no material de malha, a dita pelo menos uma abertura sendo suficiente em ta-  
20 manho para permitir que o eletrólito flua através do eletrodo de referência. Uma primeira cavidade de eletrólito é formada entre o substrato e o lado do fundo do eletrodo de referência. Uma segunda cavidade do eletrólito é formada entre o lado de topo do eletrodo de referência e uma cobertura do dispositivo. Uma porta de entrada do eletrólito é formada em uma parede da  
25 primeira cavidade de eletrólito. Uma porta de saída do sangrador é formada em uma parede da segunda cavidade de eletrólito. Um sensor mede uma corrente entre o eletrodo de referência e o substrato quando o substrato é submetido a carregamento cíclico.

De acordo ainda com um aspecto adicional, a presente invenção  
30 é direcionada a um método para determinar um estado de fadiga de uma fissura em crescimento em um local suspeito de fadiga em um substrato. É fornecido um primeiro dispositivo de sensor eletroquímico que inclui um pri-

meiro eletrodo de referência. Um segundo dispositivo de sensor eletroquímico que inclui um segundo eletrodo de referência é também fornecido. O primeiro dispositivo de sensor eletroquímico é posicionado sobre o local suspeito de fadiga no substrato, e um primeiro sinal de corrente entre o primeiro eletrodo de referência e o substrato é medido quando o substrato é submetido a carregamento cíclico. O segundo dispositivo de sensor eletroquímico é posicionado em um local no substrato onde a fissura por fadiga não é provável, e um segundo sinal de corrente entre o segundo eletrodo de referência e o substrato é medido quando o substrato é submetido a carregamento cíclico. O estado de fadiga da fissura em crescimento no local suspeito de fadiga é avaliado por comparação de informação do primeiro e segundo sinais de corrente.

#### BREVE DESCRIÇÃO DOS DESENHOS

A figura 1 é um diagrama esquemático de um dispositivo de sensor de fadiga eletroquímica, de acordo com a técnica anterior.

A figura 2A é uma vista isométrica de um dispositivo de EFS de acordo com a presente invenção.

A figura 2B é uma vista explodida do dispositivo de EFS mostrado na figura 2A.

A figura 2C é uma vista de topo do dispositivo de EFS mostrado na figura 2B.

A figura 3 é um diagrama ilustrando os estágios prematuros do processo de iniciação da fissura.

A figura 4 ilustra um FFT de dados de EFS para uma fissura em crescimento de 0,025 cm (0,01 polegada) de acordo com a presente invenção.

A figura 5 ilustra uma comparação entre sinais de EFS de um dispositivo de EFS de referência e um dispositivo de monitoramento de fissura EFS, de acordo com as técnicas de EFS diferenciais da presente invenção.

#### DESCRIÇÃO DETALHADA DAS MODALIDADES PREFERIDAS

Com referência agora às figuras 2A-2C, é mostrado um disposi-

tivo de EFS 100 de acordo com a presente invenção. O sensor inclui um eletrodo de referência 110 que, em uma modalidade, é uma malha feita de aço inoxidável 304. O sensor também inclui seções 120, 130 que, em uma modalidade, são feitas, cada uma, de espuma que foi revestida em ambos os lados com um adesivo sensível à pressão. Em uma modalidade, cada uma das seções 120, 130 tem uma área de superfície que corresponde a um quadrado de 5,08 x 5,08 cm (2" x 2"), ou menor. Um papel de desengate (não mostrado) é anexado ao adesivo no lado do fundo 122 da seção 120. Uma porta de entrada de eletrólito 150 é formada em uma parede da seção 120. A porta de entrada de eletrólito 150 é acoplada ao tubo de carga 160 (por exemplo, um canudo de plástico). Uma porta de saída do sangrador 170 é formada em uma parede da seção 130. A porta de saída do sangrador 170 é acoplada ao tubo sangrador 180 (por exemplo, um canudo de plástico). O dispositivo de EFS 100 também inclui uma placa de cobertura clara 190. O dispositivo de EFS 100 é montado por contato do adesivo na superfície de topo 134 da seção 130 com a placa de cobertura 190; contatando o adesivo na superfície de topo 132 com a superfície de topo 114 do eletrodo 110; e contatando o adesivo na superfície de topo de 124 da seção 120 com a superfície de fundo 112 do eletrodo 110.

Uma vez montado, o dispositivo de EFS 100 está pronto para ser aplicado a um substrato de modo a monitorar um estado de fadiga de uma fissura em crescimento no substrato. Como mencionado acima, a superfície de fundo 122 da seção 120 é revestida com uma camada adesiva, e um papel de desengate é anexado à camada adesiva. De modo a aplicar o dispositivo de EFS 100 ao substrato, o papel de desengate é separado da camada adesiva na superfície de fundo 122 da seção 120, expondo dessa maneira a camada adesiva na superfície de fundo 122 da seção 120. O dispositivo de EFS 100 é a seguir segurado ao substrato colocando a camada adesiva em contato com o substrato e formando dessa maneira uma cavidade de eletrólito inferior ligada no fundo pelo substrato, nos lados através das paredes da seção 120, e no topo do eletrodo 110. O adesivo sela a superfície de fundo 122 da seção 120 ao substrato de modo a impedir vazamento

de eletrólito da cavidade de eletrólito inferior. O dispositivo de EFS 100 também inclui uma cavidade de eletrólito superior ligada no fundo do eletrodo 110, nos lados das paredes da seção 130, e no topo através da cobertura clara 190. Em uma modalidade, a malha de aço inoxidável usada para formar o eletrodo 110 é substancialmente impermeável ao eletrólito. Pelo me-  
 5 nos uma abertura 116 (mostrada na figura 2C) é fornecida no material de malha, a abertura 116 sendo suficiente em tamanho para permitir que o eletrólito flua através do eletrodo de referência 110.

Depois do dispositivo de EFS 100 ser afixado ao substrato como  
 10 estabelecido acima, o eletrólito é suprido (por exemplo, bombeado) para o dispositivo via o tubo de carga 160. O eletrólito inicialmente enche a cavidade de eletrólito inferior. Depois da camada de eletrólito inferior estar cheia, o eletrólito continua a ser suprido via o tubo de carga 160, fazendo desse modo com que o eletrólito flua via a abertura 116 da cavidade de eletrólito infe-  
 15 rior para a cavidade de eletrólito superior. O processo continua até a cavidade de eletrólito superior estar também cheia (por exemplo, quando o eletrólito começa a fluir para fora do tubo sangrador 180). Uma vez que o processo de encher está completo, os tubos 160, 180 são obstruídos e ambos os lados 112, 114 do eletrodo 110 são revestidos com eletrólito. Durante o pro-  
 20 cessos de encher, o interior do dispositivo de EFS 100 pode ser visualmente monitorado através da cobertura clara 190 de modo a assegurar que o dispositivo esteja cheio de eletrólito e que nenhuma bolha seja apresentada. Em uma modalidade, o eletrólito usado para encher o dispositivo de EFS 100 é:

25  $1,2M H_3BO_3 + 0,3M Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O + 0,24M Na_2MoO_4 \cdot 2 H_2O$   
 será entendido por aqueles versados na técnica que outras formulações podem também ser usadas.

Depois do dispositivo de EFS 100 estar instalado e cheio, como descrito acima, um potenciostato (não mostrado) é acoplado ao eletrodo 110  
 30 de referência e ao substrato, de modo a medir o fluxo de corrente entre o eletrodo 110 e o substrato. Quando o substrato é submetido a carregamento cíclico, o estado de fadiga de uma fissura em crescimento no substrato pode

ser determinado de acordo com a corrente medida entre o eletrodo 110 de referência e o substrato (o sinal de EFS).

As técnicas de EFS da presente invenção oferecem diversas vantagens sobre outros métodos de avaliação não destrutiva em que elas oferecem o potencial para crescimento de fissura por fadiga detectada bem como têm a habilidade para detectar fissuras muito pequenas de 0,012 cm (0,005 polegada). A figura 3 ilustra o processo de deslocamentos agrupados para formar intrusões e extrusões. Tais intrusões e extrusões e a formação de uma fissura em estágios prematuros de crescimento da fissura podem ser detectadas com sensores de fadiga eletroquímica de acordo com a presente invenção.

No laboratório, foi percebido que quando um carregamento sinusoidal puro é usado para amostras de fadiga, duas frequências de domínio são contidas no sinal de EFS. Uma transformada rápida de Fourier (FFT) de dados de EFS para um espécime com uma fissura em crescimento de 0,025 cm (0,01 polegada) revelada tanto em um componente de frequência de 1 hz quanto em um componente de frequência de 2 hz, como mostrado na figura 4. O componente de 1 hz é devido às deformações elásticas e o componente 2 hz é devido às deformações plásticas localizadas. Conforme a fissura cresce e a taxa de crescimento da fissura aumenta a magnitude da segunda harmonia em 2 hz aumenta. Mediante alto carregamento e antes da fissura por fadiga a plasticidade local causada pela alta carga aplicada produz harmônicos secundários similares. De modo a diferenciar entre a plasticidade causada por fissura e carga, um sensor de referência secundário é usado. O uso de um sensor primário e um secundário, juntos, é referido como EFS de diferencial.

O EFS de diferencial de acordo com a presente invenção usa dois sensores de EFS 100, um como a referência (R) e um como o sensor de medição de fissura (M), de modo a determinar um estado de fadiga de uma fissura em crescimento em um local de fadiga suspeito em um substrato. Um primeiro dispositivo de EFS 100 (por exemplo, o dispositivo de sensor M) é posicionado sobre o local de fadiga suspeito no substrato, e um primei-



- ro sinal de corrente entre o eletrodo de referência no dispositivo de sensor C e o substrato é medido quando o substrato é submetido a carregamento cíclico. Um segundo dispositivo de EFS 100 (por exemplo, o dispositivo de sensor R) está posicionado em um local no substrato onde a fissura por fadiga não é provável, e um segundo sinal de corrente entre o eletrodo de referência no dispositivo de sensor de Referência e o substrato é medido quando o substrato é submetido a carregamento cíclico. O estado de fadiga da fissura em crescimento no local suspeito de fadiga é então acessado por comparação da informação do primeiro e do segundo sinais de corrente.
- 5 Mais especificamente, usando processamento de sinal os dois sinais podem ser comparados para determinar se uma fissura está presente. Examinando a figura 5 alguém pode ver que o sensor de medição M fornece uma magnitude maior do que o sinal de referência indicando, por conseguinte, uma fissura.
- 10 Finalmente, será apreciado por aqueles versados na técnica que mudanças poderiam ser feitas às modalidades descritas acima sem se afastar do seu amplo conceito inventivo. É, por conseguinte, entendido que essa invenção não é limitada às modalidades particulares descritas, mas é pretendido cobrir modificações dentro do espírito e escopo da presente invenção como definido nas reivindicações em anexo.
- 15
- 20

## REIVINDICAÇÕES

1. Conjunto sensor (100) para um sistema de sensor de fadiga eletroquímica para determinar um estado de fadiga de uma fissura em um substrato eletrocondutor, compreendendo:

- 5                   - um corpo (120, 130) com faces interior e exterior;  
                    - uma cavidade dentro do corpo confinando um fluido eletrolítico;  
                    - um eletrodo (110) posicionado dentro da cavidade, configurado de modo que o eletrólito está em ambos os lados do eletrodo;

**caracterizado por**

- 10               um adesivo que fixa a face interior do corpo (122) ao substrato e um segundo adesivo que fixa uma placa de cobertura (190) à face exterior (134) do corpo; e

                    um meio para adicionar o eletrólito (150, 160) à cavidade depois que o conjunto sensor está fixado a um substrato.

- 15               2. Conjunto sensor, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado pelo fato de que** o corpo adicionalmente compreende uma pluralidade de camadas (120, 130) que podem ser montadas na superfície do substrato.

3. Conjunto sensor, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado pelo fato de que** o eletrodo (110) é selecionado de uma malha ou placa de metal condutor.

- 20               4. Conjunto sensor, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado pelo fato de que** o eletrodo (110) é de aço inoxidável.

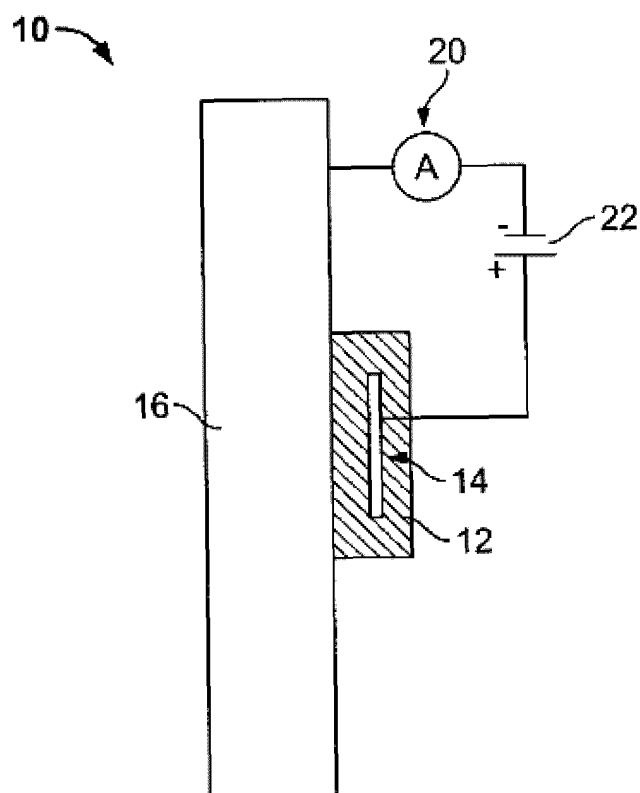
5. Método para determinar o estado de fadiga de uma fissura em um substrato, **caracterizado pelo fato de** ser realizado com o auxílio de um grupo de dois conjuntos sensores (100) conforme definido na reivindicação 1, e o estado de fadiga de uma fissura é determinado pela comparação de uma corrente elétrica medida a partir dos dois conjuntos sensores.

- 25               6. Método, de acordo com a reivindicação 5, **caracterizado pelo fato de que** cada conjunto sensor é acoplado a um potenciostato que mede a corrente passando através do conjunto sensor quando uma tensão constante é aplicada ao substrato durante o carregamento cíclico do substrato.

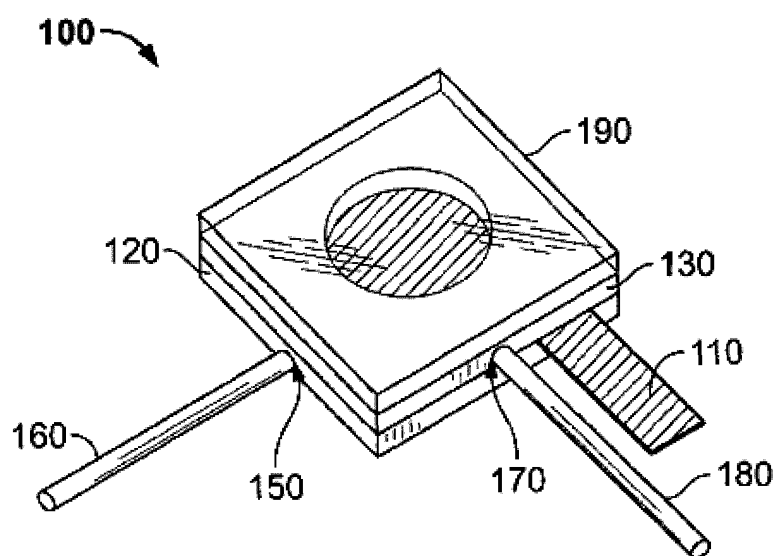
- 30               7. Método, de acordo com a reivindicação 5, **caracterizado**

**pelo fato de que** um conjunto sensor é posicionado sobre uma posição suspeita de fadiga no substrato, e o outro conjunto sensor é posicionado onde uma fissura de fadiga é indesejada, e o estado de fadiga do substrato é estimado pela medição da diferença entre os sinais elétricos entre os dois conjuntos sensores.

8. Método, de acordo com a reivindicação 5, **caracterizado pelo fato de que** o dado das medições do potenciostato de corrente dos conjuntos sensores durante o carregamento cíclico é transferido para um computador para o processamento de sinal para determinar o estado de fadiga do substrato.



**FIG. 1**  
(técnica anterior)



**FIG. 2A**

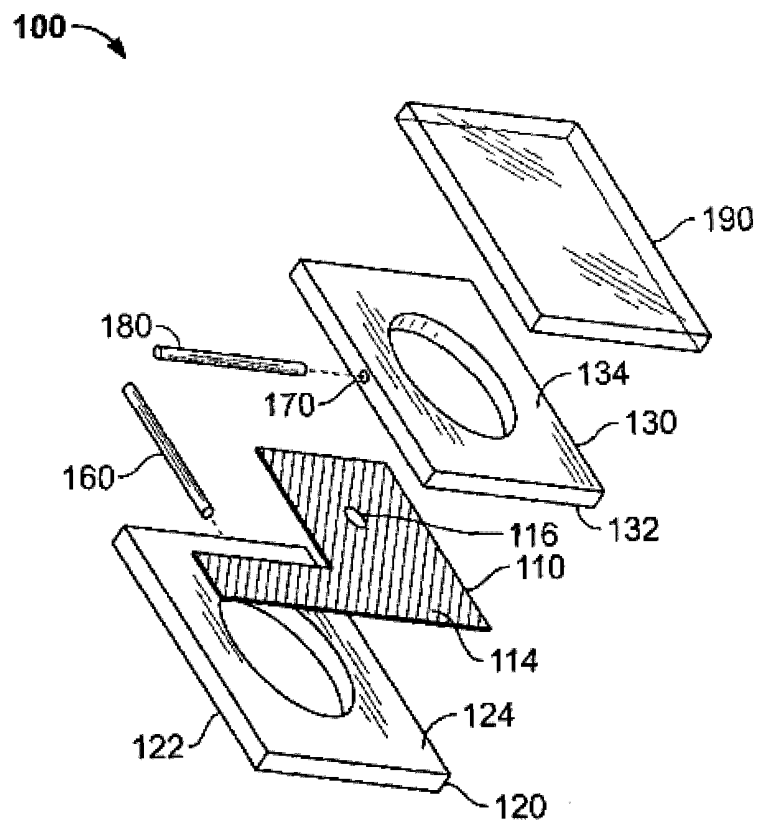


FIG. 2B

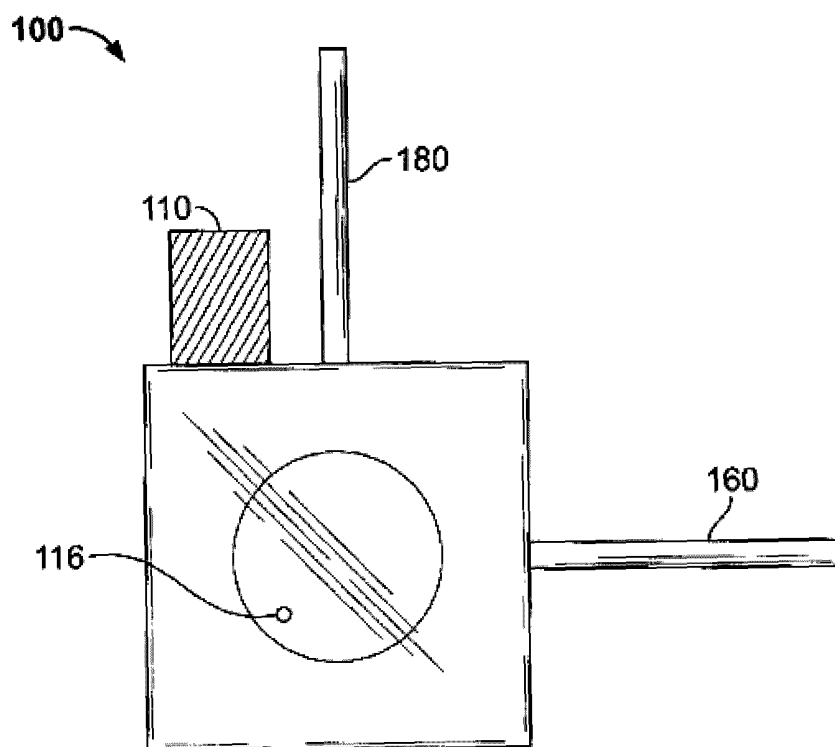


FIG. 2C

3/4

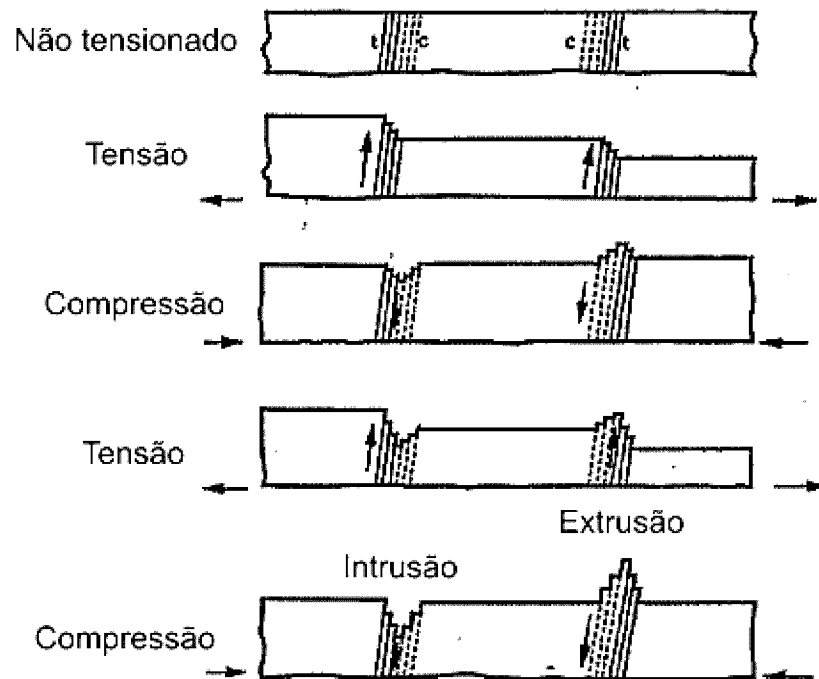
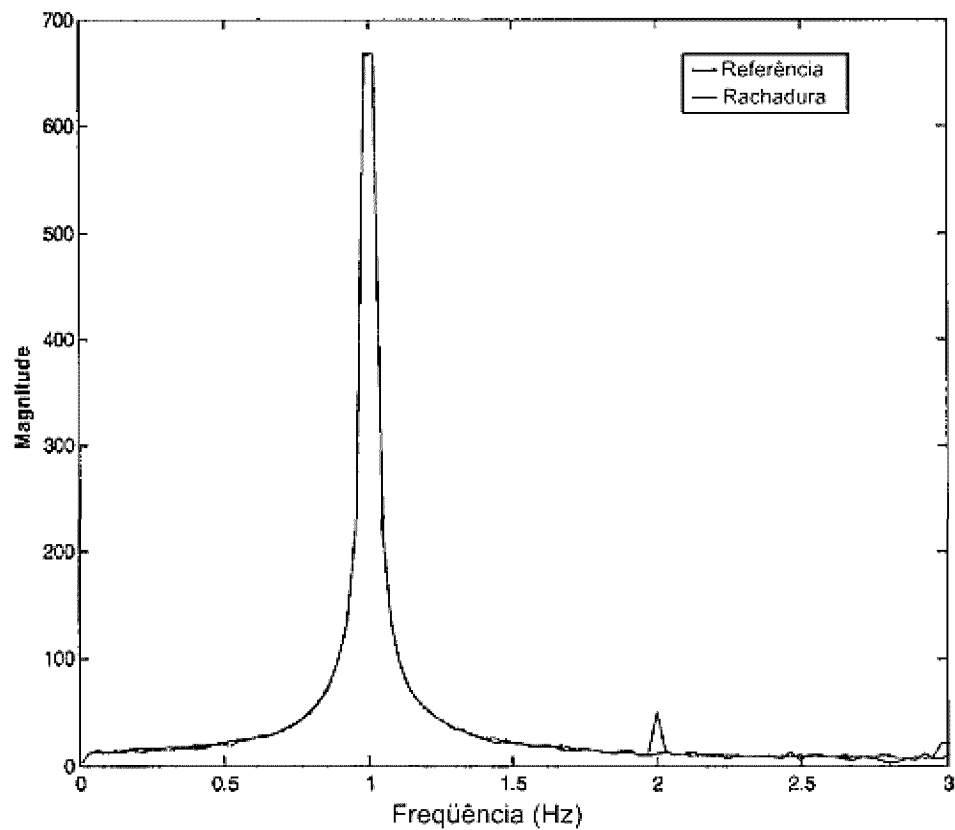


FIG 3

Esquemático mostrando os estágios prematuros de iniciação de fissura



FFT de dados de EFS quando uma fissura de 0,025 cm (0,01 polegada) está crescendo

FIG 4

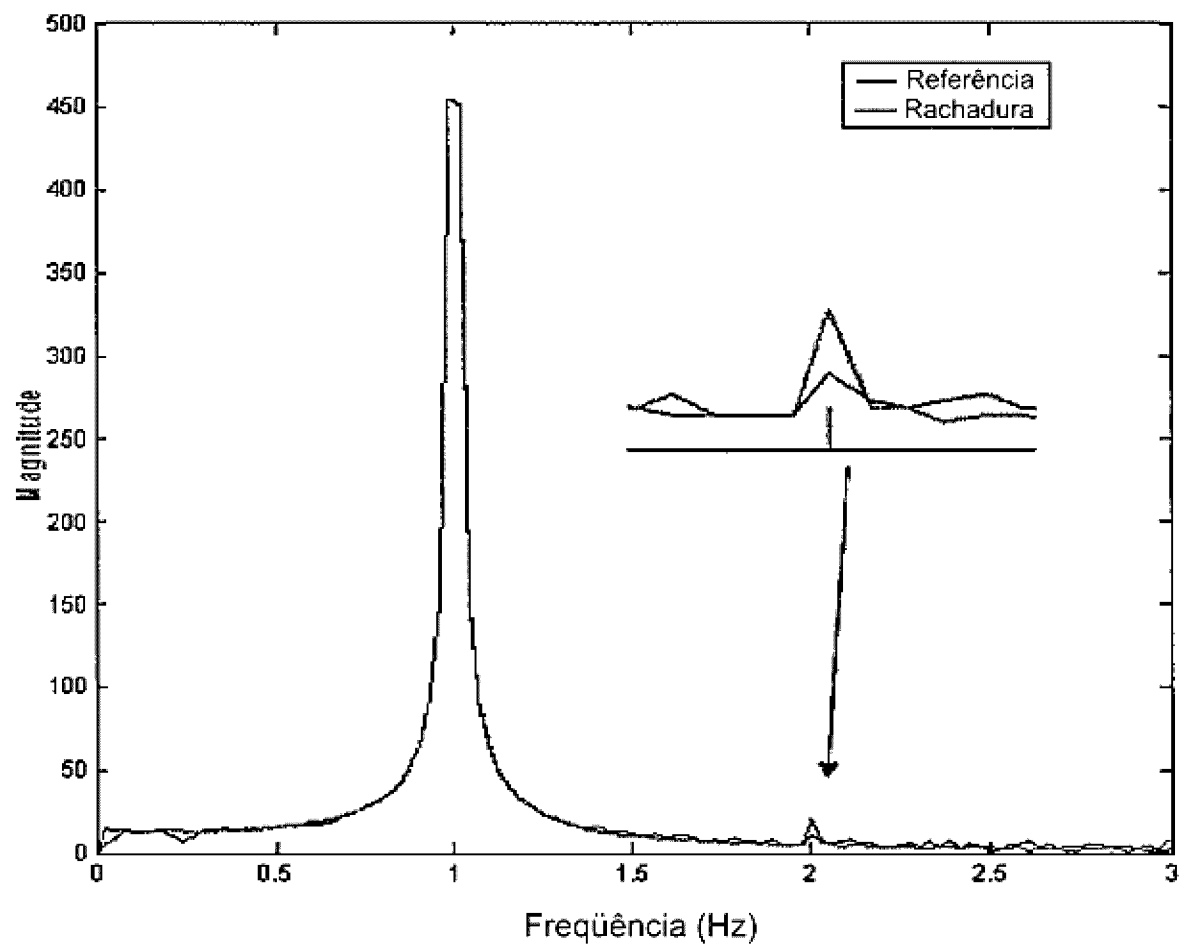


FIG 5

Comparações de sinal de EFS diferencial