



República Federativa do Brasil
Ministério da Economia
Instituto Nacional da Propriedade Industrial

(11) BR 102016029296-4 B1



(22) Data do Depósito: 14/12/2016

(45) Data de Concessão: 09/03/2021

(54) Título: MÉTODO PARA DETECTAR ALTERAÇÕES LOCAIS DE MATERIAL EM UMA ESTRUTURA COMPÓSITA

(51) Int.Cl.: G01N 15/08; G01J 5/02.

(30) Prioridade Unionista: 15/03/2016 US 15/070,583; 21/12/2015 US 62/270,554.

(73) Titular(es): THE BOEING COMPANY; UNIVERSITY OF WASHINGTON.

(72) Inventor(es): WILLIAM P. MOTZER; GARY ERNEST GEORGESON; JILL PAISLEY BINGHAM; STEVEN KENNETH BRADY; ALAN F. STEWART; JAMES C. KENNEDY; IVAN PELIVANOV; MATTHEW O'DONNELL; JEFFREY REYNER KOLLGAARD.

(57) Resumo: INSPEÇÃO COMPÓSITA. A presente invenção refere-se a um método para detectar as alterações locais de material em uma estrutura compósita. Um feixe de laser pulsado é direcionado em direção à estrutura compósita compreendida por um número de materiais compósitos. Os sinais ultrassônicos de banda larga são formados na estrutura compósita quando a radiação do feixe de laser pulsado é absorvida pela estrutura compósita. Os sinais de ultrassom de banda larga são detectados para formar os dados. Os dados são processados para identificar um valor de frequência local para a estrutura compósita. O valor de frequência local é usado para determinar se as alterações locais de material estão presentes no número de materiais compósitos.

Relatório Descritivo da Patente de Invenção para "MÉTODO PARA DETECTAR ALTERAÇÕES LOCAIS DE MATERIAL EM UMA ESTRUTURA COMPÓSITA".

Informações Antecedentes

1. Campo

[001] A presente invenção refere-se, em geral, à inspeção não destrutiva e, em particular, à realização da inspeção não destrutiva em uma estrutura em camadas. Ainda mais particularmente, a presente descrição se refere a um método e aparelho para detectar as alterações de material em uma estrutura compósita.

2. Antecedentes

[002] Na fabricação de aeronaves, veículos e outras estruturas, a inspeção de partes usadas para formar essas estruturas é, com frequência, realizada para determinar se as partes terão os parâmetros desejados para um desempenho desejado da parte. Além disso, as estruturas e as partes são inspecionadas como parte da manutenção normal quando as aeronaves, veículos e outras estruturas estão sendo utilizadas.

[003] O teste não destrutivo é comumente realizado nessas partes. O teste não destrutivo é usado para avaliar as propriedades de uma parte sem alterar a capacidade de usar a parte em serviço.

[004] O teste de ultrassom é um tipo de teste não destrutivo. O teste de ultrassom é normalmente usado para realizar as inspeções em partes de aeronave que incluem, ou que compreendem, os materiais compósitos. O teste de ultrassom envolve transmitir ondas acústicas através de um objeto de teste, como uma parte ou estrutura de aeronave.

[005] O teste de ultrassom é comumente realizado com o uso de um transdutor. O transdutor é configurado para enviar ondas acústicas em um objeto de teste e detectar uma resposta às ondas acústicas. A

resposta a essas ondas acústicas é analisada para determinar se as inconsistências estão presentes no objeto de teste.

[006] As aeronaves, os carros, dispositivos médicos, e até mesmo roupas estão sendo projetados e fabricados com percentagens cada vez maiores de materiais compósitos. Por exemplo, os materiais compósitos são usados em aeronaves para diminuir o peso da aeronave. Essa diminuição do peso melhora as características de desempenho, tais como a capacidade de carga útil e a eficiência de combustível. Além disso, os materiais compósitos proporcionam maior vida útil para vários componentes em uma aeronave. Os materiais compósitos podem também diminuir o peso de outros itens, como membros artificiais, bicicletas, carros blindados, ou outros produtos desejáveis.

[007] Os materiais compósitos podem ser materiais resistentes e leves criados ao combinar dois ou mais componentes funcionais. Por exemplo, um material compósito pode influir fibras de reforço em uma matriz de resina de polímero. As resinas usadas em materiais compósitos podem incluir as resinas termoplásticas ou termoendurecíveis. As fibras podem ser unidireccionais ou podem assumir a forma de um pano ou tecido trançado.

[008] Na fabricação de estruturas compósitas, as camadas de material compósito são tipicamente colocadas em uma ferramenta. As camadas podem ser constituídas por fibras em folhas. Essas folhas podem assumir a forma de tecidos, fitas, cabos de filamentos, ou outras formas apropriadas. Em alguns casos, a resina pode ser infundida ou pré-impregnada nas folhas. Esses tipos de folhas são comumente referidos como pré-impregnados. As diferentes camadas de pré-impregnados podem ser dispostas em diferentes orientações, e diferentes números de camadas podem ser utilizados dependendo dos requisitos de desempenho da estrutura compósita a ser fabricada.

[009] As inconsistências podem ser introduzidas na estrutura compósita durante a fabricação ou durante a utilização da estrutura compósita. Devido ao espaçamento regular das camadas que formam o material compósito, a inspeção do material compósito pode ser mais difícil do que o desejado para alguns locais ou alguns tipos de inconsistências.

[0010] Além disso, algumas inconsistências podem não ser convencionalmente detectáveis com o uso de técnicas não destrutivas convencionais. Portanto, seria desejável ter um método e um aparelho que considerasse pelo menos alguns dos problemas discutidos acima, bem como outros possíveis problemas.

Sumário

[0011] Em uma modalidade ilustrativa, um método para detectar as alterações locais de material em uma estrutura compósita é apresentado. Um feixe de laser pulsado é direcionado em direção à estrutura compósita compreendida por um número de materiais compósitos. Os sinais ultrassônicos de banda larga são formados na estrutura compósita quando a radiação do feixe de laser pulsado é absorvida pela estrutura compósita. Os sinais de ultrassom de banda larga são detectados para formar os dados. Os dados são processados para identificar um valor de frequência local para a estrutura compósita. O valor de frequência local é usado para determinar se as alterações locais de material estão presentes no número de materiais compósitos.

[0012] Em outra modalidade ilustrativa, um método é apresentado. Um feixe de laser pulsado é direcionado em direção à estrutura compósita compreendida por uma pluralidade de camadas. Um número de sinais de ultrassom de banda larga é formado na estrutura compósita quando a radiação do feixe de laser pulsado é absorvida pela estrutura compósita. Os sinais de ultrassom de banda larga são detectados para formar os dados. Os dados compreendem uma pluralidade de

varreduras ultrassônicas do tipo A para pelo menos uma parte da estrutura compósita. Uma janela de movimento no domínio de tempo é aplicada para cada uma da pluralidade de varreduras ultrassônicas do tipo A para formar os sinais contidos na janela. Uma medição de frequência é determinada dentro dos sinais contidos na janela para cada uma da pluralidade de varreduras do tipo A. A medição de frequência tem a média calculada para todas da pluralidade de varreduras ultrassônicas do tipo A para formar um valor de frequência para a estrutura compósita. O valor de frequência é usado para determinar se a estrutura compósita tem um período estrutural modificado.

[0013] Em uma modalidade ilustrativa adicional, um método é apresentado. As varreduras do tipo A para uma estrutura compósita são obtidas com o uso de um sistema de inspeção de ultrassom a laser. Um número de medições de frequência é determinado para cada uma das varreduras do tipo A. O número de medições de frequência para cada uma das varreduras do tipo A tem a média calculada para formar um valor de frequência para a estrutura compósita. O valor de frequência é comparado a um valor de frequência de um padrão de estrutura compósita para determinar se a estrutura compósita foi exposta a uma quantidade indesejável de estresse.

[0014] As características e funções podem ser alcançadas de forma independente em várias modalidades do presente relatório descritivo ou podem ser combinadas em ainda outras modalidades nas quais os detalhes adicionais podem ser vistos com referência à descrição e aos desenhos a seguir.

Breve Descrição dos Desenhos

[0015] As novas características das modalidades ilustrativas são definidas nas reivindicações anexas. As modalidades ilustrativas, no entanto, bem como um modo preferido de utilização, outros objetivos e características das mesmas, serão melhor compreendidos com

referência à descrição detalhada a seguir de uma modalidades ilustrativa de uma divulgação quando lidos em conjunto com os desenhos anexos, em que:

a figura 1 é uma ilustração de uma aeronave na qual uma modalidade ilustrativa pode ser implementada;

a figura 2 é uma ilustração de um diagrama em bloco de um ambiente de inspeção de acordo com uma modalidade ilustrativa;

a figura 3 é uma ilustração de a diagrama em bloco de processamento de dados de detector de acordo com uma modalidade ilustrativa;

a figura 4 é uma ilustração de uma cobertura de duas varreduras ultrassônicas do tipo A no domínio de tempo de acordo com uma modalidade ilustrativa;

a figura 5 é uma ilustração de uma cobertura de duas varreduras ultrassônicas do tipo A no domínio de frequência de acordo com uma modalidade ilustrativa;

a figura 6 é uma ilustração de duas varredura bidirecionais de acordo com uma modalidade ilustrativa;

a figura 7 é uma ilustração de duas frequências médias de acordo com uma modalidade ilustrativa;

a figura 8 é uma ilustração de um gráfico de valor de frequência versus temperatura de uma pluralidade de amostras de acordo com uma modalidade ilustrativa;

a figura 9 é uma ilustração de um fluxograma de um processo para detectar as alterações de material em uma estrutura compósita de acordo com uma modalidade ilustrativa;

a figura 10 é uma ilustração de um fluxograma de um processo para determinar se a estrutura compósita tem um período estrutural modificado de acordo com uma modalidade ilustrativa;

a figura 11 é uma ilustração de um fluxograma de um

processo para determinar se uma estrutura compósita foi exposta a uma quantidade indesejável de estresse de acordo com uma modalidade ilustrativa;

a figura 12 é uma ilustração de um sistema de processamento de dados sob a forma de um diagrama em bloco de acordo com uma modalidade ilustrativa;

a figura 13 é uma ilustração de um método de manutenção e serviço de aeronave sob a forma de um diagrama em bloco de acordo com uma modalidade ilustrativa; e

a figura 14 é uma ilustração de uma aeronave sob a forma de um diagrama em bloco no qual uma modalidade ilustrativa pode ser implementada.

Descrição Detalhada

[0016] As diferentes modalidades ilustrativas reconhecem e consideram uma ou mais considerações diferentes. Por exemplo, as modalidades ilustrativas reconhecem e consideram que o desempenho de estruturas compósitas depende tanto da composição quanto da qualidade de fabricação. As modalidades ilustrativas reconhecem e consideram ainda que as propriedades estruturais de materiais compósitos podem ser sensíveis às degradações química e mecânica irreversíveis seguidas de estresse. O estresse pode ser térmico ou mecânico. Por exemplo, o estresse térmico pode ser colocado em materiais compósitos por raios, escape do motor a jato, incêndios, ou outros incidentes térmicos.

[0017] As modalidades ilustrativas reconhecem e consideram que os estresses térmico e mecânico podem causar alterações de material na estrutura compósita. Essas alterações de material podem reduzir a resistência da estrutura compósita. As modalidades ilustrativas ainda reconhecem e consideram que os materiais compósitos podem ter resistência reduzida sem quaisquer inconsistências evidentes.

[0018] As modalidades ilustrativas reconhecem e consideram que o ultrassom convencional e as inspeções de raio x podem detectar os defeitos macroscópicos nos materiais compósitos. No entanto, as modalidades ilustrativas também reconhecem e consideram que o ultrassom convencional e as inspeções de raio x não detectam as alterações de material induzidas por estresse em uma estrutura compósita. As modalidades ilustrativas reconhecem e consideram que as técnicas de inspeção convencionais que detectam as alterações de material podem ser limitadas às alterações de superfície. Atualmente, nenhuma técnica de inspeção convencional pode avaliar o volume completo de material compósito para as alterações de material induzidas por estresse.

[0019] Agora, com referência às figuras e, em particular, com referência à figura 1, uma ilustração de uma aeronave é mostrada, na qual uma modalidade ilustrativa pode ser implementada. Nesse exemplo ilustrativo, a aeronave 100 tem a asa 102 e a asa 104 fixas ao corpo 106. A aeronave 100 inclui o motor 108 fixo à asa 102 e o motor 110 fixo à asa 104. O corpo 106 tem uma seção posterior 112. O estabilizador horizontal 114, o estabilizador horizontal 116, e o estabilizador vertical 118 são fixos à seção posterior 112 do corpo 106.

[0020] A aeronave 100 é um exemplo de uma aeronave que tem estruturas compósitas que podem ser inspecionadas com um sistema de inspeção de ultrassom a laser de acordo com uma modalidade ilustrativa. Por exemplo, o revestimento compósito em pelo menos uma da asa 102 ou da asa 104 pode ser inspecionado com o uso de um sistema de inspeção de ultrassom a laser.

[0021] Como usado aqui, a expressão "pelo menos um de", quando usado com uma lista de itens, significa que diferentes combinações de um ou mais dos itens listados podem ser usadas, e apenas um de cada item na lista pode ser necessário. Em outras palavras, "pelo menos um

de" significa qualquer combinação de itens e o número de itens pode ser usado a partir da lista, mas nem todos os itens na lista são necessários. O item pode ser um objeto, aspecto ou categoria específicos.

[0022] Por exemplo, "pelo menos um do item A, item B, ou item C" pode incluir, sem limitação, item A, item A e item B, ou item B. Esse exemplo também pode incluir item A, item B e item C ou item B e item C. Obviamente, quaisquer combinações desses itens podem estar presentes. Em outros exemplos, "pelo menos um de" pode ser, por exemplo, sem limitação, dois do item A; um do item B; e dez do item C; quatro do item B e sete do item C; ou outras combinações adequadas.

[0023] Essa ilustração da aeronave 100 é fornecida para propósitos de ilustração de um ambiente no qual as diferentes modalidades ilustrativas podem ser implementadas. A ilustração da aeronave 100 na figura 1 não deve implicar limitações arquitetônicas quanto a maneira na qual diferentes modalidades ilustrativas podem ser implementadas. Por exemplo, a aeronave 100 é mostrada como uma aeronave comercial de passageiro. As diferentes modalidades ilustrativas podem ser aplicadas a outros tipos de aeronave, como uma aeronave privada de passageiro, um helicóptero ou outros tipos adequados de aeronave.

[0024] Embora os exemplos ilustrativos para uma modalidade ilustrativa sejam descritos com relação a uma aeronave, uma modalidade ilustrativa pode ser aplicada a outros tipos de plataformas. A plataforma pode ser, por exemplo, uma plataforma móvel, uma plataforma estacionária, uma estrutura terrestre, uma estrutura aquática, ou uma estrutura espacial. Mais especificamente, a plataforma pode ser uma navio de superfície, um tanque, um transportador pessoal, um trem, uma aeronave espacial, uma estação espacial, um satélite, um submarino, um automóvel, uma instalação de fabricação, uma construção ou outras plataformas adequadas.

[0025] Além disso, uma modalidade ilustrativa pode ser aplicada a outros tipos de estruturas compósitas. Por exemplo, as estruturas compósitas além das plataformas podem ser inspecionadas para as alterações de material com o uso de um sistema de inspeção de ultrassom a laser. As estruturas compósitas além das plataformas podem incluir os dispositivos médicos, membros protéticos, ou quaisquer outros produtos desejados para a varredura, diagnóstico, tratamento ou prevenção ou qualquer combinação ou subcombinação dos mesmos das condições de saúde físicas ou mentais em seres humanos ou animais.

[0026] Agora, com referência à figura 2, uma ilustração de um diagrama em bloco de um ambiente de inspeção é mostrada de acordo com uma modalidade ilustrativa. Como mostrado, ambiente de inspeção 200 inclui estrutura compósita 202. A estrutura compósita 202 pode assumir qualquer número de formas. Por exemplo, estrutura compósita 202 pode ser uma parte para uma aeronave. A estrutura compósita 202 é composta por inúmeros materiais compósitos 203. Além disso, a estrutura compósita 202 é formada por pluralidade de camadas 204. Em alguns exemplos ilustrativos, uma pluralidade de camadas 204 tem uma espessura e espaçamento substancialmente consistentes.

[0027] Nesses exemplos ilustrativos, a estrutura compósita 202 é uma parte compósita para uma aeronave selecionada a partir de um painel, um barril de fuselagem, uma longarina, uma haste, uma nervura, uma caixa de asa, uma asa, um estabilizador, e outros tipos adequados de partes. A estrutura compósita 202 é inspecionada com o uso de sistema de inspeção de ultrassom a laser 205. Como mostrado, o sistema de inspeção de ultrassom a laser 205 inclui o sistema de movimento 206, o detector 208, a fonte de luz 210 e o controlador 212.

[0028] Nesses exemplos ilustrativos, o controlador 212 controla a operação do sistema de inspeção de ultrassom a laser 205. O

controlador 212 pode ser implementado com o uso de hardware, software, firmware, ou uma combinação dos mesmos.

[0029] Nesses exemplos ilustrativos, o controlador 212 pode ser implementado dentro do sistema de computador 214. O sistema de computador 214 pode ser um ou mais computadores. Quando mais de um computador está presente no sistema de computador 214, esses computadores podem ser em comunicação um com o outro através de um meio de comunicação, como uma rede.

[0030] Quando o software é usado, as operações realizadas pelo realizado controlador podem ser implementadas com o uso, por exemplo, sem limitação, do código de programa configurado para ser executado em uma unidade de processor, como um processor 215. Quando o firmware é usado, as operações realizadas pelo controlador podem ser implementadas com o uso, por exemplo, sem limitação, do código de programa e dos dados e armazenados na memória persistente para serem executados em uma unidade de processador.

[0031] Quando o hardware é utilizado, o hardware pode incluir um ou mais circuitos que operam para realizar as operações realizadas pelo controlador. Dependendo da aplicação, o hardware pode assumir a forma de um sistema de circuitos, um circuito integrado, um circuito integrado de aplicação específica (ASIC), um dispositivo lógico programável, ou algum outro tipo adequado de dispositivo de hardware configurado para realizar qualquer número de operações.

[0032] Um dispositivo lógico programável pode ser configurado para realizar certas operações. O dispositivo pode ser configurado de modo permanente para executar essas operações ou pode ser reconfigurável. Um dispositivo lógico programável pode tomar a forma, por exemplo, sem limitação, de uma matriz lógica programável, uma lógica de matriz programável, uma matriz lógica programável de campo, uma disposição de portas de campo programável, ou algum outro tipo de dispositivo de

hardware programável.

[0033] Em alguns exemplos ilustrativos, as operações e/ou processos executados pelo controlador podem ser realizados com o uso dos componentes orgânicos integrados com componentes inorgânicos. Em alguns casos, as operações e/ou processos podem ser realizados por componentes inteiramente orgânicos, excluindo um ser humano. Como um exemplo ilustrativo, os circuitos em semicondutores orgânicos podem ser utilizados para realizar essas operações e/ou processos.

[0034] O sistema de movimento 206 é configurado para mover a fonte de luz 210 e o detector 208 em relação à estrutura compósita 202. O sistema de circulação 206 pode ser implementado com o uso de um número de diferentes tipos de sistemas. Em um exemplo, o sistema de circulação 206 é um robô. O robô pode ser, por exemplo, um braço robótico que pode se mover sobre um detector 208 sobre o número de eixos. O sistema de circulação 206 também pode ser, por exemplo, sem limitação, ser um robô de armação, uma cabeça de leitura de acionamento manual, e outros tipos de apropriados sistemas de movimento.

[0035] A fonte de luz 210 é configurada para transmitir a primeira luz 216 sobre a superfície 218 da estrutura compósita 202. Em alguns exemplos ilustrativos, a fonte de luz 210 é um laser 219. Em um exemplo específico, o laser é um laser de nanosegundos bombeado por diodo 219. Quando a fonte de luz 210 assume a forma de laser 219, a primeira luz 216 pode ser pulsada por feixe de laser 220.

[0036] Nesse exemplo ilustrativo, a primeira luz 216 é transmitida de maneira a formar o primeiro padrão 222 sobre a superfície 218 da estrutura compósita 202. Nesses exemplos ilustrativos, o primeiro padrão 222 da primeira luz 216 é uma pluralidade de áreas na qual a primeira luz 216 ilumina sobre a superfície 218. Essas áreas podem ser circulares, ovais, quadradas, oblíquas, ou ter algum formato que

depende do ângulo de projeção sobre a superfície. Em alguns exemplos ilustrativos, o primeiro padrão 222 assume a forma de uma linha.

[0037] A primeira luz 216 é configurada para formar ondas acústicas 224 dentro da estrutura compósita 202 quando a primeira luz 216 encontra a estrutura compósita 202. As ondas acústicas 224 ocorrem quando a primeira luz 216 é transmitida sobre a superfície 218 da estrutura compósita 202. Por exemplo, a energia na primeira luz 216 causa a expansão termoelástica na estrutura compósita 202. The expansão termoelástica resulta em ondas acústicas 224 na estrutura compósita 202.

[0038] Nesses exemplos ilustrativos, as ondas acústicas 224 são ondas sonoras de ultrassom. Assim, as ondas acústicas 224 são sinais ultrassônicos. Mais especificamente, as ondas acústicas 224 assumem a forma dos sinais de ultrassom de banda larga 226. As ondas acústicas 224 podem ter, por exemplo, uma frequência de cerca de 20 kilohertz a cerca de 100 megahertz dependendo da implementação específica. A frequência para as ondas acústicas 224 depende do material usado para formar a estrutura compósita 202, a amplitude de pulso da excitação a laser e de outros fatores adequados.

[0039] Adicionalmente, o detector 208 é configurado para detectar a primeira resposta 228 às ondas acústicas 224. A primeira resposta 228 inclui as ondas acústicas 229 que podem ocorrer como um resultado da dispersão, reflexão, modulação e outras alterações às ondas acústicas 224 que se movem junto com a estrutura compósita 202. A primeira resposta 228 é composta por ondas acústicas 229 que ocorrem em resposta às ondas acústicas 224. Nesse exemplo ilustrativo, a primeira resposta 228 é detectada pelo detector 208.

[0040] Em alguns exemplos ilustrativos, detector 208 assume a forma de detector óptico 230. Em alguns exemplos ilustrativos, o detector 208 é um detector de indicação 232. Em um exemplo, o

detector 208 pode compreender qualquer forma de interferômetro. Por exemplo, o detector 208 inclui um interferômetro Sagnac de fibra óptica modificada para a detecção de não contato do ultrassom disperso.

[0041] O detector 208 transmite a segunda luz 234 sobre a superfície 218 da estrutura compósita 202 e detecta a segunda resposta 236 à segunda luz 234. Em um exemplo ilustrativo, a segunda luz 234 é transmitida sob a forma de um segundo padrão 238 sobre a superfície 218 da estrutura compósita 202. Nesse exemplo ilustrativo, o segundo padrão 238 assume a forma de um ponto.

[0042] A segunda resposta 236 é a segunda luz 234 que foi desviada pela primeira resposta 228 nesse exemplo ilustrativo. A primeira resposta 228, causada pelas ondas acústicas 224 que se movem dentro da estrutura compósita 202, alcança a superfície 218 e é detectada. Em alguns exemplos ilustrativos, a detecção da primeira resposta 228 é detectada com o uso de um interferômetro que envia uma luz de referência, como a segunda luz 234 e detecta as vibrações mecânicas sobre a superfície 218 na segunda resposta 236. O detector 208 inclui qualquer forma desejável de interferômetro.

[0043] O detector 208 envia os dados 240 ao controlador 212 quando a segunda resposta 236 é detectada. Os dados 240 são usados pelo controlador 212 para gerar a emissão 242. Em alguns exemplos, os dados 240 incluem um sinal de banda larga completa para uma localização da estrutura compósita 202 sendo inspecionada. Quando os dados 240 incluem os sinais recebidos para uma pluralidade de locais de estrutura compósita 202, os dados 240 incluem uma pluralidade de varreduras ultrassônicas do tipo A. O sistema de inspeção de ultrassom a laser 205 é varrido pela estrutura compósita 202, os dados 240 para uma pluralidade de locais na estrutura compósita 202 são coletados.

[0044] Como mostrado, a emissão 242 indica se a inconsistência 244 está presente na estrutura compósita 202. A inconsistência 244

pode ser, por exemplo, sem limitação, rugas 245, alterações de material 246, delaminação 247, vãos 248, e outras características ou propriedades indesejáveis na estrutura compósita 202. Em alguns exemplos ilustrativos, as alterações de material 246 podem ser referidas como "locais". As alterações locais de material 246 se referem à inconsistência 244 em áreas de estrutura compósita 202 que foram inspecionadas com o uso de sistema de inspeção de ultrassom a laser 205. As alterações de material 246 resultam de pelo menos um de estresse térmico ou estresse físico na estrutura compósita 202 antes de direcionar o feixe de laser pulsado 220 em direção à estrutura compósita 202.

[0045] A emissão 242 pode assumir qualquer forma desejável. Por exemplo, a emissão 242 pode assumir a forma de alerta 250. O alerta 250 indica se a inconsistência 244 está presente. O alerta 250 pode ser exibido no dispositivo de exibição 252 dentro de um sistema de computador 214.

[0046] Em outro exemplo ilustrativo, a emissão 242 é uma imagem 253. A imagem 253 também pode ser exibida no dispositivo de exibição 252. Em um exemplo ilustrativo, a imagem 253 é uma imagem de uma parte ou de toda a estrutura compósita 202 com o indicador gráfico 254 quando uma inconsistência 244 está presente na estrutura compósita 202. Em um exemplo, o indicador gráfico 254 é exibido em um local na imagem 253 que corresponde a um local na estrutura compósita 202 onde uma inconsistência 244 é detectada. Em outros exemplos ilustrativos, se a inconsistência 244 estiver ausente, o indicador gráfico 254 pode ser exibido para indicar uma ausência de inconsistência 244.

[0047] Em alguns exemplos ilustrativos, a imagem 253 é uma imagem óptica 256. A imagem óptica 256 pode ser uma imagem de superfície 218 da estrutura compósita 202.

[0048] Em outros exemplos ilustrativos, a imagem 253 é uma

representação de uma parte da estrutura compósita 202. Por exemplo, a imagem 253 é selecionada a partir da varredura ultrassônica do tipo A 258, do espectro de a varredura ultrassônica do tipo A 259, da varredura do tipo B 260, ou da varredura tipo C 262. A varredura ultrassônica do tipo A 258 e o espectro de a varredura ultrassônica do tipo A 259 são, cada um, um gráfico. O espectro de a varredura ultrassônica do tipo A 259 é exibido no domínio de frequência 264. O espectro de a varredura ultrassônica do tipo A 259 é calculado pela transformada de Fourier de a varredura ultrassônica do tipo A 258. A varredura ultrassônica do tipo A 258 está no domínio de tempo 266. A varredura ultrassônica do tipo A 258 no domínio de tempo 266 é obtida ao realizar uma transformada de Fourier inversa no espectro de a varredura ultrassônica do tipo A 259 no domínio de frequência 264. Em um exemplo, o domínio de frequência 264 tem um eixo x de frequência e um eixo y de amplitude. Em um exemplo, o domínio de tempo 266 tem um eixo x de time e um eixo y de amplitude.

[0049] Em alguns exemplos ilustrativos, a varredura ultrassônica do tipo A 258 pode ser uma representação dos dados 240. Como um resultado, os dados 240 podem ser ditos incluir a varredura ultrassônica do tipo A 258. Em outros exemplos ilustrativos, a varredura ultrassônica do tipo A 258 pode ser uma representação de uma parte dos dados 240 depois que os dados 240 são processados.

[0050] A varredura ultrassônica do tipo A 258 é representativa de um local da estrutura compósita 202. Os dados da varredura ultrassônica do tipo A 258 são combinados com os dados de uma pluralidade de varreduras ultrassônicas do tipo A de diferentes locais da estrutura compósita 202 para formar a varredura do tipo B 260. A varredura do tipo B 260 pode ser pelo menos uma de uma imagem de cor ou escala de cinzas. O valor de cada pixel na varredura do tipo B 260 é representativa de uma intensidade da segunda resposta 236 de

um local correspondente da estrutura compósita 202.

[0051] Em um exemplo, a varredura do tipo B 260 tem um eixo x de distância de a varredura e um eixo y de tempo. A varredura do tipo B 260 pode ser uma representação dos dados 240 ou uma representação dos dados 240 depois que os dados 240 são processados.

[0052] A varredura tipo C 262 é representativa de toda ou uma parte da estrutura compósita 202. Em um exemplo, a varredura tipo C 262 tem o mesmo formato bidimensional que toda ou uma parte da estrutura compósita 202. Em alguns exemplos ilustrativos, a varredura tipo C 262 é uma imagem em escala de cinza. Em outros exemplos ilustrativos, a varredura tipo C 262 é uma imagem de cor. O valor de cada pixel na varredura tipo C 262 é representativo de qualquer informação desejável. Em um exemplo, o valor de cada pixel in varredura tipo C 262 é representativo dos locais de inconsistência 244 na estrutura compósita 202. Mais especificamente, o valor de cada pixel in varredura tipo C 262 pode ser representativo dos locais de alterações de material 246 na estrutura compósita 202.

[0053] Em outro exemplo ilustrativo, a imagem 253 assume a forma de a imagem de frequência 268. A imagem de frequência 268 é similar à varredura do tipo B 260 no tipo de o eixo x e no eixo y. Por exemplo, a imagem de frequência 268 pode ter um eixo x de distância de a varredura e um eixo y de tempo. No entanto, a intensidade de cada pixel na imagem de frequência 268 é indicativa de uma frequência como uma frequência média ou a frequência máxima determinada ao processar os dados 240. Uma imagem de frequência 268 indica a presença de alterações de material 246 em uma parte da estrutura compósita 202 representada na imagem de frequência 268.

[0054] Em ainda outro exemplo ilustrativo, a emissão 242 assume a forma de relatório 270. O relatório 270 pode identificar quaisquer inconsistências na estrutura compósita 202. O relatório 270 também

pode incluir outras informações, como os locais de inconsistências, tipos de inconsistências, tamanhos de inconsistências, e outros tipos adequados de informações.

[0055] Em alguns exemplos ilustrativos, o relatório 270 inclui o valor de frequência 272. O valor de frequência 272 é uma média de frequências médias ou frequências máximas para uma parte da estrutura compósita 202 ou para todos os locais da estrutura compósita 202 inspecionada com o uso de sistema de inspeção de ultrassom a laser 205. O volume de amostra da estrutura compósita 202 para a média para o valor de frequência 272 é determinado por pelo menos uma das propriedades de material inicial, escala de heterogeneidades para detectar, precisão de medições ou outras características. O valor de frequência 272 é representativo da presença ou ausência de alterações de material 246 na estrutura compósita 202. O valor de frequência 272 pode ser referido como "local". O valor local de frequência 272 é uma média de valores locais de frequências médias ou frequências máximas determinados para um determinado volume de material no qual as alterações locais de material 246 devem ser determinadas.

[0056] Em um exemplo, o valor de frequência 272 é comparado ao valor de frequência 274 do padrão de estrutura compósita 276. O padrão da estrutura compósita 276 tem o mesmo layout e os materiais que a estrutura compósita 202. A estrutura compósita standard 276 é verificada ter as propriedades estruturais. Quando o valor de frequência 272 se difere do valor de frequência 274 do padrão de estrutura compósita 276, o valor de frequência 272 pode indicar as alterações de material 246 na estrutura compósita 202. Assim, a emissão 242 pode ser pelo menos um de alerta 250, imagem 253, relatório 270, ou outros tipos adequados de emissão.

[0057] A ilustração do ambiente de fabricação 200 na figura 2 não

pretende implicar limitações físicas ou arquitetônicas para a maneira na qual uma modalidade ilustrativa pode ser implementada. Outros componentes podem ser utilizados em adição a ou em lugar daqueles ilustrados. Alguns componentes podem ser desnecessários. Além disso, os blocos são apresentados para ilustrar alguns componentes funcionais. Um ou mais desses blocos podem ser combinados, divididos ou combinados e divididos em diferentes blocos quando implementados em uma modalidade ilustrativa.

[0058] Por exemplo, embora o ambiente de inspeção 200 inclua a estrutura compósita 202, em alguns exemplos ilustrativos, o ambiente de inspeção 200 pode, ao contrário, incluir uma estrutura de qualquer material desejável. Por exemplo, o ambiente de inspeção 200 pode incluir a estrutura produzida a partir de qualquer material desejável com uma pluralidade de camadas.

[0059] Agora, com referência à figura 3, uma ilustração de um diagrama em bloco de processamento de dados de detector é mostrada de acordo com uma modalidade ilustrativa. O processamento 300 de sinal de banda larga completa 302 pode ser realizado no sistema de computador 214 da figura 2. O sinal de banda larga completa 302 pode ser os dados coletados pelo detector 208. O detector usado pode limitar a largura de banda no sinal de banda larga completa 302. Em um exemplo ilustrativo, a largura de banda máxima pode ser 10MHz. Um detector pode ser selecionado de modo que o sinal de estrutura esperado é posicionado no sinal de banda larga completa 302. Por exemplo, se um sinal de estrutura esperado tiver aproximadamente 7 MHz, a largura de banda de detecção deve ser maior que 7 MHz. O processamento 300 de sinal de banda larga completa 302 pode ser realizado pelo processador 215 da figura 2.

[0060] O sinal de banda larga completa 302 é todo ou parte dos dados 240 da figura 2. Em alguns exemplos ilustrativos, o sinal de banda

larga completa 302 é referido como a varredura do tipo A 303. A varredura do tipo A 303 é uma parte de a varredura do tipo B 304. A varredura do tipo B 304 inclui ainda as varreduras do tipo A além da varredura do tipo A 303. A varredura do tipo A 303 é os dados para um primeiro local em uma estrutura compósita. As varreduras adicionais do tipo A de a varredura do tipo B 304 incluem outros locais da mesma estrutura compósita.

[0061] O sinal de banda larga completa 302 é submetido ao processamento 300 para criar um de sinal de estrutura 305 ou sinal sem estrutura 306. O sinal de estrutura 305 é usado para determinar se as alterações de material, como as alterações de material 246 da figura 2, estão presentes na estrutura com uma pluralidade de camadas regulares. O sinal sem estrutura 306 aumenta a detecção de inconsistências macroscópicas em uma estrutura com uma pluralidade de camadas. O sinal sem estrutura 306 mostra uma imagem mais clara de inconsistências. Em alguns exemplos ilustrativos, o sinal sem estrutura 306 pode ser referido como a varredura ultrassônica do tipo A sem estrutura.

[0062] O processamento 300 inclui qualquer série de operações desejável. Por exemplo, o processamento 300 inclui pelo menos um de filtro passa-baixa 308, interpolação 310, janela de movimento 312, ou previsão 314. A série de operações desejável de processamento 300 é realizada em qualquer ordem desejável.

[0063] Em um exemplo ilustrativo, o processamento 300 no sinal de banda larga completa 302 para formar o sinal de estrutura 305 inclui a janela de movimento 312 e, em seguida, a previsão 314. Em alguns exemplos ilustrativos, a janela de movimento 312 é um filtro. Em alguns exemplos ilustrativos, a janela de movimento 312 pode ser aplicada à varredura do tipo A 303 no domínio de tempo.

[0064] A janela de movimento 312 é aplicada ao sinal de banda

larga completa 302 de modo que apenas alguns sinais do sinal de banda larga completa 302 estão contidos dentro da janela de movimento 312 durante um período de tempo. Em alguns exemplos ilustrativos, a janela de movimento 312 tem um formato gaussiano. O formato gaussiano fornece uma troca vantajosa entre a resolução de frequência e resolução de tempo. A resolução de frequência fornece a remoção precisa e interpolação no domínio de frequência. A resolução de tempo fornece a resolução espacial em uma imagem de frequência.

[0065] A janela de movimento 312 é descrita em termos de tamanho ou tempo de amostragem. Um tamanho de janela mínimo para a janela de movimento 312 é a duração do pulso de interrogação. A janela de movimento 312 é tipicamente maior que essa duração para alcançar uma melhor resolução espectral no domínio de frequência. A duração no domínio de tempo é inversamente proporcional à resolução no domínio de frequência. A escolha de características para a janela de movimento 312 é determinada por uma troca entre a solução adquirida no domínio de frequência e resolução adquirida no domínio de tempo. Como discutido acima, um formato gaussiano pode otimizar essa troca.

[0066] A janela de movimento 312 é dimensionada de modo que janela de movimento 312 contém apenas um número de camadas desejado. Em um exemplo, a janela de movimento 312 contém qualquer número de camadas desejável, de duas a cinco camadas. Por exemplo, a janela de movimento 312 contém três camadas.

[0067] Em um exemplo ilustrativo, a janela de movimento 312 tem um diâmetro de 35 pontos de amostra (nível 1/e, 5 ns por amostra), enquanto o tempo de voo dentro de uma camada da estrutura compósita tem cerca de 14 pontos de amostra. Assim, nesse exemplo, um sinal contido na janela contém poucas camadas.

[0068] Cada janela de movimento de tempo 312 é aplicada ao sinal de banda larga completa 302, o sinal contido na janela 316 é formado.

Para cada sinal contido na janela, a previsão 314 pode ser realizada. A previsão 314 determina a medição de frequência 317. Em um exemplo ilustrativo, a medição de frequência 317 é a frequência média 318. Em outro exemplo ilustrativo, a medição de frequência 317 é a frequência máxima 320.

[0069] A frequência média 318 pode ser determinada com o uso de qualquer método desejável. Em um exemplo, a frequência média 318 é determinada com o uso de função de autocorrelação da representação complexa e analítica de sinal contido na janela 316 de a varredura do tipo A 303, $\hat{R}(t)$, de acordo com a equação a seguir:

$$f_{média} = \frac{1}{2\pi i} \frac{\dot{R}(0)}{R(0)} = \frac{1}{2\pi} \dot{\phi}(0) \quad (1)$$

[0070] $R(0)$ é a magnitude da função de autocorrelação complexa, $\hat{R}(t)$, no tempo zero e $\dot{\phi}(0)$ é a fase da função de autocorrelação complexa no tempo zero. O ponto acima de uma função representa o derivativo de tempo daquela função.

[0071] A frequência média 318 é determinada para cada sinal contido na janela 316 de sinal de banda larga completa 302. Além disso, em alguns exemplos, a frequência média 318 é determinada para outros sinais de banda larga completa além do sinal de banda larga completa 302. Por exemplo, a frequência média 318 pode ser determinada para cada sinal contido na janela 316 de cada varredura do tipo A da varredura do tipo B 304.

[0072] Em alguns exemplos ilustrativos, depois de determinar a frequência média 318 de cada sinal contido na janela 316 de cada varredura do tipo A de a varredura do tipo B 304, os valores de frequência média 318 são usados para formar a imagem de frequência 322. A imagem de frequência 322 pode ser uma implementação da imagem de frequência 268 da figura 2. A imagem de frequência 322 inclui cada frequência média 318 de cada sinal contido na janela 316 de cada varredura do tipo A da varredura do tipo B 304. As alterações de

material podem ser evidentes na imagem de frequência 322. Por exemplo, a intensidade dos pixels da imagem de frequência 322 indica as alterações de material.

[0073] Em alguns exemplos ilustrativos, depois de determinar a frequência média 318 de cada sinal contido na janela 316 de cada varredura do tipo A da varredura do tipo B 304, os valores de frequência média 318 são usados para determinar o valor de frequência 324. O valor de frequência 324 pode ser uma média de todos os valores de frequência média 318 para a varredura do tipo B 304. O valor de frequência 324 pode ser indicativo de alterações de material.

[0074] Quando a medição de frequência 317 é a frequência máxima 320, o valor de frequência 324 pode ser uma média de todos os valores de frequência máxima 320 para toda ou parte da varredura do tipo B 304. A frequência máxima 320 pode ser prevista com o uso de qualquer desejável método. Nesses exemplos ilustrativos, a frequência máxima 320 é prevista com o uso da equação a seguir:

$$S_n = \sum_{k=1}^p a_k * S_{n-k} \quad (2)$$

em que p é uma quantidade de coeficientes e S_n é o sinal de a varredura do tipo A no ponto de amostra n.

[0075] O valor de frequência 324 é usado para determinar o se as alterações de material estão presentes em uma área de uma estrutura compósita representada pela varredura do tipo B 304. A determinação de se as alterações de material estão presentes incluem a comparação 326. A comparação 326 compara o valor de frequência 324 ao valor de frequência 328 de um padrão de estrutura compósita, como o padrão de estrutura compósita 276 da figura 2. As alterações de material são determinadas estarem presentes se o valor de frequência 324 for diferente do valor de frequência 328 de um padrão de estrutura compósita.

[0076] Por exemplo, o valor de frequência 324 altera com o estresse

elevado na estrutura compósita. Como um exemplo, o valor de frequência 324 é menor para áreas que têm um estresse térmico mais elevado. Como outro exemplo, o valor de frequência 324 altera para áreas que têm um estresse mecânico mais elevado.

[0077] Em outro exemplo ilustrativo, o processamento 300 no sinal de banda larga completa 302 inclui o filtro passa-baixa 308 para criar o sinal sem estrutura 306. O filtro passa-baixa 308 é usado para remover os sinais de estrutura regulares que resultam no sinal sem estrutura 306. O sinal sem estrutura 306 é usado para gerar a imagem de varredura do tipo B 330. Nesse exemplo, a imagem de varredura do tipo B 330 pode ser referida como a imagem de a varredura do tipo B em filtro de passa-baixa. A imagem de varredura do tipo B 330 indicou inconsistências macroscópicas como porosidade, delaminação, ou outras inconsistências macroscópicas.

[0078] Em um exemplo ilustrativo, o filtro passa-baixa 308 é representado por:

$$\text{Filtro}(f) = \left(1 - \exp\left(-\left(\frac{f}{f_0}\right)^2\right)\right) * \exp\left(-\left(\frac{f}{f_1}\right)^2 - \left(\frac{f}{f_2}\right)^4\right) \quad (3)$$

[0079] Em um exemplo ilustrativo, os parâmetros podem incluir:

$$f_0 = 100 \text{ kHz}, f_1 = 11 \text{ MHz}, \text{ e } \frac{f_2}{f_1} = 1,2$$

[0080] Em alguns exemplos ilustrativos, ao invés de 11 MHz, $f_1 = 5 \text{ MHz}$.

[0081] Agora, com referência à figura 4, uma ilustração de uma cobertura de duas varreduras ultrassônicas do tipo A no domínio de tempo é mostrada de acordo com uma modalidade ilustrativa. A imagem 400 é uma implementação física da imagem 253 da figura 2. A imagem 400 inclui a varredura do tipo A 402 e a varredura do tipo A 404. A varredura do tipo A 402 e a varredura do tipo A 404 são exemplos de a varredura ultrassônica do tipo A 258 no domínio de tempo 266 da figura 2.

[0082] A varredura do tipo A 402 compreende os dados para uma primeira estrutura compósita submetida a 600 graus Fahrenheit. A varredura do tipo A 404 compreende os dados para uma segunda estrutura compósita submetida a 200 graus Fahrenheit. A primeira estrutura compósita da varredura do tipo A 402 tem o mesmo layout que a estrutura compósita da varredura do tipo A 404. A primeira estrutura compósita da varredura do tipo A 402 e a segunda estrutura compósita da varredura do tipo A 404 têm as mesmas camadas posicionadas na mesma ordem. Como pode ser visto na imagem 400, a varredura do tipo A 402 e a varredura do tipo A 404 têm diferentes locais de pico. Além disso, como pode ser visto imagem 400, a varredura do tipo A 402 e a varredura do tipo A 404 têm diferentes valores de pico.

[0083] A imagem 400 tem o eixo x 406 e o eixo y 408. Nesse exemplo, a varredura do tipo A 402 e a varredura do tipo A 404 estão no domínio de tempo. Em conformidade, o eixo x 406 apresenta o tempo em microsegundos e o eixo y 408 apresenta a amplitude.

[0084] A janela de movimento 410 é aplicada ao cada da varredura do tipo A 402 e a varredura do tipo A 404 para determinar as medições de frequência. As medições de frequência são pelo menos uma das frequências máximas ou das frequências médias. A janela de movimento 410 inclui um número de camadas de estruturas compósitas. Nesse exemplo ilustrativo, a janela de movimento 410 inclui duas camadas para cada da varredura do tipo A 402 e da varredura do tipo A 404.

[0085] A janela de movimento 410 é movida na direção 412 na imagem 400 para formar inúmeros sinais contidos na janela. As medições de frequência são determinadas para cada sinal contido na janela tanto da varredura do tipo A 402 quanto da varredura do tipo A 404. As medições de frequência da varredura do tipo A 402 são usadas para determinar o valor de frequência. O valor de frequência é usado

para determinar se as alterações de material ocorreram na primeira estrutura compósita da varredura do tipo A 402. Quaisquer alterações de material na primeira estrutura compósita (não mostrada) da varredura do tipo A 402 podem ser devido ao estresse térmico. As medições de frequência da varredura do tipo A 404 são usadas para determinar um valor de frequência. O valor de frequência é usado para determinar se as alterações de material ocorreram na segunda estrutura compósita da varredura do tipo A 404. Quaisquer alterações de material na segunda estrutura compósita (não mostrada) da varredura do tipo A 404 podem ser devido ao estresse térmico.

[0086] Agora, com referência à figura 5, uma ilustração de uma cobertura de duas varreduras ultrassônicas do tipo A no domínio de frequência é mostrada de acordo com uma modalidade ilustrativa. A imagem 500 é uma implementação física da imagem 253 da figura 2. A imagem 500 inclui varredura do tipo A 502 e a varredura do tipo A 504. A varredura do tipo A 502 e a varredura do tipo A 504 são exemplos de uma varredura ultrassônica do tipo A 258 no domínio de frequência 264 da figura 2.

[0087] A varredura do tipo A 502 é uma vista da varredura do tipo A 402 no domínio de frequência. A varredura do tipo A 504 é uma vista da varredura do tipo A 404 no domínio de frequência. A imagem 500 tem o eixo x 506 e o eixo y 508. O eixo x 506 é a frequência em MHz. O eixo y 508 é a amplitude espectral.

[0088] Como pode ser visto a partir da imagem 500, a varredura do tipo A 502 e a varredura do tipo A 504 são diferentes de maneira significativa. Por exemplo, a varredura do tipo A 502 e a varredura do tipo A 504 têm diferentes frequências de pico. Além disso, a varredura do tipo A 502 e a varredura do tipo A 504 têm diferentes picos secundários.

[0089] Agora, com referência à figura 6, uma ilustração de duas

varreduras do tipo B é mostrada de acordo com uma modalidade ilustrativa. Mais especificamente, na figura 6, a imagem 600 inclui dois filtros passa-baixa nas varreduras do tipo B de faixa de frequência [0-5] MHz. A imagem 600 é uma implementação física da imagem 253 da figura 2. A imagem 600 inclui a varredura do tipo B 602 e a varredura do tipo B 604. A varredura do tipo B 602 e a varredura do tipo B 604 são exemplos de uma varredura do tipo B 260 na figura 2.

[0090] A varredura do tipo B 602 é uma imagem de varredura do tipo B da primeira estrutura compósita submetida a 600 graus Fahrenheit. A varredura do tipo B 604 é uma imagem de varredura do tipo B da segunda estrutura compósita submetida a 200 graus Fahrenheit. A varredura do tipo B 602 e a varredura do tipo B 604 são imagens da varredura do tipo B com filtro passa-baixa.

[0091] A varredura do tipo B 604 não tem quaisquer inconsistências visíveis. O primeiro reflexo de parede posterior 606 é visível na varredura do tipo B 604. O segundo reflexo de parede posterior 608 também é visível na varredura do tipo B 604. A varredura do tipo B 604 tem o eixo x 610 e o eixo y 612. O eixo x 610 é a distância de uma varredura em milímetros. O eixo y 612 apresenta o tempo em microsssegundos.

[0092] A varredura do tipo B 602 tem inconsistências visíveis. A varredura do tipo B 602 inclui a delaminação completa 614. Quando um material compósito tem a delaminação completa 614, a estrutura compósita tem um desempenho indesejável. A delaminação completa 614 não é apenas visível na varredura do tipo B 602, mas também pode ser visível ao olho nu ao observar a estrutura compósita.

[0093] Embora as inconsistências, como a delaminação completa 614, sejam normalmente visíveis nas imagens de varredura do tipo B, as alterações de material sem delaminação completa 614 podem não ser visíveis nas imagens da varredura do tipo B. Por exemplo, as

alterações de material podem causar alterações de desempenho, mas não podem ser visíveis nas imagens de varredura do tipo B. As alterações de material sem a delaminação completa 614 também não são visíveis ao olho nu.

[0094] Nesse exemplo ilustrativo, a primeira estrutura compósita na varredura do tipo B 602 foi submetida a 600 graus Fahrenheit e resultou na delaminação completa 614. No entanto, outra estrutura compósita pode ser submetida a uma temperatura inferior a 600 graus Fahrenheit e teve alterações de material sem exibir a delaminação completa. Por exemplo, uma terceira estrutura compósita submetida a 400 graus Fahrenheit pode não ter delaminação. No entanto, a terceira estrutura compósita pode ter alterações de material que afetam o desempenho da terceira estrutura compósita. Essas alterações de material podem não ser visíveis em uma varredura do tipo B. As modalidades ilustrativas reconhecem e consideram que pode ser desejável determinar se as alterações de material estão presentes.

[0095] Agora, com referência à figura 7, uma ilustração de duas imagens de frequência média é mostrada de acordo com uma modalidade ilustrativa. A imagem 700 é uma implementação física da imagem 253 da figura 2. A imagem 700 inclui a imagem de frequência 702 e a imagem de frequência 704. A imagem de frequência 702 e a imagem de frequência 704 são exemplos de uma imagem de frequência 268 na figura 2. A imagem de frequência 702 e a imagem de frequência 704 têm o eixo x 706 e o eixo y 708. Como mostrado, o eixo x 706 é a distância de uma varredura em milímetros. O eixo y 708 apresenta o tempo em microsssegundos.

[0096] A imagem de frequência 702 é uma imagem de medições de frequência para a primeira estrutura compósita submetida a 600 graus Fahrenheit. Nesse exemplo ilustrativo, as medições de frequência na imagem de frequência 702 são frequências máximas. A imagem de

frequência 704 é uma imagem das medições de frequência para a primeira estrutura compósita submetida a 200 graus Fahrenheit. Nesse exemplo ilustrativo, as medições de frequência na imagem de frequência 704 são frequências máximas. Como pode ser visto na imagem 700, a imagem de frequência 702 e a imagem de frequência 704 são substancialmente diferentes.

[0097] Agora, com referência à figura 8, uma ilustração de um gráfico de valor de frequência versus temperatura de uma pluralidade de amostras é mostrada de acordo com uma modalidade ilustrativa. Os pontos 800 são implementações do valor de frequência 272 da figura 2 para uma pluralidade de estruturas compósitas. Cada um dos pontos 800 é um valor de frequência para uma estrutura compósita correspondente.

[0098] O ponto 802 é um ponto de dados para a primeira estrutura compósita das figuras 4-7. O ponto 804 é um ponto de dados para a segunda estrutura compósita das figuras 4-7. Os pontos 800 são posicionados em um gráfico com eixo x 806 e o eixo y 808. O eixo x 806 é a temperatura em graus Fahrenheit. O eixo y 808 é o valor de frequência.

[0099] Como pode ser visto a partir dos pontos 800, o aumento da temperatura para uma estrutura compósita afeta o valor de frequência. Como mostrado, o aumento da temperatura para uma estrutura compósita faz com que o valor de frequência de uma estrutura compósita diminua. Assim, o valor dos pontos 800 ao longo do eixo y 808 indica se as alterações de material estão presentes em uma estrutura compósita. A temperatura dos pontos 800 é associada ao valor de frequência dos pontos 800, as alterações de material em uma estrutura compósita podem ser identificadas com o uso de um valor de frequência antes da delaminação completa ocorrer.

[00100] O teste de qualidade pode ser realizado em uma variedade

de estruturas compósitas. Ao realizar o teste de qualidade, os valores de frequência são correlacionados à qualidade. Assim, em alguns exemplos ilustrativos, uma estrutura compósita submetida é determinada ter qualidade indesejável ao comparar um valor de frequência da estrutura compósita submetida a um limite de valor de frequência. O limite de valor de frequência pode ser um valor de frequência mínimo para uma qualidade desejável de uma estrutura compósita.

[00101] Os diferentes componentes mostrados na figura 1 e nas figuras 3 a 8 podem ser combinados com os componentes na figura 2, usados com os componentes na figura 2, ou uma combinação dos dois. Adicionalmente, alguns dos componentes na figura 1 e nas figuras 3 a 8 podem ser exemplos ilustrativos de como os componentes mostrados na forma em bloco na figura 2 podem ser implementados como estruturas físicas.

[00102] Agora, com referência à figura 9, uma ilustração de um fluxograma de um processo para detectar as alterações de material em uma estrutura compósita é mostrada de acordo com uma modalidade ilustrativa. O processo ilustrado na figura 9 pode ser implementado em um sistema de inspeção por ultrassom, como o sistema de inspeção de ultrassom a laser 205 na figura 2.

[00103] O processo 900 começa ao direcionar um feixe de laser pulsado em direção à estrutura compósita compreendida por um número de materiais compósitos, em que os sinais de ultrassom de banda larga são formados na estrutura compósita quando a radiação do feixe de laser pulsado é absorvida pela estrutura compósita (operação 902). Em alguns exemplos, as alterações de material resultam de pelo menos um de estresse térmico ou estresse físico na estrutura compósita antes de direcionar o feixe de laser pulsado em direção à estrutura compósita.

[00104] O processo 900, em seguida, detecta os sinais de ultrassom de banda larga para formar os dados (operação 904). Em alguns exemplos ilustrativos, os sinais de ultrassom de banda larga são detectados com o uso de um detector óptico similar a ponto de ultrassom. Em alguns exemplos, o detector óptico similar a ponto de ultrassom é banda larga.

[00105] O processo 900 também processa os dados para identificar um valor de frequência local para a estrutura compósita (operação 906). Em alguns exemplos ilustrativos, o valor de frequência é uma média de valores locais de frequências médias ou frequências máximas determinados para um determinado volume de material no qual as alterações de material devem ser determinadas. Em alguns exemplos ilustrativos, a identificação de um valor de frequência local compreende determinar uma frequência média de um sinal contido na janela de uma varredura ultrassônica do tipo A com o uso da função de autocorrelação da representação complexa e analítica do sinal contido na janela da varredura ultrassônica do tipo A, $\hat{R}(t)$, de acordo com a equação a seguir:

$$f_{média} = \frac{1}{2\pi i} \frac{\dot{R}(0)}{R(0)} = \frac{1}{2\pi} \dot{\phi}(0) \quad (4)$$

em que $R(0)$ é a magnitude da função de autocorrelação complexa, $\hat{R}(t)$, no tempo zero, e $\dot{\phi}(0)$ é a fase da função de autocorrelação complexa no tempo zero. O ponto acima de uma função representa a derivativa de tempo daquela função.

[00106] O processo 900 ainda determina se as alterações de material estão presentes no número de materiais compósitos com o uso do valor de frequência local (operação 908). Depois disso, o processo termina. A determinação de se as alterações de material estão presentes no número de materiais compósitos pode compreender comparar o valor de frequência a um valor de frequência de um padrão de estrutura compósita. As alterações de material são determinadas para estarem

presentes se o valor de frequência local for diferente do valor de frequência do padrão de estrutura compósita. O valor de frequência do padrão de estrutura compósita pode ser representativo de qualidade aceitável para a estrutura compósita.

[00107] Em alguns exemplos ilustrativos, se as alterações de material forem determinadas estar presentes, as alterações de material podem ser avaliadas. Por exemplo, durante uma avaliação, a quantidade ou extensão de alterações de material pode ser determinada. Se a extensão de alterações de material é aceitável, a estrutura compósita pode ser monitorada para quaisquer alterações adicionais de material no futuro. Se a extensão de alterações de material não foi aceitável, a estrutura compósita pode ser trabalhada novamente ou substituída.

[00108] Agora, com referência à figura 10, uma ilustração de um fluxograma de um processo para determinar se a estrutura compósita tem um período estrutural modificado é mostrada de acordo com uma modalidade ilustrativa. O processo ilustrado na figura 10 pode ser implementado em um sistema de inspeção por ultrassom, como o sistema de inspeção de ultrassom a laser 205 na figura 2.

[00109] O processo 1000 começa ao direcionar um feixe de laser pulsado em direção à estrutura compósita compreendida por uma pluralidade de camadas, em que inúmeros sinais de ultrassom de banda larga são formados na estrutura compósita quando a radiação do feixe de laser pulsado é absorvida pela estrutura compósita (operação 1002). O processo 1000 também detecta os sinais de ultrassom de banda larga para formar os dados, em que os dados compreendem uma pluralidade de varreduras ultrassônicas do tipo A para pelo menos uma parte da estrutura compósita (operação 1004).

[00110] O processo 1000 aplica uma janela de movimento no domínio de tempo para cada um da pluralidade de varreduras do tipo A

para formar a sinais contidos na janela (operação 1006). O processo 1000 determina uma medição de frequência dentro dos sinais contidos na janela para cada uma da pluralidade de varreduras do tipo A (operação 1008). Em alguns exemplos ilustrativos, a medição de frequência é selecionada a partir da frequência média ou a frequência máxima. A frequência média pode ser determinada com o uso da função de autocorrelação da representação complexa e analítica do sinal contido na janela da varredura do tipo A, $\hat{R}(t)$, de acordo com a equação:

$$f_{média} = \frac{1}{2\pi i} \frac{\dot{R}(0)}{R(0)} = \frac{1}{2\pi} \dot{\phi}(0) \quad (5)$$

em que $R(0)$ é a magnitude da função de autocorrelação complexa, $\hat{R}(0)$, no tempo zero e $\dot{\phi}(0)$ é a fase da função de autocorrelação complexa no tempo zero, e o ponto acima de uma função representa a derivativa de tempo daquela função.

[00111] O processo 1000 também calcula a média da medição de frequência para toda a pluralidade de varreduras do tipo A para formar um valor de frequência para a estrutura compósita (operação 1010). O processo 1000 determina se a estrutura compósita tem um período estrutural modificado com o uso do valor de frequência (operação 1012). Depois, o processo termina. Em alguns exemplos ilustrativos, determinar se a estrutura compósita tem um período estrutural modificado com o uso do valor de frequência compreende comparar o valor de frequência a um valor de frequência de um padrão de estrutura compósita.

[00112] Agora, com referência à figura 11, uma ilustração de um fluxograma de um processo para determinar se uma estrutura compósita foi exposta a uma quantidade indesejável de estresse é mostrada de acordo com uma modalidade ilustrativa. O processo ilustrado na figura 11 pode ser implementado em um sistema de inspeção por ultrassom, como o sistema de inspeção de ultrassom a laser 205 na figura 2.

[00113] O processo 1100 começa com a obtenção das varreduras do tipo A para uma estrutura compósita com o uso de um sistema de inspeção de ultrassom a laser (operação 1102). Em alguns exemplos, a estrutura compósita tem uma pluralidade de camadas que tem um período estrutural. Em alguns exemplos ilustrativos, o período estrutural é alterado com o estresse elevado.

[00114] O processo 1100 determina um número de medições de frequência para cada uma das varreduras do tipo A (operação 1104). Em alguns exemplos ilustrativos, o número de medições de frequência é um número de frequências médias, e cada frequência média é determinado com o uso da função de autocorrelação da representação complexa e analítica da varredura do tipo A ($\hat{R}(t)$) contida em janela de acordo com a equação a seguir:

$$f_{média} = \frac{1}{2\pi i} \frac{\dot{R}(0)}{R(0)} = \frac{1}{2\pi} \dot{\phi}(0) \quad (6)$$

em que $R(0)$ é a magnitude da função de autocorrelação complexa ($\hat{R}(0)$) no tempo zero e $\dot{\phi}(0)$ é a fase da função de autocorrelação complexa no tempo zero, e o ponto acima de uma função representa a derivativa de tempo daquela função.

[00115] O processo 1100 calcula a média do número de medições de frequência para cada uma das varreduras do tipo A para formar um valor de frequência para a estrutura compósita (operação 1106). O processo 1100, em seguida, determina se a estrutura compósita foi exposta a uma quantidade indesejável de estresse ao comparar o valor de frequência a um valor de frequência de um padrão de estrutura compósita (operação 1108). Depois, o processo termina.

[00116] Os fluxogramas e o diagrama em blocos nas diferentes modalidades ilustradas ilustram a arquitetura, funcionalidade e a operação de algumas implementações possíveis do aparelho e dos métodos em uma modalidade ilustrativa. Com relação a isso, cada bloco nos fluxogramas ou diagrama em blocos pode representar um módulo,

um segmento, uma função e/ou uma parte de uma operação ou etapa.

[00117] Em algumas implementações alternativas de uma modalidade ilustrativa, a função ou funções observadas nos blocos podem ocorrer fora de ordem nas figuras. Por exemplo, em alguns casos, dois blocos mostrados em sucessão podem ser executados substancialmente ao mesmo tempo, ou os blocos podem, algumas vezes, ser realizados na ordem reversa, dependendo da funcionalidade envolvida. Além disso, outros blocos podem ser adicionados, além dos blocos ilustrados em um fluxograma ou diagrama em bloco.

[00118] Por exemplo, os dados no processo 900 podem compreender um número de varreduras ultrassônicas do tipo A da estrutura compósita. Nesse exemplo, processar os dados para identificar o valor de frequência local pode ainda compreender a aplicação de uma janela de movimento em um domínio de tempo para cada um do número de varreduras ultrassônicas do tipo A para formar a sinais contidos na janela; determinar pelo menos um de uma frequência média ou a frequência máxima de um espectro de Fourier considerado para cada um dos sinais contidos na janela; e calcular a média de pelo menos uma da frequência média ou da frequência máxima a partir de cada um dos sinais contidos na janela para formar o valor de frequência. Em outro exemplo ilustrativo, o processo 900 pode ainda compreender exibir uma varredura do tipo B, em que as informações exibidas na varredura do tipo B são pelo menos uma da frequência média ou da frequência máxima para cada janela de movimento. Em um exemplo, a janela de movimento tem um formato gaussiano.

[00119] Agora, com referência à figura 12, uma ilustração de um sistema de processamento de dados sob a forma de um diagrama em bloco é mostrada de acordo com uma modalidade ilustrativa. O sistema de processamento de dados 1200 pode ser usado para implementar o

sistema de computador 214 da figura 2. O sistema de processamento de dados 1200 pode ser usado para processar os dados como descrito na figura 3 e exibe a emissão como mostrado nas figuras 4 a 8. Como mostrado, o sistema de processamento de dados 1200 inclui a estrutura de comunicações 1202, que fornece as comunicações entre a unidade de processador 1204, os dispositivos de armazenamento 1206, a unidade de comunicação 1208, a unidade de entrada/saída 1210, e o visor 1212. Em alguns casos, a estrutura de comunicações 1202 pode ser implementada como um sistema de barramento.

[00120] A unidade de processador 1204 é configurada para executar as instruções para o software realizar um número de operações. A unidade de processador 1204 pode compreender um número de processos, a núcleo de multiprocessador, e/ou algum outro tipo de processador, dependendo da implementação. Em alguns casos, a unidade de processador 1204 pode assumir a forma de uma unidade de hardware, como um sistema de circuito, um circuito integrado de aplicação específica (ASIC), um dispositivo lógico programável, ou algum outro tipo adequado de unidade de hardware.

[00121] As instruções para o sistema operacional, aplicativos e/ou programas executados pela unidade de processador 1204 podem ser localizadas nos dispositivos de armazenamento 1206. Os dispositivos de armazenamento 1206 podem estar em comunicação com a unidade de processador 1204 através da estrutura de comunicações 1202. Como usado aqui, um dispositivo de armazenamento, também referido como um dispositivo de armazenamento legível por computador, é qualquer peça de hardware capaz de armazenar as informações em uma base temporária e/ou permanente. Essas informações podem incluir, mas não se limitam aos dados, código de programa, e/ou outras informações.

[00122] A memória 1214 e o armazenamento persistente 1216 são

exemplos de dispositivos de armazenamento 1206. A memória 1214 pode assumir a forma de, por exemplo, a memória de acesso aleatório ou algum tipo de dispositivo de armazenamento volátil ou não volátil. O armazenamento persistente 1216 pode compreender qualquer número de componentes ou dispositivos. Por exemplo, o armazenamento persistente 1216 pode compreender um disco rígido, uma memória flash, um disco óptico regravável, uma fita magnética regravável, ou algum tipo de comunicação do que foi dito acima. As mídias usadas pelo armazenamento persistente 1216 podem ser removíveis ou não.

[00123] A unidade de comunicações 1208 permite que o sistema de processamento de dados 1200 se comunique com outro sistema de processamento de dados e/ou dispositivos. A unidade de comunicações 1208 pode fornecer as comunicações com o uso de links de comunicação físicos e/ou sem fio.

[00124] A unidade de entrada/saída 1210 permite que a entrada seja recebida a partir de e emitida para ser enviada a outros dispositivos conectados ao sistema de processamento de dados 1200. Por exemplo, a unidade de entrada/saída 1210 pode permitir que a entrada de usuário seja recebida através de um teclado, um mouse e/ou algum outro tipo de dispositivo de entrada. Como outro exemplo, a unidade de entrada/saída 1210 pode permitir que uma emissão seja enviada a uma impressora conectada ao sistema de processamento de dados 1200.

[00125] O visor 1212 é configurado para exibir as informações a um usuário. O visor 1212 pode compreender, por exemplo, sem limitação, um monitor, uma tela sensível ao toque, um visor a laser, um visor holográfico, um dispositivo de exibição virtual e/ou algum outro tipo de dispositivo de exibição.

[00126] Nesse exemplo ilustrativo, os processos das diferentes modalidades ilustrativas podem ser realizados pela unidade de processador 1204 com o uso de instruções implementadas por

computador. Essas instruções podem ser referidas como o código de programa, código de programa utilizável pelo computador, ou código de programa legível por computador, e podem ser lidas e executadas em um ou mais processadores na unidade de processador 1204.

[00127] Nesses exemplos, o código de programa 1218 é localizado em uma forma funcional no meio legível por computador 1220, que é renovável de maneira seletiva, e pode ser carregado no ou transferido ao sistema de processamento de dados 1200 para a execução pela unidade de processador 1204. O código de programa 1218 e meio legível por computador 1220 formam juntos um produto de programa 1222. Nesse exemplo ilustrativo, o meio legível por computador 1220 pode ser o meio de armazenamento legível por computador 1224 ou o meio de sinal legível por computador 1226.

[00128] O meio de armazenamento legível por computador 1224 é um dispositivo de armazenamento físico ou tangível usado para armazenar o código de programa 1218, ao invés de um meio que propaga ou transmite o código de programa 1218. O meio de armazenamento legível por computador 1224 pode ser, por exemplo, sem limitação, um disco óptico ou magnético ou um dispositivo de armazenamento persistente que é conectado ao sistema de processamento de dados 1200.

[00129] Em alternativa, o código de programa 1218 pode ser transferido ao sistema de processamento de dados 1200 com o uso do meio de sinal legível por computador 1226. O meio de sinal legível por computador 1226 pode ser, por exemplo, um código de programa que contém o sinal de dados programados 1218. Esse sinal de dados pode ser um sinal eletromagnético, um sinal óptico e/ou algum outro tipo de sinal que pode ser transmitido através de links de comunicações física e/ou sem fio.

[00130] A ilustração do sistema de processamento de dados 1200 na

figura 12 não tem a intenção de fornecer limitações arquitetônicas à maneira na qual as modalidades ilustrativas podem ser implementadas. As diferentes modalidades ilustrativas podem ser implementadas em um sistema de processamento de dados que inclui os componentes em adição ou no lugar daqueles ilustrados para o sistema de processamento de dados 1200. Além disso, os componentes mostrados na figura 12 podem ser variados a partir dos exemplos ilustrativos mostrados.

[00131] As modalidades ilustrativas da descrição podem ser descritas no contexto do método de manutenção e serviço de aeronave 1300, como mostrado na figura 13, e da aeronave 1400, como mostrado na figura 14. Primeiro, com referência à figura 13, uma ilustração de um método de manutenção e serviço de aeronave é mostrada de acordo com uma modalidade ilustrativa. Durante a pré-produção, o método de manutenção e serviço de aeronave 1300 pode incluir a especificação e o design 1302 da aeronave 1400 e aquisição de material 1304.

[00132] Durante a produção, a fabricação do componente e do subconjunto 1306 e a integração do sistema 1308 da aeronave 1400 ocorrem. Depois, a aeronave 1400 passa por uma certificação e entrega 1310 a fim de ser colocada a serviço 1312. Enquanto está em serviço 1312 por um cliente, a aeronave 1400 é programada para uma manutenção e serviço de rotina 1314, que pode incluir modificação, reconfiguração, remodelação, e outra manutenção ou serviço.

[00133] Cada um dos processos do método de manutenção e serviço de aeronave 1300 pode ser realizado ou executado por um integrador de sistema, terceirizados, e/ou um operador. Nesses exemplos, o operador pode ser um cliente. Com o propósito de descrever, um integrador de sistema pode incluir, sem limitação, qualquer número de fabricantes de aeronave e subcontratados de sistema principal; terceirizados podem incluir, sem limitação, qualquer número de

vendedores, subcontratados e fornecedores; e um operador pode ser uma companhia aérea, uma empresa de aluguel, uma entidade militar, uma organização de serviço, e assim por diante.

[00134] Agora, com referência à figura 14, uma ilustração de uma aeronave é mostrada na qual uma modalidade ilustrativa pode ser implementada. Nesse exemplo, a aeronave 1400 é produzida pelo método de manutenção e serviço de aeronave 1300 na figura 13, e pode incluir estrutura de avião 1402 com a pluralidade de sistemas 1404 e o interior 1406. Os exemplos da pluralidade de sistemas 1404 incluem um ou mais do sistema de propulsão 1408, sistema elétrico 1410, sistema hidráulico 1412 e sistema ambiental 1414. Qualquer número de outros sistemas pode ser incluído. Embora um exemplo de espaço aéreo seja mostrado, diferentes modalidades ilustrativas podem ser aplicadas a outras indústrias, como a indústria automotiva.

[00135] Os aparelhos e métodos aqui incorporados podem ser utilizados durante pelo menos uma das etapas de fabricação de aeronaves e método de serviço 1300 na Figura 13. Uma ou mais modalidades ilustrativas podem ser utilizadas durante a fabricação do componente e subconjunto 1306 na figura 13. Por exemplo, o sistema de inspeção de ultrassom a laser 205 da figura 2 pode ser utilizado para inspecionar as estruturas compósitas durante a fabricação do componente e subconjunto 1306. Além disso, o sistema de inspeção de ultrassom a laser 205 na figura 2 pode ser utilizado para inspecionar uma montagem durante a manutenção e serviço 1314 na figura 13. Por exemplo, as estruturas compósitas de aeronaves 1400 podem ser inspecionadas durante a manutenção programada de aeronaves 1400 com o uso do sistema de inspeção de ultrassom a laser 205.

[00136] Assim, uma ou mais modalidades ilustrativas proporcionam um método e um aparelho para determinar se as mudanças de materiais estão presentes em uma estrutura compósita. As alterações

significativas ocorrem em uma estrutura compósita, como resultado de tensões mecânicas ou térmicas. As alterações de material podem não ser observáveis com o uso de técnicas de ultrassom convencionais. No entanto, as alterações de material influenciam na resistência do material e de outras propriedades do material. Como um resultado, as alterações relevantes devido às tensões térmicas podem impactar de maneira indesejável uma estrutura compósita.

[00137] Uma ou mais modalidades ilustrativas fornecem um método para determinar um valor de frequência. O valor de frequência é usado para determinar se as alterações de material estão presentes em uma estrutura compósita. O valor de frequência é comparado a um valor de frequência de um padrão de estrutura compósita para determinar se as alterações de material estão presentes. Se um valor de frequência da estrutura compósita for diferente do valor de frequência do padrão de estrutura compósita, em seguida, as alterações de material são determinadas estarem presentes na estrutura compósita.

[00138] O valor de frequência é uma média de medições de frequência para uma parte da estrutura compósita inspecionado com o uso do sistema de inspeção de ultrassom a laser. As medições de frequência são pelo menos uma das frequências máximas ou frequências médias.

[00139] A descrição das diferentes modalidades ilustrativas foi apresentada com os propósitos de ilustrar e descrever, e não se destinam a ser exaustivas ou limitadas às modalidades sob a forma apresentada. Muitas modificações e variações ficarão evidentes aos versados na técnica. Além disso, as diferentes modalidades ilustrativas podem fornecer diferentes características quando comparadas às modalidades desejáveis. A modalidade ou modalidades selecionadas são escolhidas e descritas a fim de melhor explicar os princípios da modalidade, a aplicação prática e permitir que outros além do versado

na técnica entenda a descrição a partir das várias modalidades com várias modificações, como é adequado para o uso específico observado.

[00140] Além disso, a descrição compreende as modalidades de acordo com as cláusulas a seguir:

[00141] Cláusula 1. Um método para detectar as alterações locais de material 246 em uma estrutura compósita 202, o método que compreende: direcionar um feixe de laser pulsado 220 em direção à estrutura compósita 202 compreendida por um número de materiais compósitos 203, em que os sinais de ultrassom de banda larga 226 são formados na estrutura compósita 202 quando a radiação do feixe de laser pulsado 220 é absorvida pela estrutura compósita 202; detectar os sinais de ultrassom de banda larga 226 para formar os dados 240; processar os dados 240 para identificar um valor de frequência local 272, 324 para a estrutura compósita 202; e determinar se as alterações locais de material 246 estão presentes no número de materiais compósitos 203 com o uso do valor de frequência local 272, 324.

[00142] Cláusula 2. O método da cláusula 1, em que a determinação de se as alterações locais de material 246 estão presentes no número de materiais compósitos 203 compreende comparar o valor de frequência local 272, 324 a um valor de frequência 274, 328 de um padrão de estrutura compósita 276.

[00143] Cláusula 3. O método da cláusula 2, em que as alterações locais de material 246 são determinadas para estarem presentes se o valor de frequência local 272, 324 for diferente do valor de frequência 274, 328 do padrão de estrutura compósita 276.

[00144] Cláusula 4. O método da cláusula 2 ou 3, em que o valor de frequência 274, 328 do padrão de estrutura compósita 276 é representativo de qualidade aceitável para a estrutura compósita 202.

[00145] Cláusula 5. O método de qualquer uma das cláusulas 1

a 4, em que os dados 240 compreende um número de varreduras ultrassônicas do tipo A 258, 303 da estrutura compósita 202, e em que processar os dados 240 para identificar o valor de frequência local 272, 324 compreende: aplicar uma janela de movimento 312 em um domínio de tempo 266 para cada um do número de varreduras ultrassônicas do tipo A 258, 303 para formar os sinais contidos na janela 316; determinar pelo menos um de uma frequência média 318 ou uma frequência máxima 320 de um espectro de Fourier considerado para cada um dos sinais contidos na janela 316; e calcular a média de pelo menos um da frequência média 318 ou da frequência máxima 320 a partir de cada um dos sinais contidos na janela 316 para formar o valor de frequência local 272, 324.

[00146] Cláusula 6. O método da cláusula 5, que compreende ainda: exibir uma varredura do tipo B 260, em que as informações exibidas na varredura do tipo B 260 são pelo menos uma da frequência média 318 ou da frequência máxima 320 para cada janela de movimento 312.

[00147] Cláusula 7. O método da cláusula 5 ou 6, em que a janela de movimento 312 tem um formato gaussiano.

[00148] Cláusula 8. O método de qualquer uma das cláusulas 1 a 7, em que o processamento dos dados 240 para identificar o valor de frequência local 272, 324 compreende: determinar uma frequência média 318 de um sinal contido na janela 316 de uma varredura ultrassônica do tipo A 258, 303 com o uso de uma função de autocorrelação complexa de uma representação complexa e analítica de um sinal contido na janela 316 da varredura ultrassônica do tipo A 258, 303, $\hat{R}(t)$, de acordo com uma equação, $f_{média} = \frac{1}{2\pi i} \frac{\dot{R}(0)}{R(0)} = \frac{1}{2\pi} \dot{\phi}(0)$, em que $R(0)$ é uma magnitude da função de autocorrelação complexa, $\hat{R}(0)$, no tempo zero, $\phi(0)$ é uma fase da função de autocorrelação complexa no tempo zero, e um ponto acima de uma função representa

um tempo derivativo daquela função.

[00149] Cláusula 9. O método de qualquer uma das cláusulas 1 a 8, em que o valor de frequência local 272, 324 é uma média de valores locais de frequências médias 318 ou de frequências máximas 320 determinados para um determinado volume de material no qual as alterações locais de material 246 devem ser determinadas.

[00150] Cláusula 10. O método de qualquer uma das cláusulas 1 a 9, em que as alterações locais de material 246 resultam de pelo menos um de estresse térmico ou estresse físico na estrutura compósita 202 antes de direcionar o feixe de laser pulsado 220 em direção à estrutura compósita 202.

[00151] Cláusula 11. O método de qualquer uma das cláusulas 1 a 10, em que os sinais de ultrassom de banda larga 226 são detectados com o uso de um detector óptico similar a ponto 230 de ultrassom.

[00152] Cláusula 12. O método da cláusula 11, em que o detector óptico similar a ponto 230 de ultrassom é banda larga.

[00153] Cláusula 13. Um método que comprehende: direcionar um feixe de laser pulsado 220 em direção a uma estrutura compósita 202 compreendida por uma pluralidade de camadas 204, em que inúmeros sinais de ultrassom de banda larga 226 são formados na estrutura compósita 202 quando a radiação do feixe de laser pulsado 220 é absorvida pela estrutura compósita 202; detectar os sinais de ultrassom de banda larga 226 para formar os dados 240, em que os dados 240 comprehendem uma pluralidade de varreduras ultrassônicas do tipo A 258, 303 para pelo menos uma parte da estrutura compósita 202; aplicar uma janela de movimento 312 em um domínio de tempo 266 para cada um da pluralidade de varreduras ultrassônicas do tipo A 258, 303 para formar os sinais contidos na janela 316; determinar uma medição de frequência 317 dentro dos sinais contidos na janela 316 para cada uma da pluralidade de varreduras ultrassônicas do tipo A 258, 303; calcular

a média da medição de frequência 317 para todas da pluralidade de varreduras ultrassônicas do tipo A 258, 303 para formar um valor de frequência 272, 324 para a estrutura compósita 202; e determinar se a estrutura compósita 202 tem um período estrutural modificado com o uso do valor de frequência 272, 324.

[00154] Cláusula 14. O método da cláusula 13, em que determinar se a estrutura compósita 202 tem o período estrutural modificado com o uso do valor de frequência 272, 324 compreende: comparar o valor de frequência 272, 324 a um valor de frequência 274, 328 de um padrão de estrutura compósita 276.

[00155] Cláusula 15. O método da cláusula 13 ou 14, em que a medição de frequência 317 é selecionada a partir de uma frequência média (318) ou uma frequência máxima 320.

[00156] Cláusula 16. O método da cláusula 15, em que a frequência média 318 é determinada com o uso de uma função de autocorrelação complexa de uma representação complexa e analítica de um sinal contido na janela 316 de uma varredura do tipo A, $\hat{R}(t)$, de acordo com uma equação, $f_{média} = \frac{1}{2\pi i} \frac{\dot{R}(0)}{R(0)} = \frac{1}{2\pi} \dot{\phi}(0)$, em que $R(0)$ é uma magnitude da função de autocorrelação complexa, $\hat{R}(t)$, no tempo zero, $\phi(0)$ é uma fase da função de autocorrelação complexa no tempo zero, e um ponto acima de uma função representa um tempo derivativo daquela função.

[00157] Cláusula 17. Um método que compreende: obter as varreduras do tipo A 258, 303 para uma estrutura compósita 202 com o uso de um sistema de inspeção de ultrassom a laser 205; determinar um número de medições de frequência 317 para cada uma das varreduras do tipo A 258, 303; calcular a média do número de medições de frequência 317 para cada uma das varreduras do tipo A 258, 303 para formar um valor de frequência 272, 324 para a estrutura compósita 202; e determinar se a estrutura compósita 202 foi exposta a uma quantidade indesejável de estresse ao comparar o valor de frequência

272, 324 a um valor de frequência 274, 328 de um padrão de estrutura compósita 276.

[00158] Cláusula 18. O método da cláusula 17, em que a estrutura compósita 202 tem uma pluralidade de camadas 204 que têm um período estrutural.

[00159] Cláusula 19. O método da cláusula 18, em que o período estrutural é alterado com estresse elevado.

[00160] Cláusula 20. O método da cláusula 17, 18, ou 19, em que o número de medições de frequência 317 é um número de frequências médias 318, e em que cada frequência média 318 é determinada com o uso da função de autocorrelação complexa de uma representação complexa e analítica de uma varredura do tipo A que contém janelas, $(\hat{R}(t))$, de acordo com uma equação, $f_{média} = \frac{1}{2\pi i} \frac{\dot{R}(0)}{R(0)} = \frac{1}{2\pi} \dot{\phi}(0)$, em que $R(0)$ é uma magnitude da função de autocorrelação complexa, $(\hat{R}(t))$, no tempo zero, $\phi(0)$ é uma fase da função de autocorrelação complexa no tempo zero, e um ponto acima de uma função representa um tempo derivativo daquela função.

REIVINDICAÇÕES

1. Método para detectar as alterações locais de material (246) em uma estrutura compósita (202), o método caracterizado pelo fato de que compreende:

direcionar um feixe de laser pulsado (220) em direção à estrutura compósita (202) compreendida por um número de materiais compósitos (203), em que os sinais de ultrassom de banda larga (226) são formados na estrutura compósita (202) quando a radiação do feixe de laser pulsado (220) é absorvida pela estrutura compósita (202);

detectar os sinais de ultrassom de banda larga (226) para formar os dados (240), em que os dados (240) compreendem um número de varreduras ultrassônicas do tipo A (258, 303) da estrutura compósita (202);

processar os dados (240) para identificar um valor de frequência local (272, 324) para a estrutura compósita (202); e

determinar se as alterações locais de material (246) estão presentes no número de materiais compósitos (203) com o uso do valor de frequência local (272, 324);

em que processar os dados (240) para identificar um valor de frequência local (272, 324) compreende:

aplicar uma janela de movimento (312) em um domínio de tempo (266) para cada um do número de varreduras ultrassônicas do tipo A (258, 303) para formar os sinais contidos na janela (316);

determinar pelo menos uma dentre uma frequência média (318) ou uma frequência máxima (320) de um espectro de Fourier considerado para cada um dos sinais contidos na janela (316); e

calcular a média de pelo menos uma dentre a frequência média (318) ou a frequência máxima (320) a partir de cada um dos sinais contidos na janela (316) para formar o valor de frequência local (272, 324).

2. Método, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que a determinação de se as alterações locais de material (246) estão presentes no número de materiais compósitos (203) compreende comparar o valor de frequência local (272, 324) a um valor de frequência (274, 328) de um padrão de estrutura compósita (276).

3. Método, de acordo com a reivindicação 2, caracterizado pelo fato de que as alterações locais de material (246) são determinadas para estarem presentes se o valor de frequência local (272, 324) for diferente do valor de frequência (274, 328) do padrão de estrutura compósita (276).

4. Método, de acordo com a reivindicação 2 ou 3, caracterizado pelo fato de que o valor de frequência (274, 328) do padrão de estrutura compósita (276) é representativo de qualidade aceitável para a estrutura compósita (202).

5. Método, de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 4, caracterizado pelo fato de que compreende ainda:

exibir uma varredura do tipo B (260), em que as informações exibidas na varredura do tipo B (260) são pelo menos uma da frequência média (318) ou da frequência máxima (320) para cada janela de movimento (312).

6. Método, de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 5, caracterizado pelo fato de que a janela de movimento (312) tem um formato gaussiano.

7. Método, de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 6, caracterizado pelo fato de que processar os dados (240) para identificar o valor de frequência local (272, 324) compreende:

determinar uma frequência média (318) de um sinal contido na janela (316) de uma varredura ultrassônica do tipo A (258, 303) com o uso de uma função de autocorrelação complexa de uma representação complexa e analítica de um sinal contido na janela (316)

da varredura ultrassônica do tipo A (258, 303), $\hat{R}(t)$, de acordo com uma equação, $f_{média} = \frac{1}{2\pi i} \frac{\dot{R}(0)}{R(0)} = \frac{1}{2\pi} \dot{\phi}(0)$, em que $R(0)$ é uma magnitude da função de autocorrelação complexa, $\hat{R}(t)$, no tempo zero, $\phi(0)$ é uma fase da função de autocorrelação complexa no tempo zero, e um ponto acima de uma função representa um tempo derivativo daquela função.

8. Método, de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 7, caracterizado pelo fato de que o valor de frequência local (272, 324) é uma média de valores locais de frequências médias (318) ou frequências máximas (320) determinados para um determinado volume de material no qual as alterações locais de material (246) devem ser determinadas.

9. Método, de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 8, caracterizado pelo fato de que os sinais de ultrassom de banda larga (226) são detectados com o uso de um detector óptico similar a ponto (230) de ultrassom.

10. Método, de acordo com a reivindicação 9, caracterizado pelo fato de que o detector óptico similar a ponto (230) de ultrassom é banda larga.

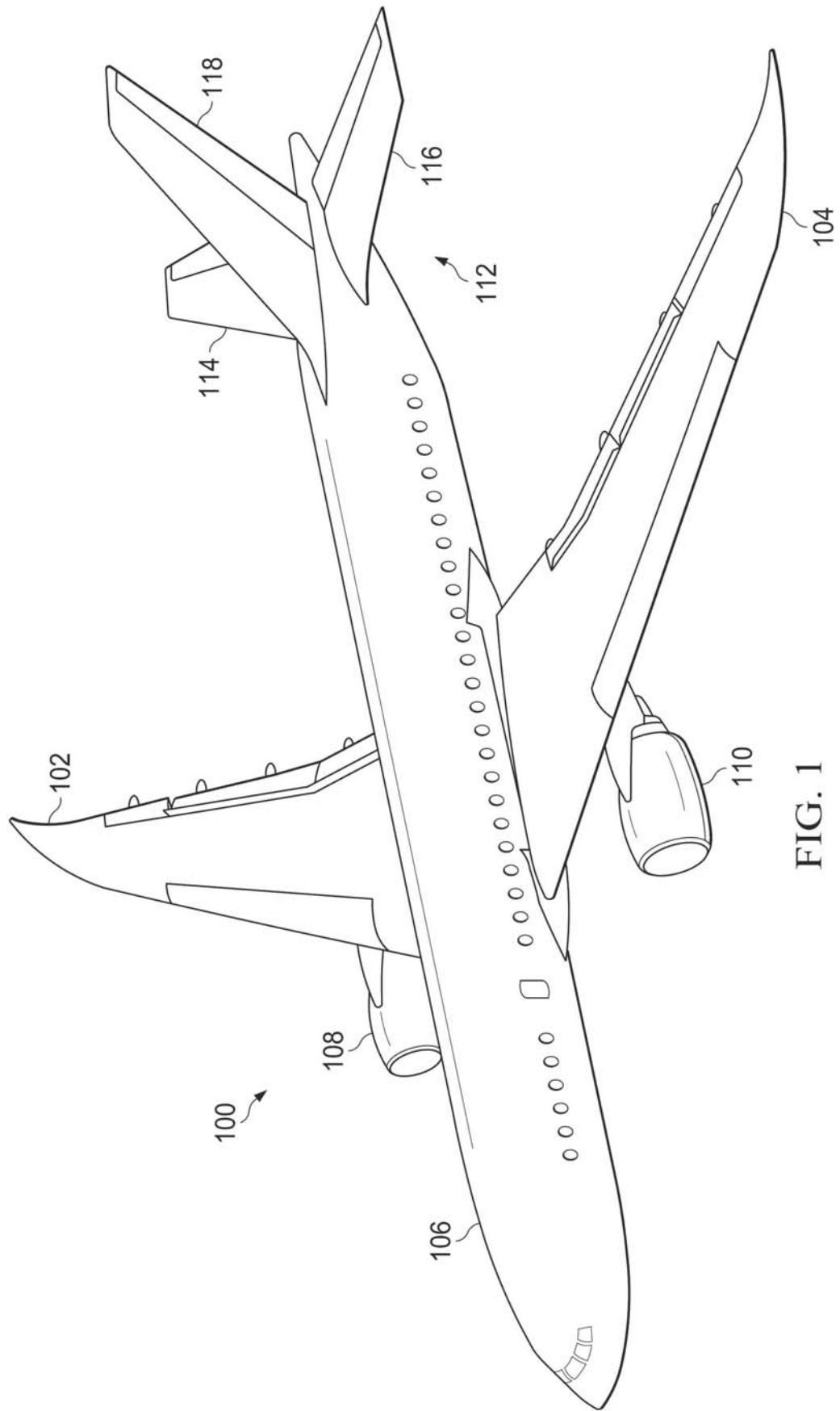
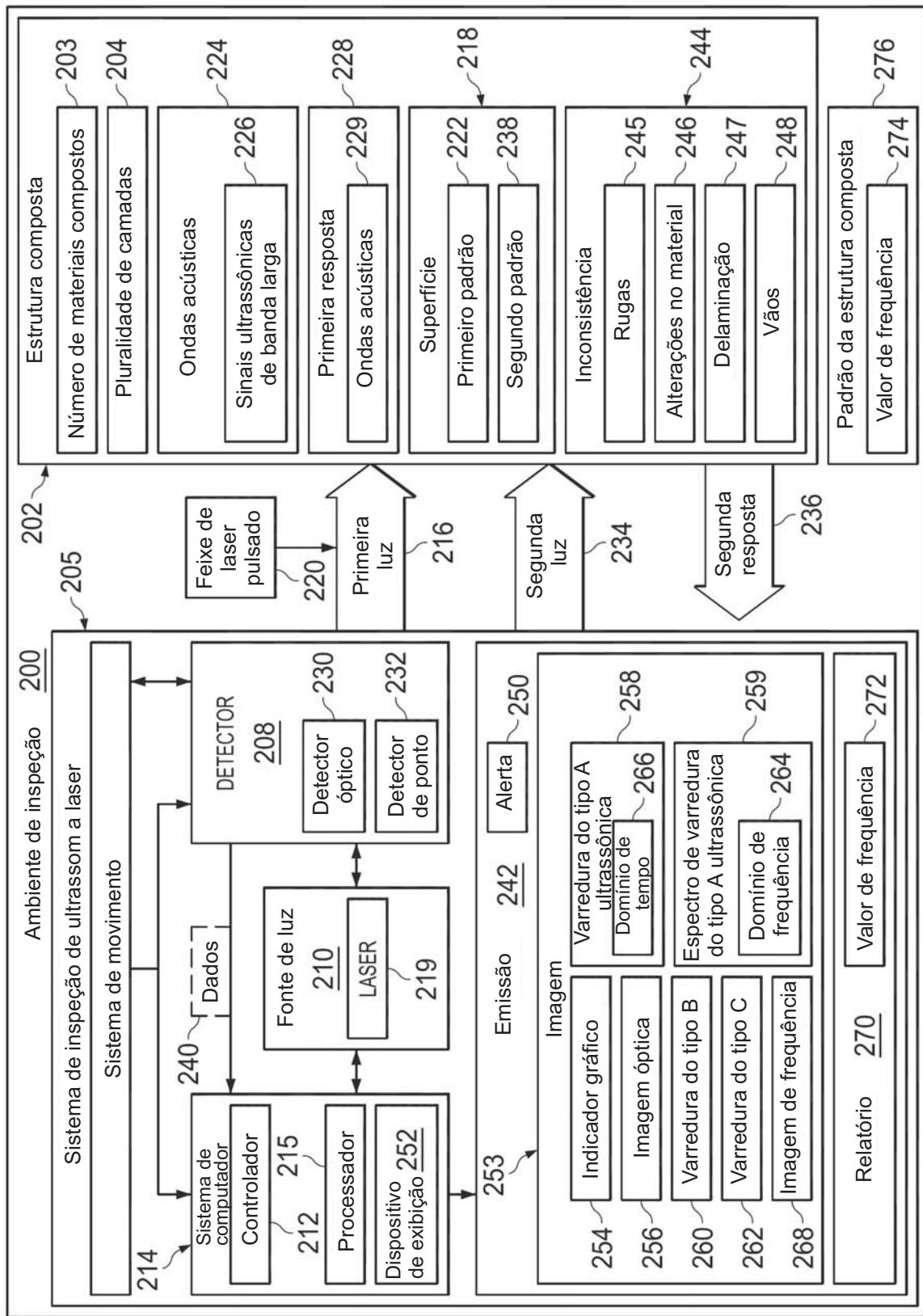


FIG. 1

FIG. 2



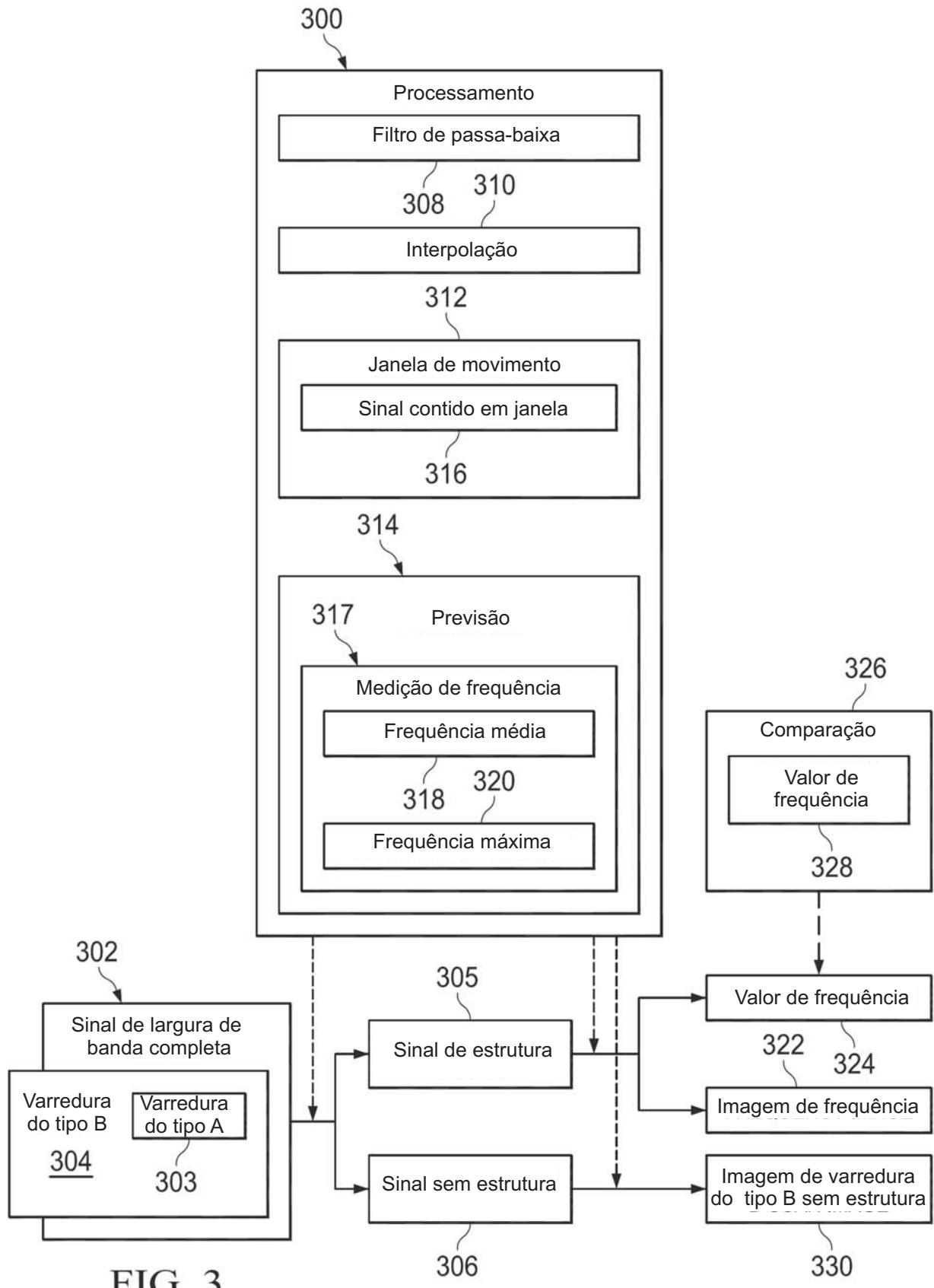


FIG. 3

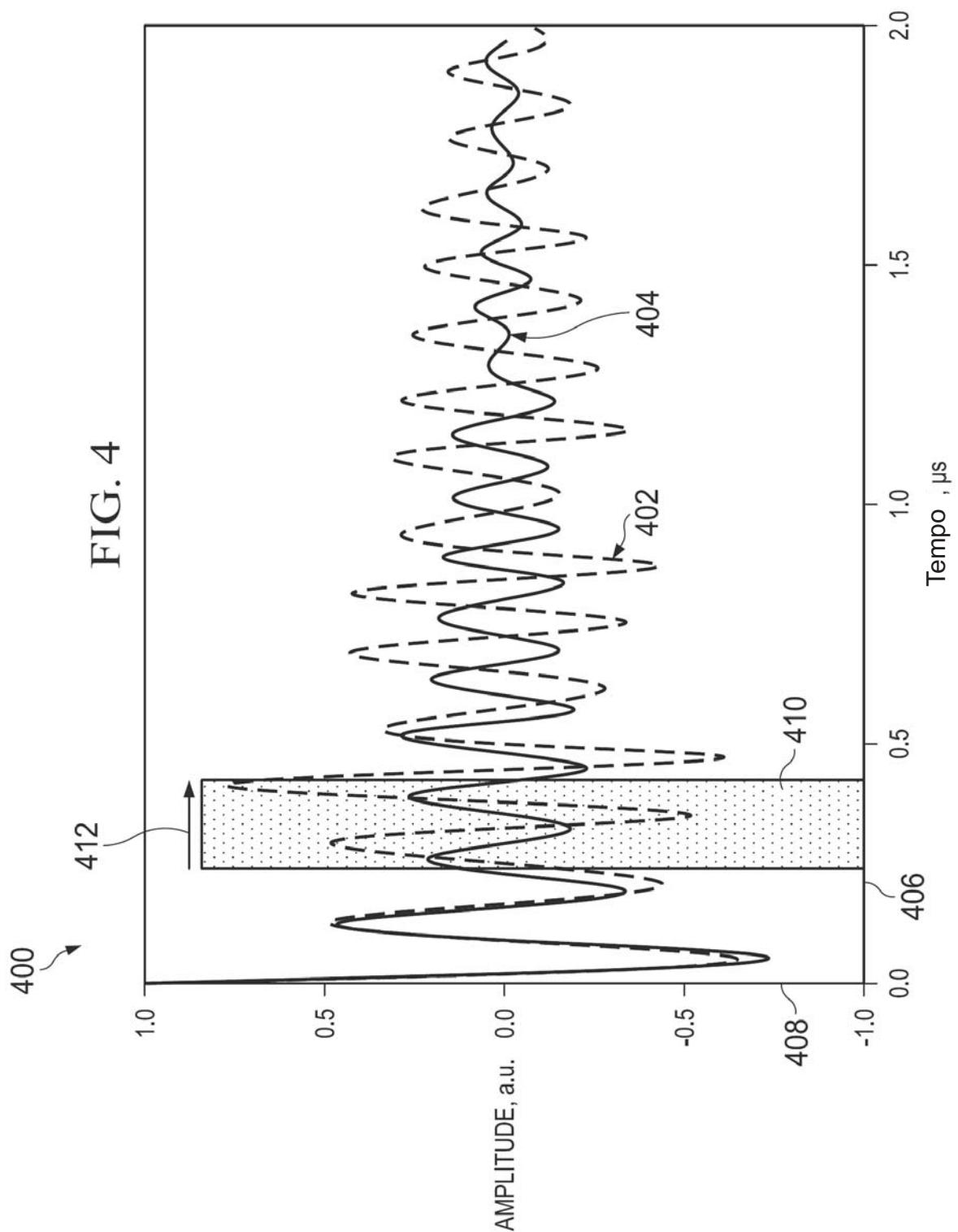
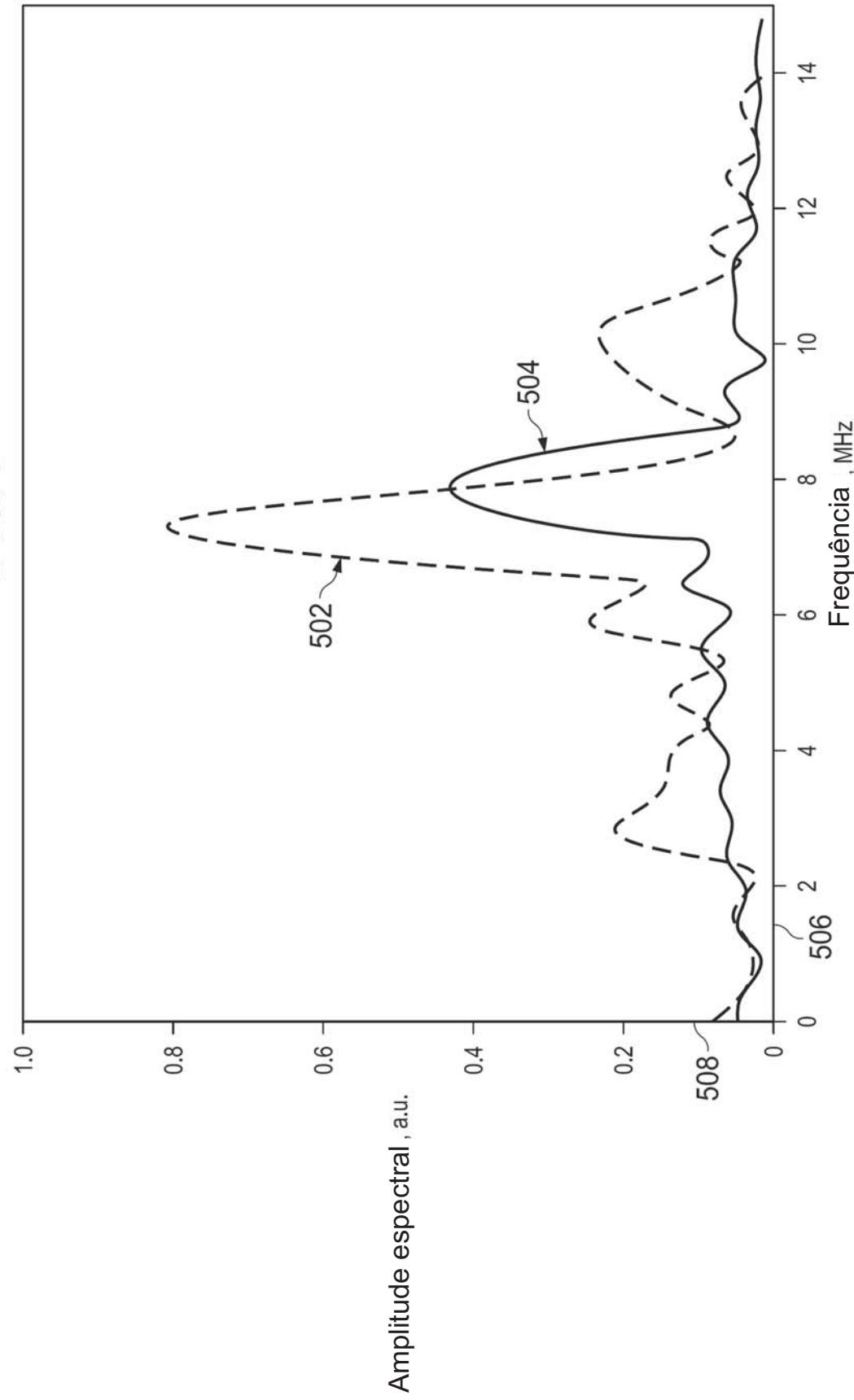
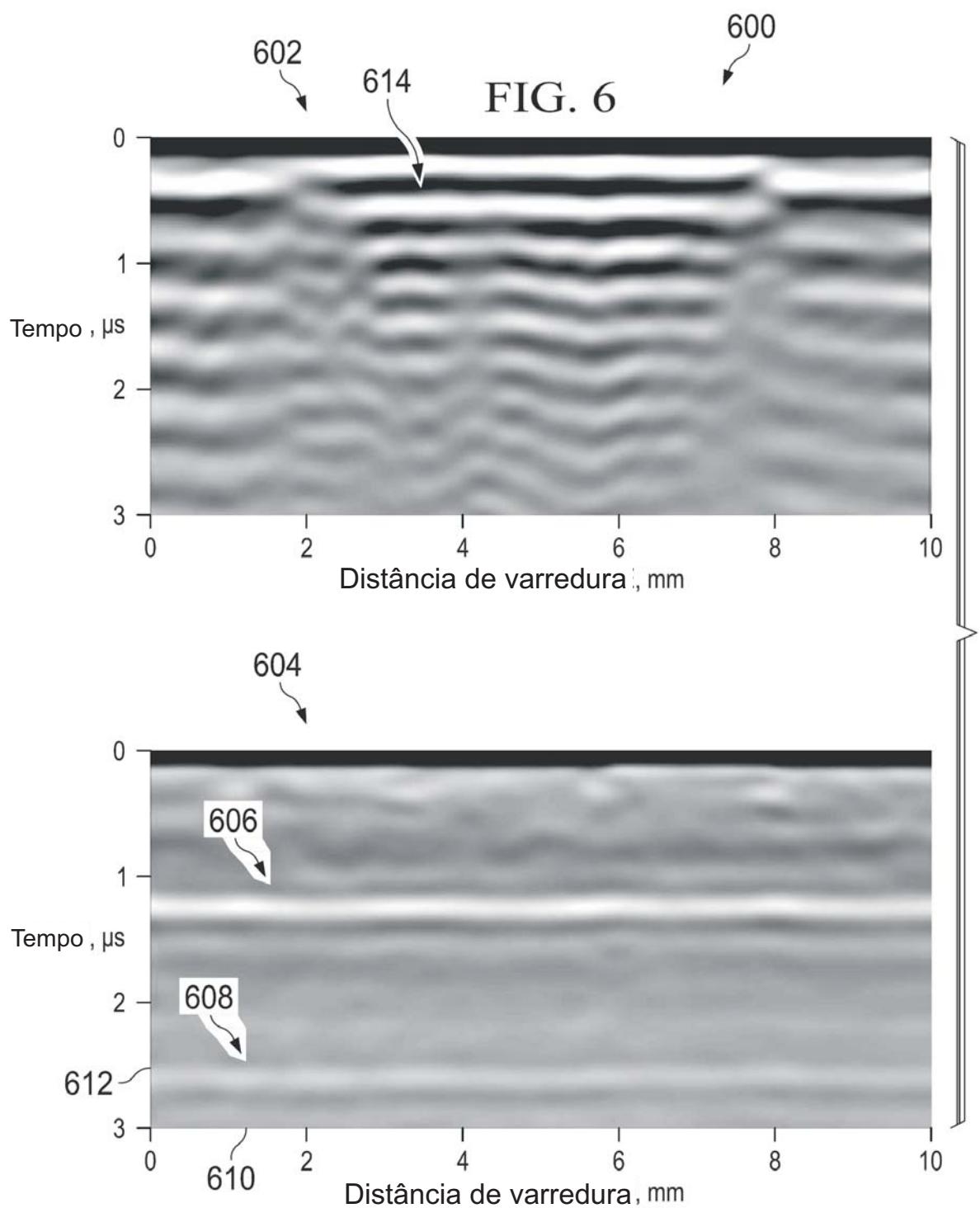


FIG. 5





700
702

FIG. 7

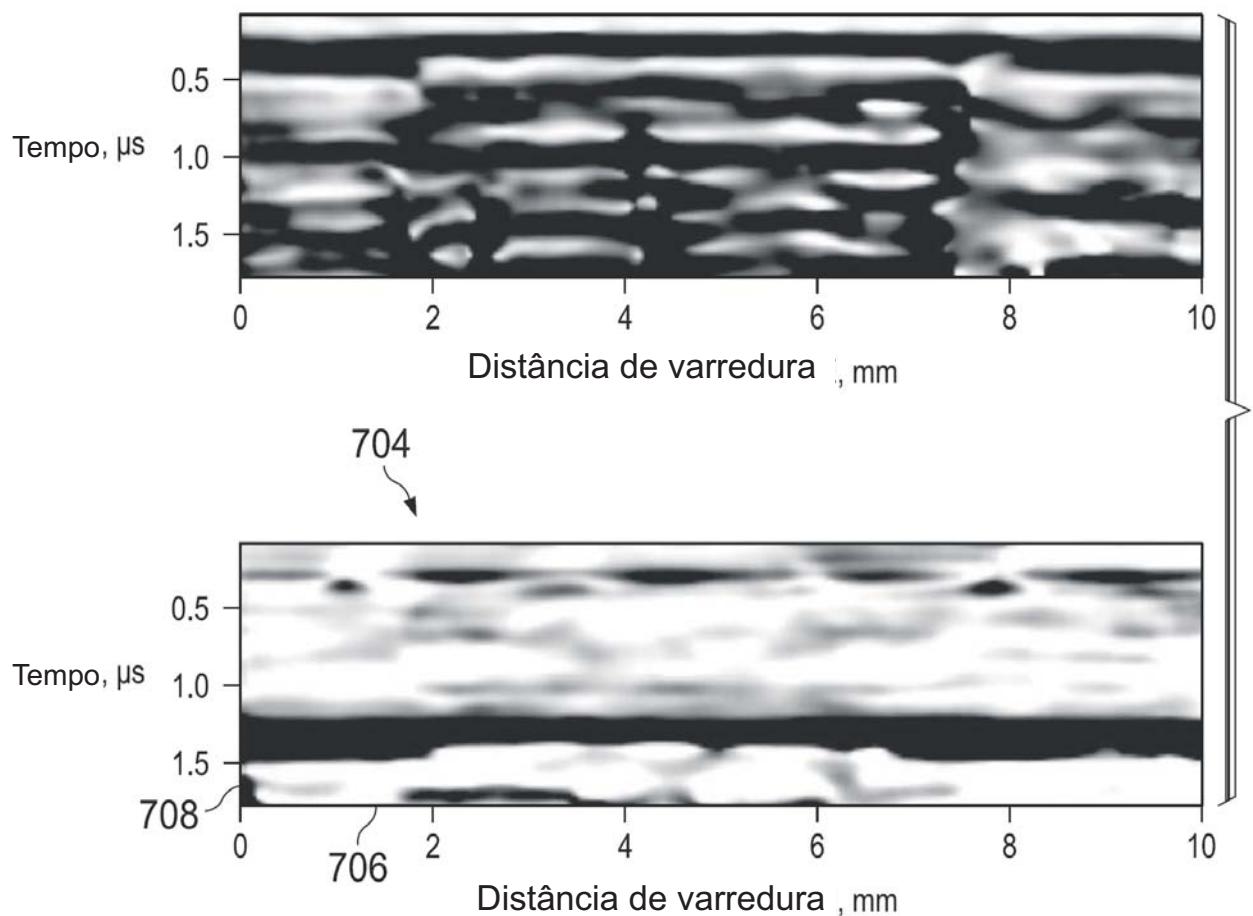
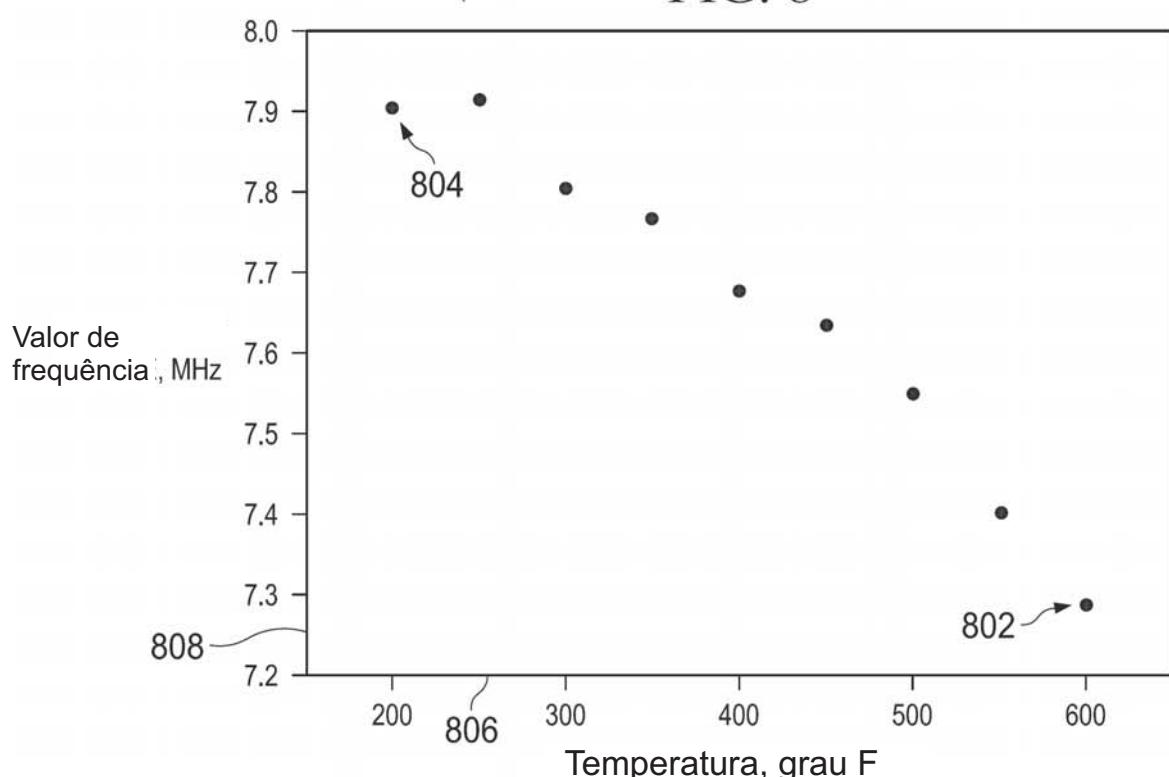


FIG. 8



900

Início

902 → Direcionar um feixe de laser pulsado em direção à estrutura composta compreendida por um número de materiais compostos, em que os sinais de ultrassom de banda larga são formados na estrutura composta quando a radiação do feixe de laser pulsado é absorvida pela estrutura composta

904 → Detectar os sinais ultrassônicos de banda larga para formar os dados

906 → Processar os dados para identificar um valor de frequência local para a estrutura composta

908 → Determinar se as alterações de material estão presentes no número de materiais compostos com o uso do valor de frequência local

Fim

FIG. 9

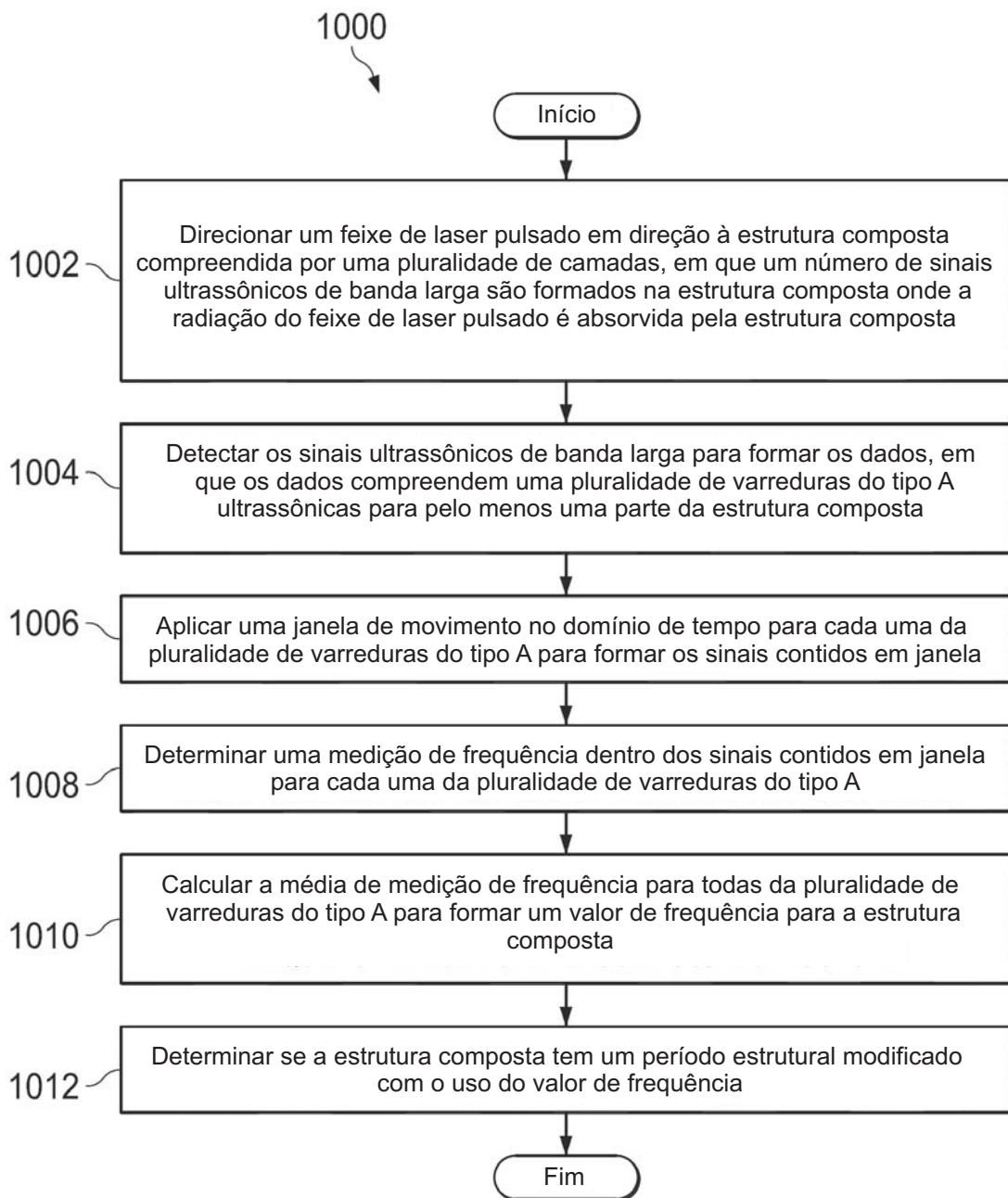


FIG. 10

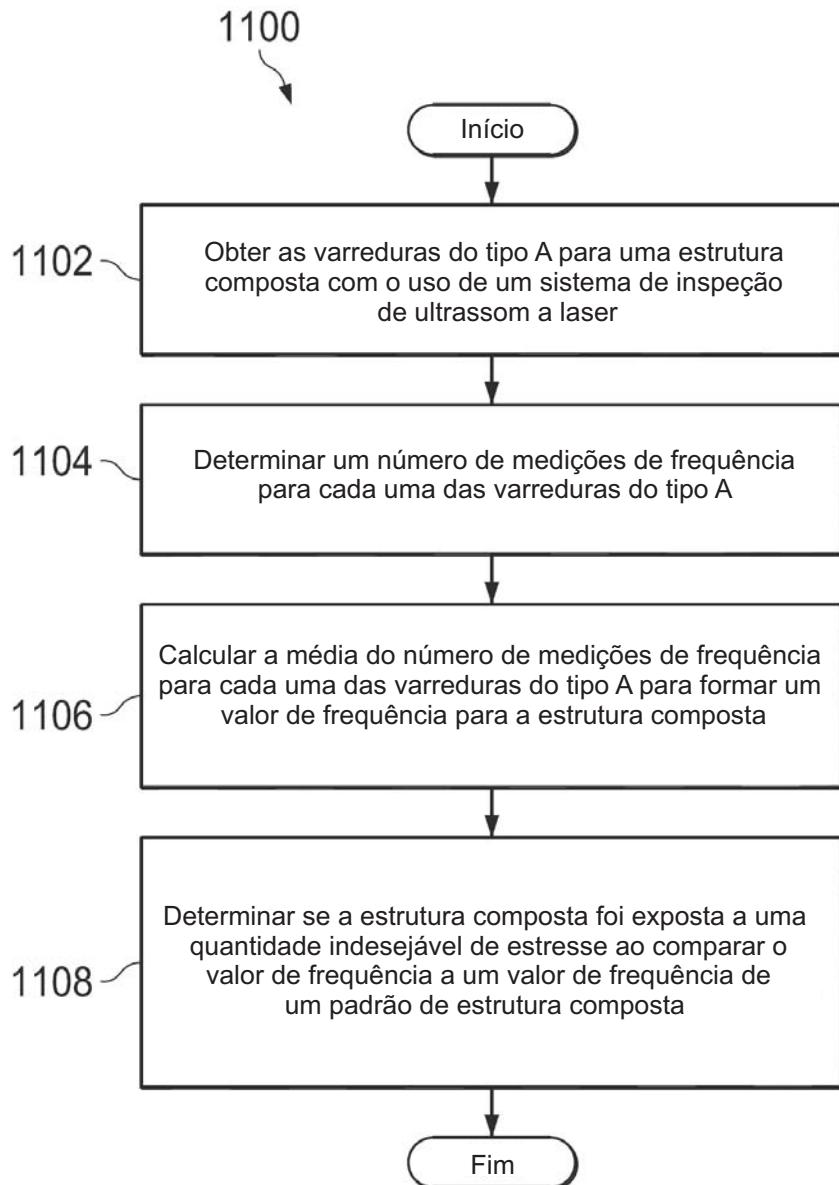


FIG. 11

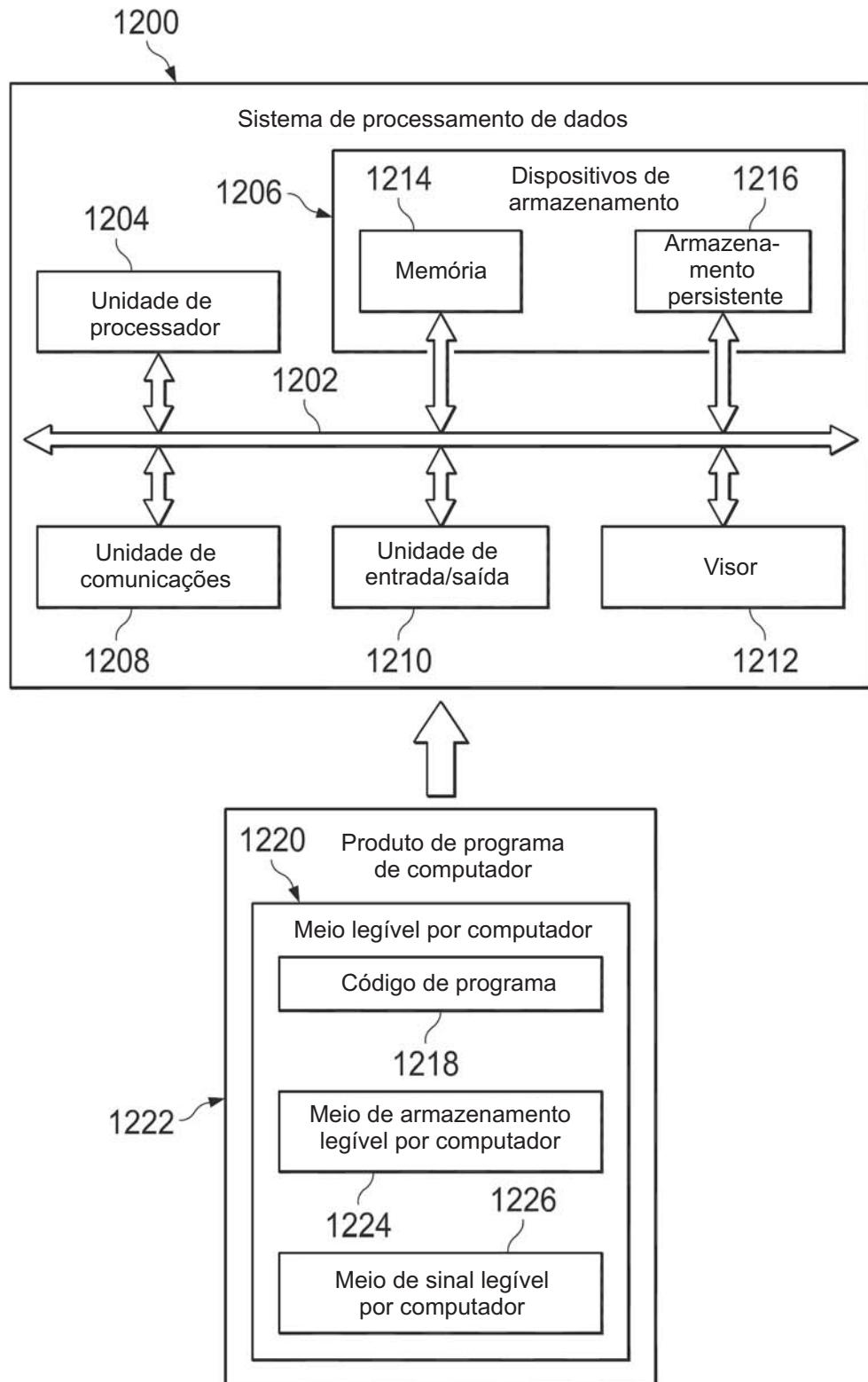


FIG. 12

12/12

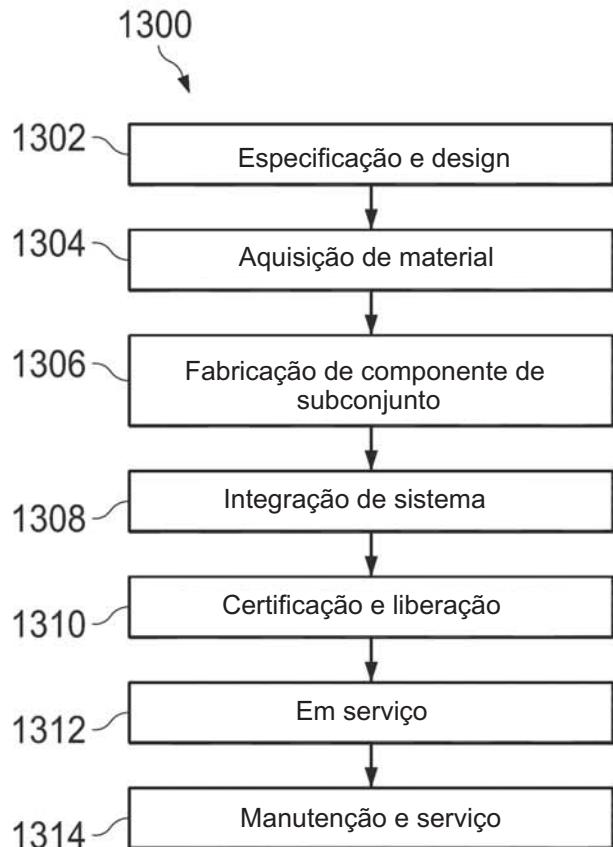


FIG. 13

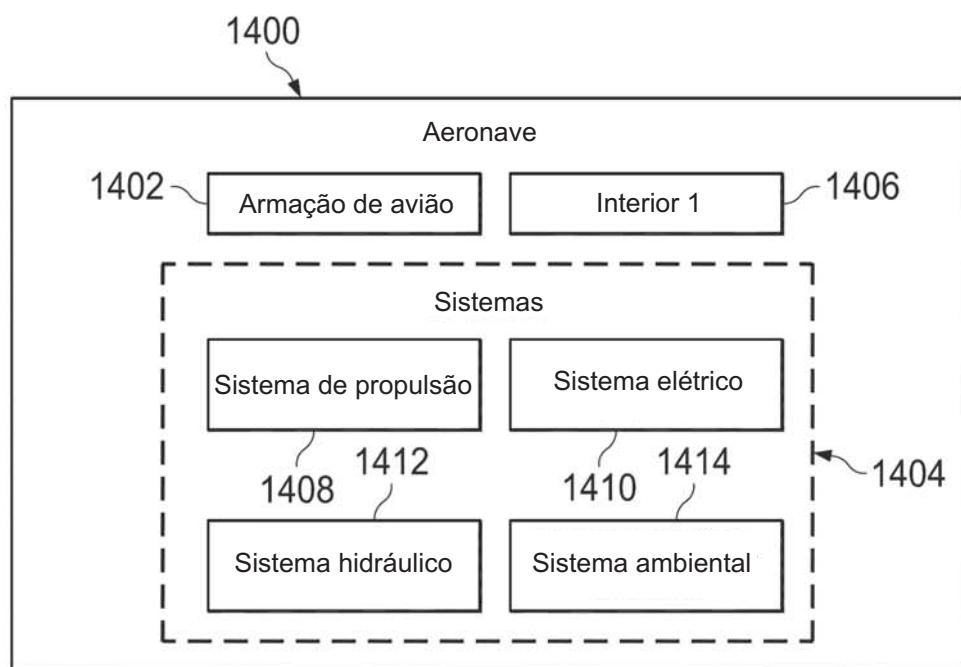


FIG. 14