



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

**(11) PI 0100222-8 B1**

**(22) Data do Depósito:** 31/01/2001

**(45) Data de Concessão:** 25/04/2017



---

**(54) Título:** MÉTODO E SISTEMA PARA MARTELADA DE IMPACTO DUPLO A LASER DE UM ARTIGO

**(51) Int.Cl.:** F01D 5/12

**(30) Prioridade Unionista:** 31/01/2000 US 09/494,715

**(73) Titular(es):** GENERAL ELECTRIC COMPANY

**(72) Inventor(es):** MICHAEL EVANS GRAHAM; JOHN DENNIS JACKSON

Relatório Descritivo da Patente de Invenção para "**MÉTODO E SISTEMA PARA MARTELADA DE IMPACTO DUPLO A LASER DE UM ARTIGO**".

Fundamento da Invenção

5 A invenção trata de um método e sistema para controlar a mar-  
telada de impacto duplo a laser de um artigo.

O motores de turbina a gás e em particular, os rotores de moto-  
res de turbina a gás de avião operam em altas velocidades rotacionais que  
produzem altos campos de tensão elástica e vibratória dentro da pá e tor-  
10 nam as pás da ventoinha suscetíveis a avarias por objeto estranho (FOD).  
As vibrações também podem ser causadas por sopro de ar das hélices e por  
distorções da tensão de entrada bem como por outros fenômenos aerodi-  
nâmicos. Esta FOD causa cortes e rasgos e por conseqüência concentra-  
ções de tensão nas beiras frontais e traseiras dos aerofólios da pá da vento-  
15 inha. Estes cortes e rasgos tornam-se a fonte das altas concentrações de  
tensão ou elevadores de tensão e de forma grave limitam a vida destas pás  
devido a Alta Fadiga de Ciclo (HCF) a partir das tensões vibratórias.

Portanto, é altamente desejável se projetar e construir ventoi-  
nhas e pás compressoras que durem mais tempo, bem como outras partes  
20 metálicas resistentes que estejam mais aptas a resistir a alto e baixo ciclo de  
fadiga e que possam deter rachaduras melhor do que as partes atuais. Os  
Pedidos de patente U.S. ou Patente U.S. referenciado abaixo estão direcio-  
nados para este fim: Pedido de Patente dos Estados Número de Série  
08/993.194, pendente, intitulado "Laser Shock Peening Using Low Energy La-  
25 ser"; 08/362.362, "On The Fly Laser Shock Peening", depositado em 22 de de-  
zembro de 1994, agora abandonado; e Pat. dos Estados Unidos Nº 5.591.009,  
intitulado "Laser Shock Peened Gás Turbine Enginer Fan Blade Edges"; Paten-  
te U.S. Nº 5.569.018, intitulada "Technique To Prevent Or Divert Cracks"; Pa-  
tente U.S. Nº 5.531.570, intitulada "Distortion Control For Laser Shock Peened  
30 Gas Turbine Engine Compressor Blade Edges"; Patente U.S. Nº 5.492.447,  
intitulada "Laser Shock Peened Rotor Components For Turbomachinery";  
Patente U.S. Nº 5.674.329, intitulada "Adhesive Tape Covered Laser Shock

Peening"; e Patente U.S. Nº 5.674.328, intitulada "Dry Tape Covered laser Shock Peening", todas as quais são designadas para o presente Cessionário. Cada uma delas proporciona um aerofólio de uma pá da ventoinha com uma região contínua ou volumétrica de tensões residuais compressivas profundas concedidas por martelada de impacto a laser sobre pelo menos uma peça se estendendo para o interior das superfícies marteladas por impacto de laser de um artigo, tal como a pá da ventoinha. Estas regiões são formadas por múltiplas protuberâncias sobrepondo-se de tensões residuais compressivas concedidas por martelada de impacto a laser que se estendem para o interior a partir dos círculos ou pontos martelados por impacto a laser.

As tensões residuais compressivas profundas concedidas pela martelada de impacto a laser da presente invenção não são para ser confundidas com a zona de camada de superfície de uma peça de trabalho que contém tensões residuais compressivas localmente limitadas que são induzidas por uma operação de endurecimento utilizando-se um feixe de laser para localmente aquecer e por meio disso endurecer a peça de trabalho tal como esta que é revelada na Patente U.S. Nº 5.235.838, intitulada "Method and Apparatus for truing ou straightening out of true work pieces". A técnica anterior ensina o uso de múltiplos pulsos de radiação a partir de laser pulsados de alta energia e de diâmetros grandes do ponto do laser de cerca de 1 cm para produzir ondas de impacto sobre a superfície de uma peça de trabalho similar aos Pedidos de Patente referenciados acima e a Patente U.S. Nº 3.850.698, intitulada "Altering Material Properties"; a Patente U.S. Nº 4.401.477, intitulada "Laser Shock processing"; e a Patente U.S. Nº 5.131.957, intitulada "Material Properties". A martelada de impacto a laser como entendido na técnica e como utilizado aqui dentro, significa utilizar um feixe de laser a partir de uma fonte de feixe de laser para produzir uma região contínua de tensões residuais compressivas fortes em uma região contínua sobre uma parte de uma superfície. A região é volumétrica e produzida pela coalescência de protuberâncias individuais se estendendo para o interior a partir dos círculos ou pontos martelados por impacto a laser sobrepondo-se. A martelada a laser tem sido utili-

zada para criar uma camada de proteção compressivamente tensionada na superfície externa de uma peça de trabalho, o que é conhecido como consideravelmente aumentando a resistência da peça de trabalho à falha de corrente da fadiga como revelado na patente U.S. Nº 4.937.421, intitulada "Laser Peening System and Method". Os custos de fabricação do processo de martelada por impacto a laser é uma grande área de interesse porque os custos de partida e operacionais podem ser muito altos. O processo de martelada de impacto a laser "em movimento" revelado na 08/362/362 acima é projetado para proporcionar métodos de economia de custos para a martelada de impacto a laser como é a presente invenção. A técnica anterior ensina a utilizar pontos de laser grandes, na ordem de 1 cm e maior em diâmetro e laser de alta energia. Os fabricantes estão constantemente buscando métodos para reduzir o tempo, custo e a complexidade de tais processos. Um método de martelada de impacto a laser que utilizar um feixe de laser de baixa energia, na ordem de 3 até 10 joules, com uma faixa preferida de 3 até 7 joules e os pontos de feixe de laser possuindo uma diâmetro de cerca de 1 mm é revelado no pedido de patente U.S. copendente Nº 08/993.194, intitulado "Laser Shock Peening Using low Energy Laser" e este método está direcionado para reduzir tempo, custo e a complexidade da martelada de impacto a laser. Existe um desejo sempre presente de se projetar técnicas que resultem em tais reduções e para este fim, a presente invenção está direcionada.

Como sugerido acima, as técnicas de martelada a laser da técnica anterior conhecidas têm estado somente preocupadas com o uso de um feixe de laser único que fulmine a superfície a ser martelada em uma posição designada, em um ângulo designado. Avanços recentes na tecnologia de martelada de impacto a laser podem requerer que o artigo seja simultaneamente fulminado em superfícies mutuamente opostas de modo que as respectivas ondas de impacto criadas pelos dois feixes de laser colidindo se encontrem no centro das superfícies opostas. Veja a Patente U.S. Nº 6.005.219, emitida para o mesmo Cessionário da presente invenção e incorporado pelo presente por referência. O uso de fabricação desta técnica de laser duplo

impõe uma necessidade de se desenvolver ferramentas programáveis, tal como as ferramentas de controle numérico (NC), que permitem o controle preciso, confiável e sem custos do processo de martelada a laser dupla. ▯

Portanto, é desejável estar apto a proporcionar um processo automatizado para desenvolver os comandos para controlar um dispositivo de martelada de impacto a laser duplo utilizando a tecnologia de posicionamento de peça NC atualmente disponível. É adicionalmente desejável estar apto a de forma precisa e rapidamente posicionar o artigo em relação aos feixes duplos de laser de modo que cada feixe de laser simultaneamente colida sobre um respectivo ponto situado em ambas das superfícies mutuamente opostas. Desde que os respectivos pontos que são simultaneamente fulminados pelos dois feixes de laser situam-se opostos um ao outro em superfícies mutuamente opostas do artigo, também é desejável estar apto a determinar a localização precisa dos pontos nos quais os feixes devem colidir com o artigo para alcançar a cobertura de superfície desejada e tensões residuais compressivas fortes. Como sugerido acima, também seria desejável estar apto a determinar a estratégia de comando, por exemplo, comandos NC, a ser programada dentro do dispositivo de posicionamento do artigo para de forma tridimensional alinhar o artigo com as localizações espaciais que alcançam a cobertura apropriada.

#### Breve Sumário da Invenção

Geralmente falando, a presente invenção satisfaz as necessidades anteriores por proporcionar um método para se martelar por impacto a laser um artigo. O método permite definir um padrão de ponto compreendendo uma pluralidade de pontos em uma primeira superfície do artigo a ser martelado. O método adicionalmente permite definir um padrão de ponto compreendendo uma pluralidade de pontos em uma segunda superfície do artigo a ser martelado. As primeira e segunda superfícies compreendem superfícies mutuamente opostas em relação uma a outra. Cada um dos respectivos pontos na segunda superfície está disposto para corresponder a um respectivo ponto na primeira superfície e compreendendo uma pluralidade de pares combinados de pontos. Uma etapa de geração permite a ge-

ração de feixes de laser duplos sendo respectivamente alinhados para simultaneamente colidir sobre cada respectivo par combinado de pontos.

Em outro aspecto da invenção, as necessidades citadas anteriormente são adicionalmente satisfeitas por se proporcionar um sistema para a martelada de impacto a laser dupla em um artigo. O sistema compreende um gerador de padrão de ponto para definir um padrão de ponto compreendendo uma pluralidade de pontos em uma primeira superfície do artigo a ser martelado. O gerador de padrão adicionalmente define um padrão de ponto compreendendo uma pluralidade de pontos em uma segunda superfície do artigo a ser martelado. As primeira e segunda superfícies compreendem superfícies mutuamente opostas em relação uma a outra. Adicionalmente, cada um dos respectivos pontos na segunda superfície está disposto para corresponder a um respectivo ponto na primeira superfície e compreende uma pluralidade de pares combinados de pontos. Uma unidade de laser permite a geração de feixes de laser duplos que são respectivamente alinhados para simultaneamente colidir sobre cada respectivo par combinado de pontos.

#### Breve Descrição dos Desenhos

Os aspectos e vantagens da presente invenção irão se tornar aparentes a partir da descrição detalhada da invenção seguinte quando lida com os desenhos acompanhantes, nos quais:

A FIG. 1 é uma vista ilustrativa em perspectiva de um artigo exemplar, isto é, uma pá da ventoinha do motor de turbina a gás do avião, que pode ser martelada por impacto de laser utilizando o método e sistema da presente invenção;

A FIG. 2 é uma vista ilustrativa em perspectiva de outra pá da ventoinha do motor de turbina a gás do avião que pode ser martelada por impacto de laser utilizando o método e o sistema da presente invenção;

A FIG. 3 é uma vista em seção transversal através da pá da ventoinha tomada ao longo da linha 3-3 como ilustrado na FIG. 2;

A FIG. 4 é um fluxograma de uma modalidade exemplar do método da presente invenção que permite a determinação da localização dos

pontos nos quais os respectivos feixes de laser duplo colidem com as superfícies mutuamente opostas do artigo a ser martelado por impacto de laser;

5 A FIG. 5 é um fluxograma ilustrando detalhes adicionais com respeito aos padrões de ponto exemplares, por exemplo pontos que se sobrepõem, que podem ser gerados pelo método da presente invenção;

A FIG. 6 é um fluxograma ilustrando as etapas para garantir a cobertura da superfície apropriada do artigo a ser martelado por impacto de laser;

10 A FIG. 7 é um fluxograma que proporciona detalhes para selecionar de forma controlada o nível de sobreposição entre os pontos adjacentes;

A FIG. 8 é uma vista plana de um padrão de ponto exemplar que pode ser gerado pelo método da presente invenção;

15 A FIG. 9 é uma vista elevada do artigo a ser martelado por impacto de laser que ilustra as relações geométricas entre um par combinado de pontos a ser fulminado pelos feixes de laser duplos;

A FIG. 10 é uma vista em perspectiva ilustrando as relações geométricas para de forma controlada selecionar o nível de sobreposição entre os pontos adjacentes;

20 A FIG. 11 é um fluxograma utilizado para ilustrar as etapas que permitem alinhar de forma tridimensional o artigo em relação ao feixes a laser duplos;

A FIG. 12 é uma vista elevada do artigo a ser martelado por impacto de laser que ilustra as relações geométricas para definir um vetor de alinhamento do artigo e um plano de trabalho do artigo;

25 A FIG. 13 é uma disposição dos feixes de laser duplos exemplares que ilustra as relações geométricas para definir um vetor de alinhamento do laser e um plano de trabalho do laser;

A FIG. 14 é uma vista elevada que resulta da combinação das FIGS. 12 e 13 quando do alinhamento tridimensional em relação uma a outra;

30 A FIG. 15 é uma vista em perspectiva esquemática da ventoinha da FIG. 1 revestida e montada em um sistema de martelada por impacto de laser para implementar o método da presente invenção; e

A FIG. 16 é uma vista em seção transversal parcial e esquemática parcial da configuração da FIG. 15

#### Descrição Detalhada da Invenção

Ilustrada nas FIGS. 1, 2 e 3 está uma pá de ventoinha 8 possuindo um aerofólio 34 feito de liga de titânio se estendendo radialmente para o exterior a partir de uma plataforma da pá 36 até uma ponta da pá 38. Isto é representativo do tipo de peça metálica dura e do material para os quais o método e sistema de presente invenção foram desenvolvidos. A pá da ventoinha 8 inclui uma seção de raiz 40 se estendendo radialmente para o interior a partir da plataforma 36 até uma extremidade radialmente para o interior 37 da seção de raiz 40. Na extremidade radialmente para o interior 37 da seção de raiz 40 está uma raiz da pá 42 que está conectada com a plataforma 36 por uma haste da pá 44. O aerofólio 34 se estende na direção da corda entre uma beira guia LE e uma beira traseira TE do aerofólio. Uma corda C do aerofólio 34 é a linha entre a beira dianteira LE e a beira traseira TE em cada seção transversal da pá como ilustrado na FIG. 2. Um lado de pressão 46 do aerofólio 34 defronta-se na direção geral de rotação como indicado pela seta e um lado de sucção 48 está no outro lado do aerofólio e uma linha média ML geralmente está disposta no meio do caminho entre as duas faces na direção da corda.

A pá da ventoinha 8 possui uma seção de beira dianteira 50 que se estende ao longo da beira dianteira LE do aerofólio 34 a partir da plataforma da pá 36 até a ponta da pá 38. A seção da beira dianteira 50 inclui uma primeira largura predeterminada W1 de modo que a seção da beira dianteira 50 abrange os cortes 52 e os rasgos que podem ocorrer ao longo da beira dianteira do aerofólio 34. O aerofólio 34 pode estar sujeito a um campo de tensão elástico significativo devido às forças centrífugas geradas pela pá da ventoinha 8 girando durante a operação do motor. O aerofólio 34 pode também estar sujeito a vibrações geradas durante a operação do motor e os cortes 52 e rasgos operam como elevadores de tensão de alta fadiga de ciclo produzindo concentrações de tensão adicionais ao redor dos mesmos.

Para opor-se à falha por fadiga das peças da pá ao longo de

linhas de rachaduras possíveis que podem se desenvolver e se emanar a partir de rachaduras ou microrachaduras, cortes e rasgos incipientes, as primeira e segunda superfícies ou lados mutuamente opostos do artigo, tal como o lado de sucção 46 e o lado de tensão 48 possuem uma respectiva  
5 área de superfície martelada por impacto de laser 54 com os conjuntos 56 de protuberâncias marteladas por choque a laser ser pré-tensionadas que se sobrepõem volumetricamente ou pontos possuindo tensões residuais compressivas profundas concedidas pelo método e sistema de martelada por impacto de laser (LSP) da presente invenção.

10 A FIG. 4 apresenta um fluxograma de uma modalidade exemplar do método 100 da presente invenção que permite determinar a localização exata dos pontos nos quais os respectivos feixes duplos devem colidir com as superfícies mutuamente opostas do artigo a ser martelado com impacto de laser (LSP). Subseqüente à etapa inicial 102, a etapa 104 permite definir  
15 um padrão de ponto compreendendo uma pluralidade de pontos em uma primeira superfície do artigo, por exemplo, uma superfície convexa em relação a um feixe de laser colidindo. A etapa 106 permite definir um padrão de ponto compreendendo uma pluralidade de pontos em uma segunda superfície do artigo, por exemplo, uma superfície côncava em relação ao outro feixe de laser colidindo. Como sugerido acima, as primeira e segunda superfícies (por exemplo, as superfícies 46 e 48 (FIG. 1)) compreendem superfícies mutuamente opostas em relação uma a outra. Adicionalmente, cada um dos  
20 pontos na segunda superfície está disposto para corresponder com um respectivo ponto na primeira superfície de modo a caracterizar uma pluralidade de pares de pontos combinados. Antes de retornar à etapa 110, a etapa 108 permite gerar feixes de laser duplos respectivamente alinhados para simultaneamente colidir sobre cada respectivo par de pontos combinados.

A FIG. 5 apresenta um fluxograma ilustrando detalhes adicionais em conexão com o padrão de ponto que pode ser gerado pelo método 100.  
30 Subseqüente à etapa inicial 112, a etapa 114 permite proporcionar um padrão de ponto sobre a primeira superfície, padrão este que é caracterizado por uma pluralidade de pontos que se sobrepõe. Um exemplo de tal padrão

de ponto que se sobrepõem é apresentado na FIG. 8. A etapa 116 permite seletivamente controlar o nível de sobreposição entre os pontos adjacentes. Como declarado no bloco 118 e apresentado na FIG. 9, cada par de pontos combinado está situado em relação ao outro de modo que uma linha se estendendo normal ao ponto na primeira superfície (por exemplo, superfície 48) cruza uma linha se estendendo normal relativa ao ponto na segunda superfície (por exemplo, superfície 46). A interseção das duas linhas normais ocorre em um ponto (por exemplo, ponto *o*) equidistante de cada ponto. A geometria descrita acima é melhor apreciada na FIG. 9, onde os caminhos do feixe de laser Aa e Bb são assumidos como sendo co-planares e é adicionalmente assumido que tais caminhos são mantidos em uma posição fixa e em um ângulo fixo ao mesmo tempo que simultaneamente colidindo com um respectivo par de pontos combinados. Os pontos a e b respectivamente correspondem às localizações do ponto no artigo onde os feixes de laser irão colidir com a superfície do artigo. Mais particularmente, os pontos a e b correspondem aos respectivos centros dos pontos situados nas respectivas superfícies mutuamente opostas do artigo a ser LSP. Portanto, como apresentado na FIG. 9, a distância entre o segmento de linha ao e o segmento de linha bo é idêntica uma com a outra. Adicionalmente, o segmento de linha ao é perpendicular ao centro do ponto na primeira superfície 46 do artigo 54. De forma similar, o segmento de linha bo é perpendicular ao centro do ponto na segunda superfície 48 do artigo 54.

A FIG. 6 é um fluxograma que proporciona detalhes adicionais com respeito à outra modalidade do método 100 que garante que a pluralidade de pares de pontos combinados completamente cobrem as superfícies que são requeridas para ser LSP. Subseqüente a uma etapa inicial 122, a etapa 124 permite definir uma pluralidade de curvas, tais como as curvas 59 na FIG. 10, respectivamente atravessando a primeira superfície 46 do artigo, por exemplo, a superfície convexa, geralmente perpendicular a um eixo longitudinal (por exemplo, o eixo 60 (FIG. 10)) do artigo. A etapa 126 permite selecionar a separação entre as curvas adjacentes para não serem maiores do que um espaçamento de centro para centro desejado entre os pontos

adjacentes ao longo do eixo longitudinal. Antes de retornar para a etapa 130 e como indicado no bloco 128, a separação selecionada entre as curvas adjacentes determina o nível de sobreposição dos pontos ao longo do eixo longitudinal e é representada pelas setas verticais 64 na FIG. 10.

5 A FIG. 7 apresenta um fluxograma que permite selecionar o nível de sobreposição do ponto ao longo do eixo geralmente perpendicular ao eixo longitudinal do artigo (por exemplo, eixo 62 na FIG. 10). Subseqüente à etapa inicial 132, a etapa 134 permite definir uma pluralidade de pontos, tais como os pontos 66 na FIG. 10, ao longo de cada uma das respectivas curvas. A separação entre os pontos adjacentes é selecionada para não ser maior do que um espaçamento de centro para centro desejado entre os pontos adjacentes ao longo do eixo geralmente perpendicular ao eixo longitudinal do artigo. Antes de retornar para a etapa 138 e como indicado no bloco 136, a separação selecionada entre os pontos adjacentes determina o nível de sobreposição do ponto ao longo do eixo geralmente perpendicular ao eixo longitudinal e tal separação do ponto é representada pelas setas horizontais 68 na FIG. 10.

A FIG. 11 apresenta um fluxograma que permite determinar os comandos NC que são programados dentro de um dispositivo de posicionamento do artigo para seqüencialmente mover o artigo a ser LSP para as localizações precisas de modo a alcançar o alinhamento tridimensional entre os feixes de laser duplos e cada respectivo par de pontos combinado. Subseqüente à etapa inicial 140, a etapa 142 permite definir um vetor de alinhamento do artigo e um plano de trabalho do artigo ao longo do qual o vetor de alinhamento do artigo é situado. O vetor de alinhamento do artigo e o plano de trabalho do artigo podem ser definidos dentro de um modelo de Projeto Auxiliado Por Computador (CAD) adequado do artigo 54 como ilustrado na FIG. 12. A título de exemplo e não de limitação, o segmento de linha entre os dois pontos do artigo  $a$  e  $b$  é primeiro definido. Um ponto central do segmento de linha é então definido, por exemplo, o ponto central  $c$  que está eqüidistante dos pontos  $a$  e  $b$ . Um vetor  $\underline{CD}$  se estende a partir do ponto  $c$  de modo que o vetor  $\underline{CD}$  está normal em relação ao segmento de

linha ab. Nesta ilustração, o vetor CD compreende o vetor de alinhamento do artigo e os pontos a, b e o vetor de alinhamento do artigo CD definem o plano de trabalho do artigo.

5 A etapa 144 permite definir um vetor de alinhamento do laser e um plano de trabalho do laser ao longo do qual o vetor de alinhamento do laser está situado. Para definir o vetor de alinhamento do laser e o plano de trabalho do laser, assume-se uma disposição de feixe de laser duplo fixa, como apresentado na FIG. 13. É adicionalmente assumido que os feixes de laser duplos A e B se cruzam em um ponto conhecido p em um ângulo fixo conhecido gps. Para definir o vetor de alinhamento do laser, um segmento de linha pr que divide ao meio o ângulo gps é estendido entre os feixes de laser duplo A e B. Neste caso, o segmento de linha pr compreende o vetor de alinhamento do laser e o plano de trabalho do laser é definido pelo plano comum compartilhado pelos feixes de laser duplos A e B e pelo vetor de alinhamento do laser pr.

15 A etapa 146 permite executar a rotação relativa entre o plano de trabalho do artigo e o plano de trabalho do laser para proporcionar o alinhamento paralelo entre o plano de trabalho do artigo e o plano de trabalho do laser. A etapa 148 permite executar a rotação relativa entre o vetor de alinhamento da peça e o vetor de alinhamento do laser para proporcionar o alinhamento paralelo entre tais vetores. Antes de retornar para a etapa 152, a etapa 150, que é alcançada através de um nó de conexão A, permite executar o movimento de translação relativo entre o artigo e os feixes de laser duplo de modo que um dos feixes de laser coincide com o centro do ponto na primeira superfície do artigo e o outro dos feixes de laser coincide com o centro do ponto na segunda superfície a ser LSP.

20 Será apreciado por aqueles versados na técnica que técnicas de controle NC tradicionais poderiam somente requerer o alinhamento do vetor de alinhamento do artigo com um único vetor de alinhamento do eixo da ferramenta. Entretanto, será adicionalmente apreciado que tal técnica tradicional não iria trabalhar em um caso que requeria controle simultâneo de um feixe de laser duplo. Portanto, esta invenção reconheceu a necessi-

dade de se executar um alinhamento adicional, a saber, o alinhamento entre o plano de trabalho do artigo e o plano de trabalho do laser. A disposição de alinhamento descrita acima é ilustrada na FIG. 15, onde o vetor de alinhamento do laser e o vetor de alinhamento do artigo estão alinhados para compartilhar um plano de trabalho comum de modo que as linhas centrais dos feixes de laser duplos A e B, respectivamente, passam através dos pontos a e b, os quais correspondem ao centro dos pontos nas superfícies mutuamente opostas a serem LSP.

Referindo-se às FIGS 15 e 16, as tensões residuais compressivas profundas induzidas pelo impacto do feixe de laser são produzidas por repetidamente disparar dois feixes de laser 2, cada um dos quais é desfocado mais/menos uns poucos mils com respeito às superfícies 54 em ambos os lados da beira dianteira LE que pode ser coberta com qualquer revestimento ablativo 55. O feixe de laser de preferência é disparado através de uma cortina de água fluente que é fluida sobre a superfície revestida martelada por impacto de laser 54. A tinta, fita ou outro revestimento ablativo 55 é plasma de geração removido por ablação que resulta em ondas de impacto sobre a superfície do material. Outros materiais ablativos podem ser utilizados para revestir a superfície como alternativas adequadas à pintura. Estes materiais de revestimento incluem lâminas metálicas ou fitas plásticas adesivas como revelado na Patente U.S. Nº 5.674.329 e 5.674.328. Estas ondas de impacto são redirecionadas em direção à superfície revestida pela cortina de água fluindo para gerar ondas de impacto viajando (ondas de pressão) no material abaixo da superfície revestida. A amplitude e a quantidade destas ondas de impacto determinam a profundidade e a intensidade das tensões compressivas. O revestimento ablativo é utilizado para proteger a superfície alvo e também para gerar plasma.

Ilustrado nas FIGS. 15 e 16 está um sistema 1 que possui a pá 8 montada em um braço de robô convencionalmente bem conhecido 27 utilizado para continuamente mover e posicionar a pá para proporcionar a martelada por impacto de laser "em movimento" de acordo com uma modalidade da presente invenção. O braço robô 27 é responsivo ao movimento

rotacional e/ou linear concedido por servomotores adequados 94 que são por sua vez responsivos aos comandos adequados a partir de um controlador 92, por exemplo, um dispositivo NC, que pode ser programado para implementar as etapas de alinhamento discutidas no contexto das FIGS. 11 até 14. Um gerador de padrão de ponto 90 pode ser adicionalmente programado para implementar as etapas de definição do padrão de ponto discutidas no contexto das FIGS. 4 até 10. Será apreciado que a programação acima pode ser implementada utilizando técnicas de programação que são bem conhecidas e são bem entendidas por pessoas de conhecimento normal na técnica.

As superfícies marteladas por impacto de laser 54 em ambos os lados de pressão e de sucção 46 e 48, respectivamente, da beira dianteira LE são revestidas com o revestimento ablativo 55. Então, a pá 8 é continuamente movida ao mesmo tempo que continuamente se disparando os feixes de laser estacionários 2 através de uma cortina de água fluente 21 sobre as superfícies 54 e formando os pontos circulares martelados por impacto de laser que se sobrepõem de forma controlada 58. A cortina de água 21 é ilustrada como sendo fornecida por um esguicho de água convencional 23 na extremidade de um tubo de suprimento de água convencional 19. O sistema de martelada por impacto de laser 1 possui um gerador convencional 31 com um oscilador 33 e com um pré-amplificador 39A e um divisor de feixe 43 que alimenta o feixe de laser pré-amplificado dentro de dois circuitos óticos de transmissão de feixe, cada um possuindo um primeiro e um segundo amplificador 39 e 41, respectivamente, e os componentes óticos 35 que incluem os elementos óticos que transmitem e focalizam o feixe de laser 2 sobre as superfícies marteladas por impacto de laser 54. Um controlador 24 pode ser utilizado para modular e controlar o aparelho de feixe de laser 1 para disparar os feixes de laser 2 sobre as superfícies marteladas por impacto de laser 54 de uma maneira controlada. O material de revestimento é retirado pela cortina de água fluente.

O laser pode ser disparado seqüencialmente "em movimento" de modo que a superfície martelada por impacto do laser 54 é martelada por

impacto de laser com mais do que uma seqüência de revestimento da superfície e então de martelada de impacto de laser na superfície ao mesmo tempo que continuamente efetuando o movimento entre o aerofólio 34 da pá 8 e os feixes de laser 2 como ilustrado nas FIGS. 15 e 16. Na modalidade 5 ilustrativa aqui dentro, o aerofólio 34 é movido ao mesmo tempo que continuamente disparando-se os feixes de laser 2 sobre as superfícies 54, de modo que os respectivos pares de pontos circulares combinados são simultaneamente colididos pelos feixes de laser duplos. A seqüência de revestimento e de martelada por impacto de laser pode ser repetida várias vezes para ser 10 atingir uma resistência desejada das tensões residuais compressivas e profundidade das protuberâncias marteladas por impacto de laser 53.

Será apreciado por aqueles versados na técnica que o método pode ser adaptado de modo que somente o revestimento virgem ou próximo de virgem seja ablado sem qualquer efeito apreciável ou dano sobre a superfície do aerofólio. Isto é para impedir até mesmo defeitos ou refusões 15 menores devido ao laser que pode de outro modo causar efeitos aerodinâmicos indesejados sobre a operação da pá. Várias seqüências podem ser requeridas para cobrir todo o padrão e o novo revestimento das superfícies marteladas por impacto de laser 54 é feito entre cada seqüência de disparos de laser onde cada par de ponto é atingido várias vezes. O disparado do 20 laser possui múltiplos disparos ou pulsos de laser com um período entre os disparos que freqüentemente é referido como um "rep". Durante o rep, a peça é movida de modo que o próximo pulso ocorre na localização do próximo par de pontos circulares martelados por impacto de laser. De preferência, a peça é continuamente movida e cronometrada para estar na localização 25 apropriada no disparo ou pulso do feixe de laser. Uma ou mais repetições da seqüência podem ser utilizadas para atingir cada par de pontos circulares martelados por impacto de laser mais do que uma vez. Isto também pode permitir que menos energia do laser seja utilizada em cada disparo ou pulso do laser. 30

Apesar das modalidades preferidas da presente invenção terem sido apresentadas e descritas aqui dentro, será óbvio que tais modalidades

são proporcionadas a título somente de exemplo. Numerosas variações, alterações e substituições irão ocorrer para aqueles versados na técnica sem sair da invenção inclusa. Por conseqüência, é pretendido que a invenção somente seja limitada pelo espírito e pelo escopo das reivindicações anexas.

## REIVINDICAÇÕES

1. Método para martelada de impacto por laser duplo de um artigo, o método compreendendo:

5 definir um padrão de pontos (104) compreendendo uma pluralidade de pontos em uma primeira superfície (46) do artigo a ser martelado;

10 definir um padrão de pontos (106) compreendendo uma pluralidade de pontos em uma segunda superfície (48) do artigo a ser martelado, as primeira e segunda superfícies compreendendo superfícies mutuamente opostas em relação uma a outra, cada um dos respectivos pontos na segunda superfície estando dispostos para corresponder a um respectivo ponto na primeira superfície e compreendendo uma pluralidade de pares de pontos correspondentes; e

gerar (108) feixes de laser duplos estando respectivamente alinhados para simultaneamente colidir em cada respectivo par de pontos correspondentes;

15 **CARACTERIZADO** pelo fato de que um alinhamento tridimensional dos feixes de lasers duplos em relação ao artigo compreende ainda as etapas de:

definir um vetor de alinhamento do artigo (142) e um plano de trabalho do artigo ao longo do qual o vetor de alinhamento do artigo está situado;

definir um vetor de alinhamento do laser (144) e um plano de trabalho do laser ao longo do qual o vetor de alinhamento do laser está situado;

20 executar o movimento de rotação relativa entre o plano de trabalho do artigo e o plano de trabalho do laser para prover alinhamento paralelo entre o vetor de alinhamento do artigo e o vetor de alinhamento do laser; e

25 executar o movimento de translação relativo (150) entre o artigo e os feixes de laser duplos, de modo que um dos feixes de laser coincida com o ponto central do ponto na primeira superfície (46) e o outro dos feixes de laser coincida com o ponto central do ponto na segunda superfície (48).

2. Método, de acordo com a reivindicação 1, **CARACTERIZADO** pelo fato de que a primeira superfície compreende uma superfície convexa (46).

30 3. Método, de acordo com a reivindicação 1 ou 2, **CARACTERIZADO** pelo fato de que o padrão de pontos na primeira superfície (46) compreende uma pluralidade de pontos que se sobrepõem.

4. Método, de acordo com a reivindicação 3, **CARACTERIZADO** pelo fato de compreender ainda, uma etapa de seletivamente controlar (116) o nível de sobreposição entre pontos adjacentes.

5. Metodo, de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 4, **CARACTERIZADO** pelo fato de que a segunda superfície compreende uma superfície côncava (48).

5 6. Aparelho para martelar por impacto de laser duplo um artigo, compreendendo:

um gerador de padrão de pontos (90) para definir um padrão de pontos compreendendo uma pluralidade de pontos em uma primeira superfície (46) do artigo a ser martelado, o gerador de padrão adicionalmente definindo um padrão de pontos compreendendo uma pluralidade de pontos em uma segunda superfície (48) do artigo a ser martelado, as primeira e segunda superfícies (46, 48) compreendendo superfícies mutuamente opostas em relação uma a outra, cada um dos respectivos pontos na segunda superfície sendo disposto para corresponder com um respectivo ponto na primeira superfície e compreendendo uma pluralidade de pares de pontos correspondentes; e

15 uma unidade de laser (31) para gerar feixes de laser duplos sendo respectivamente alinhados para simultaneamente colidir sobre cada um dos pares de pontos correspondentes;

**CARACTERIZADO** pelo fato de que um alinhamento tridimensional dos feixes de laser duplos em relação ao artigo é realizado mediante um processador que compreende:

um módulo para definir um vetor de alinhamento do artigo (142) e um plano de trabalho do artigo ao longo do qual o vetor de alinhamento do artigo está situado;

um módulo para definir um vetor de alinhamento do laser (144) e um plano de trabalho do laser ao longo do qual o vetor de alinhamento do laser está situado;

25 um módulo para executar a rotação relativa (146) entre o plano de trabalho do artigo e o plano de trabalho do laser para proporcionar alinhamento paralelo entre o vetor de alinhamento de artigo (142) e o vetor de alinhamento do laser (144); e

um módulo para executar o movimento de translação relativo (150) entre o artigo e os feixes de laser duplos de modo que um dos feixes de laser coincida com o ponto central do ponto na primeira superfície (46) e o outro dos feixes de laser coincida com o ponto central do ponto na segunda superfície (48).

7. Aparelho de acordo com a reivindicação 6, **CARACTERIZADO** pelo fato de compreender ainda um módulo de controle de sobreposição (116) para seletivamente controlar o nível de sobreposição entre pontos adjacentes.



FIG. 4

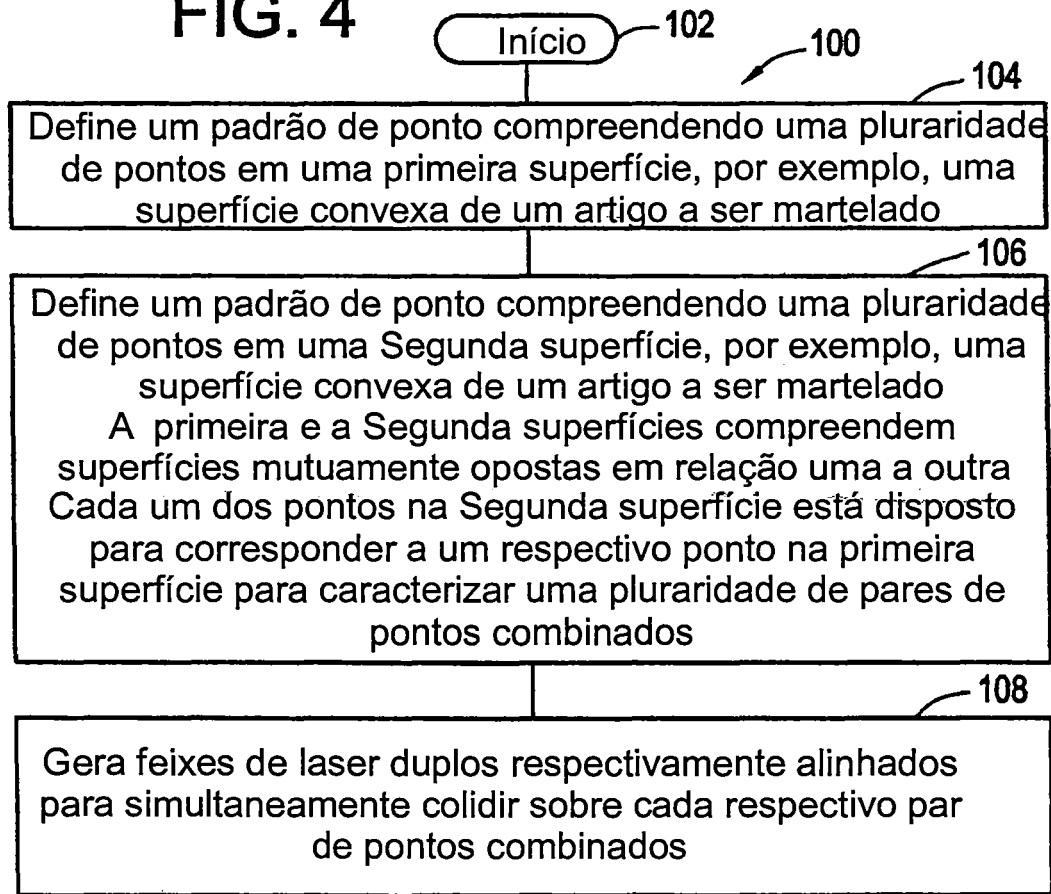


FIG. 5

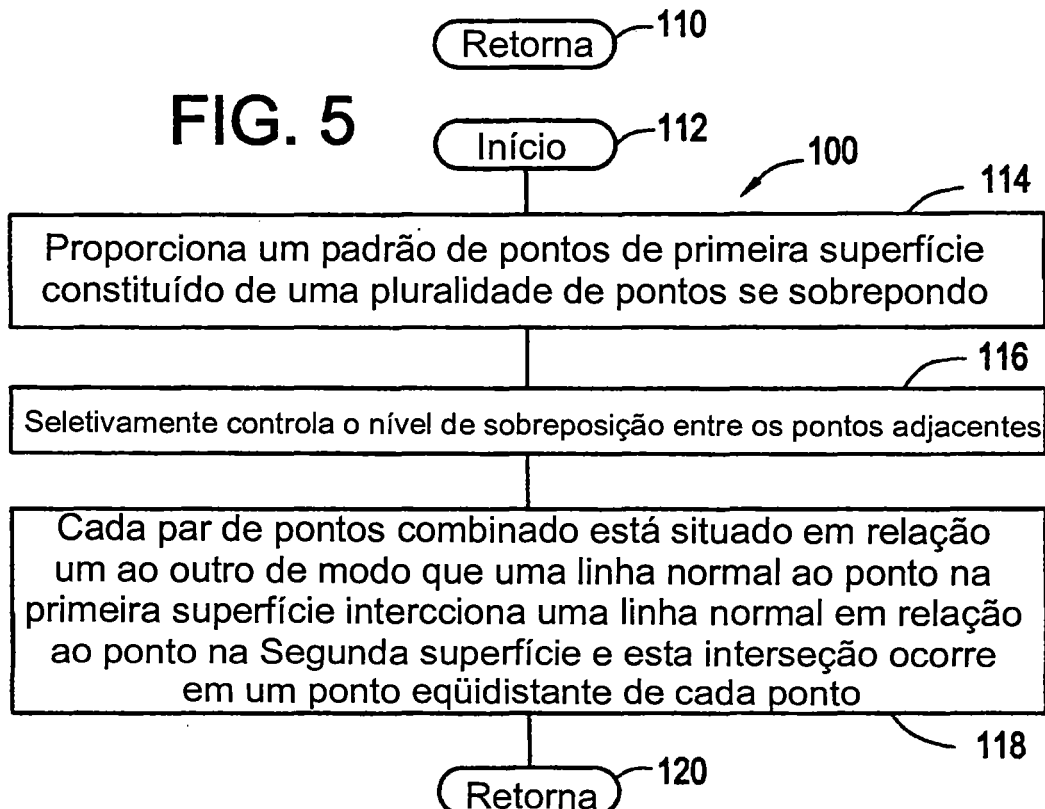


FIG. 6

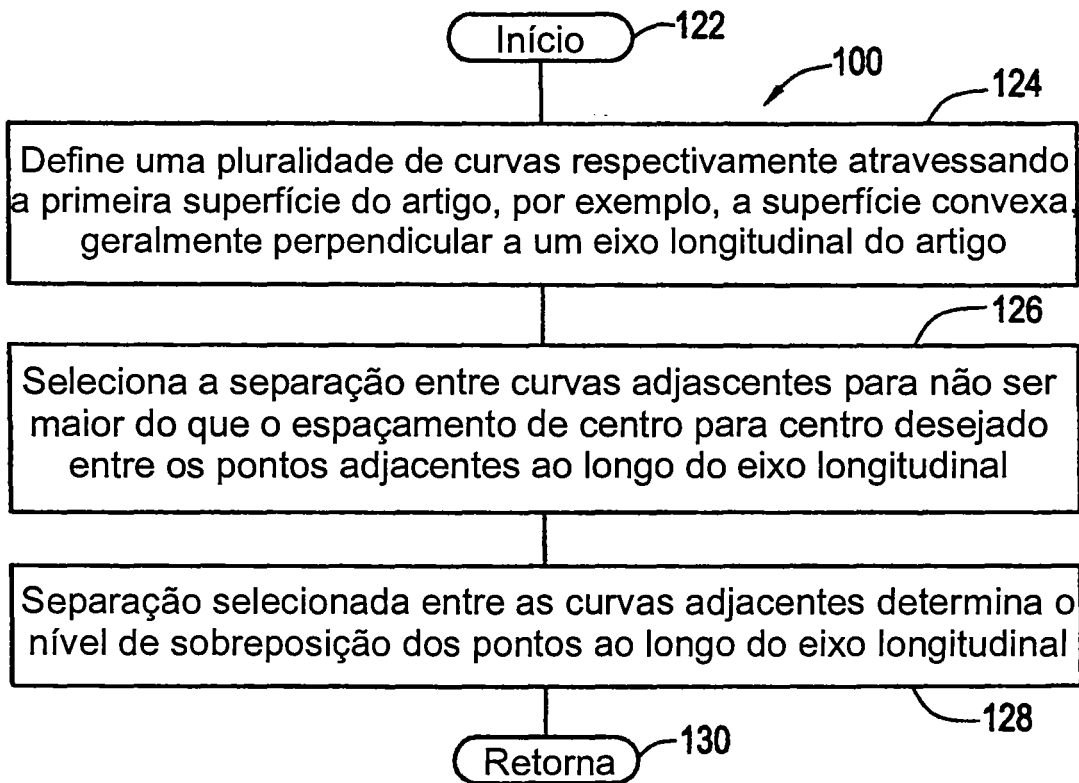


FIG. 7

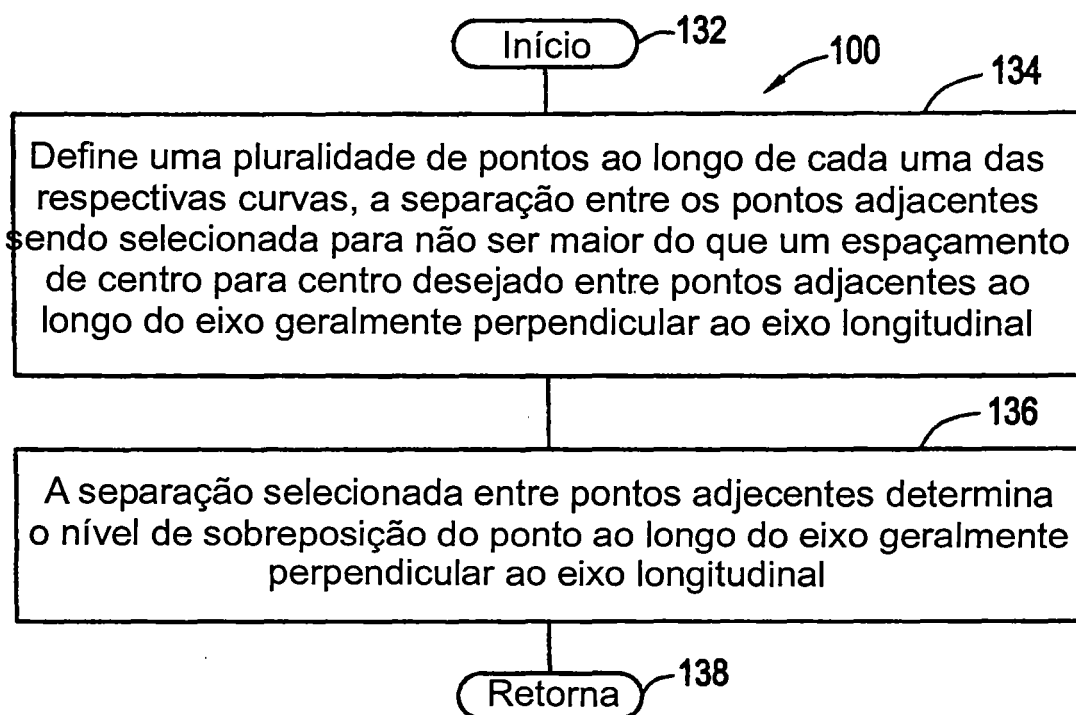


FIG. 8

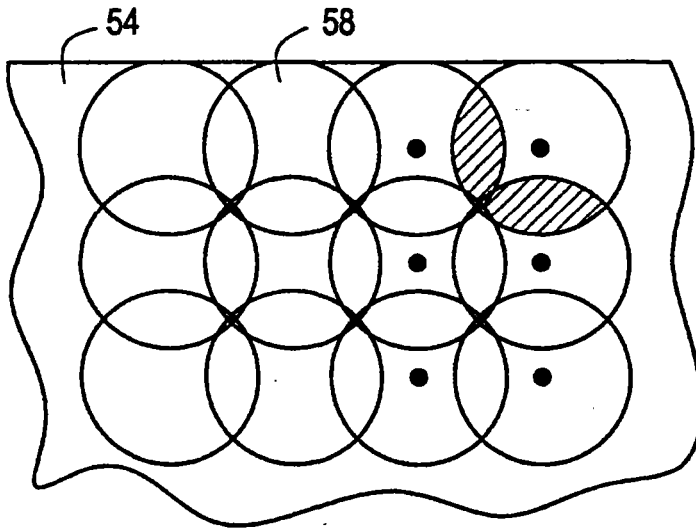


FIG. 9

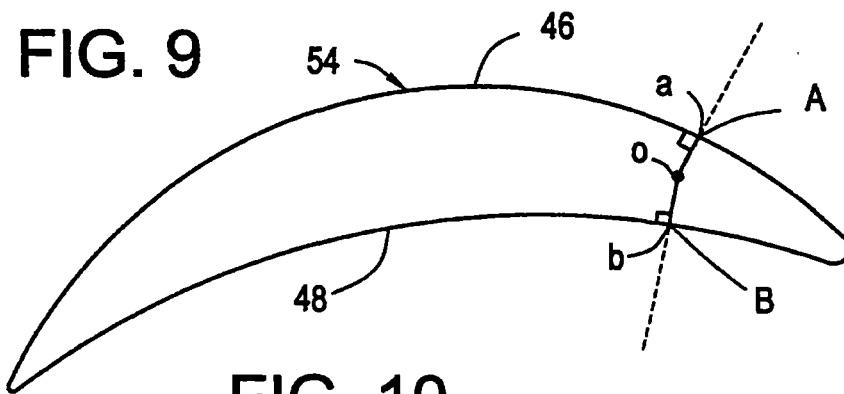


FIG. 10

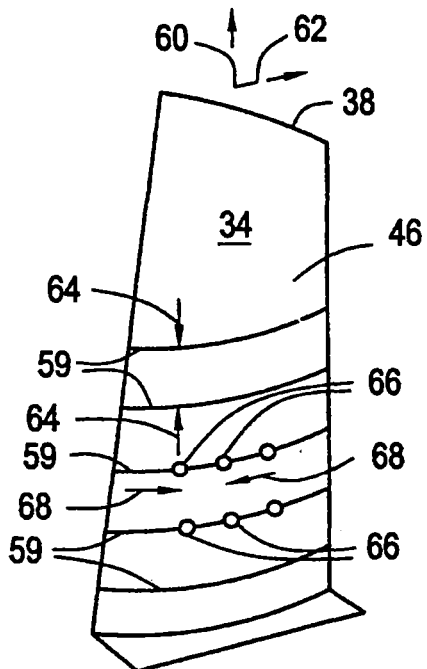


FIG. 13

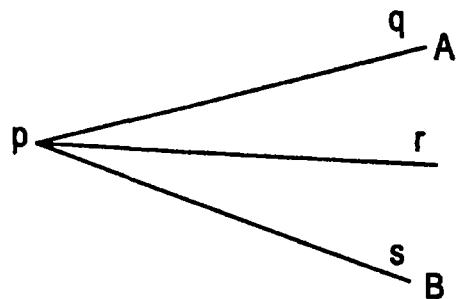


FIG. 11

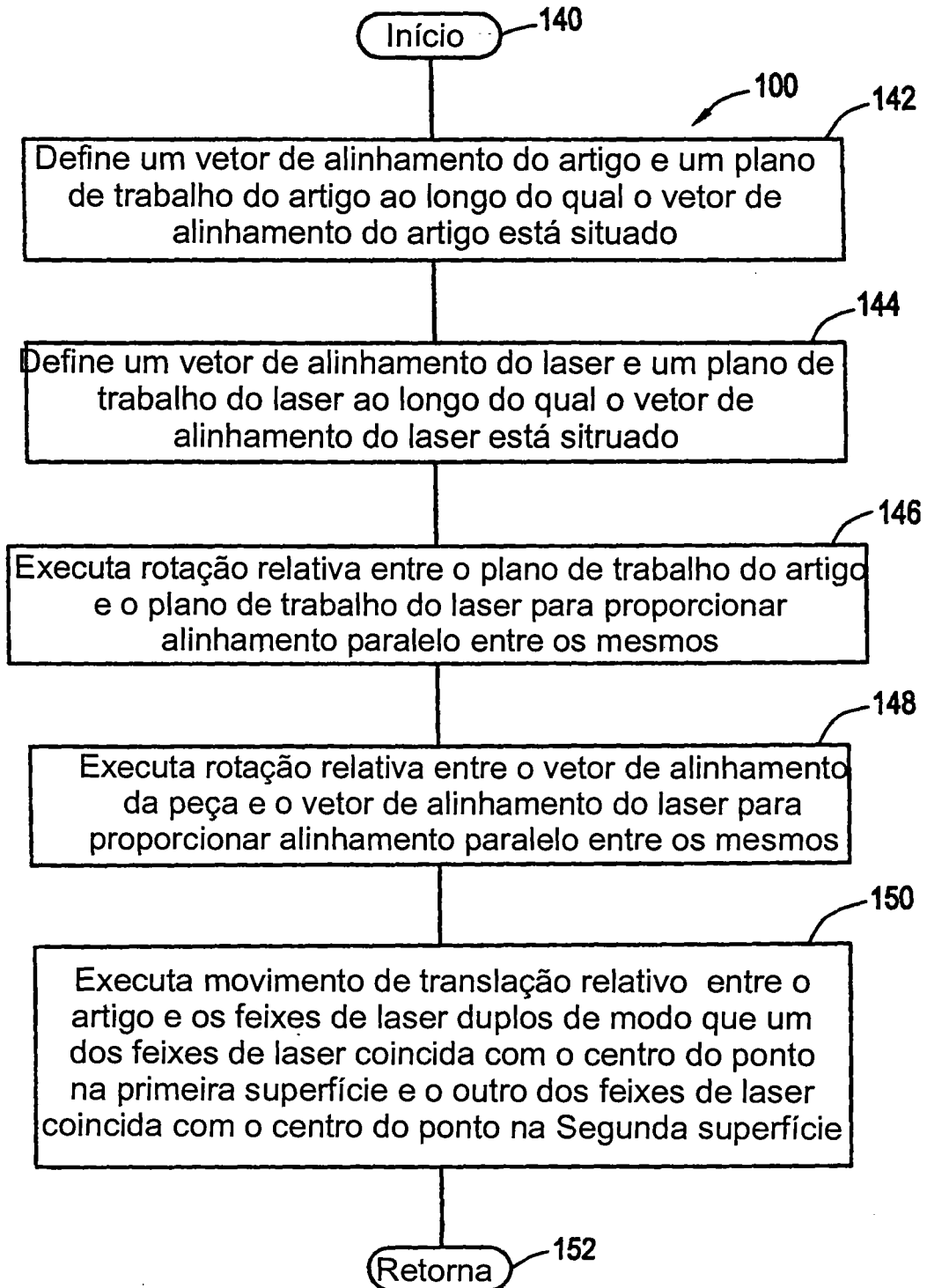




FIG. 14

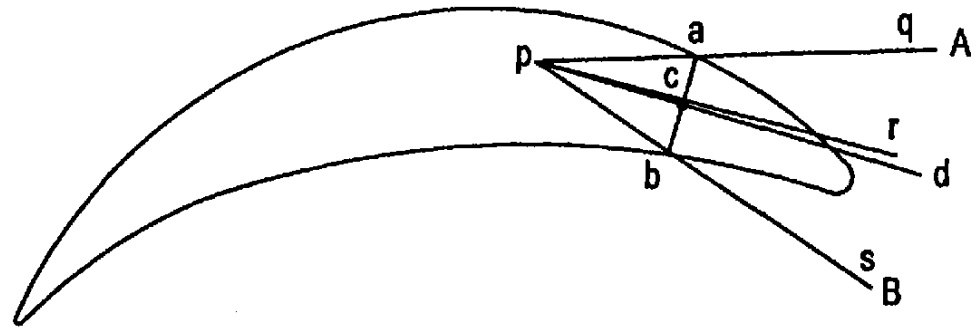
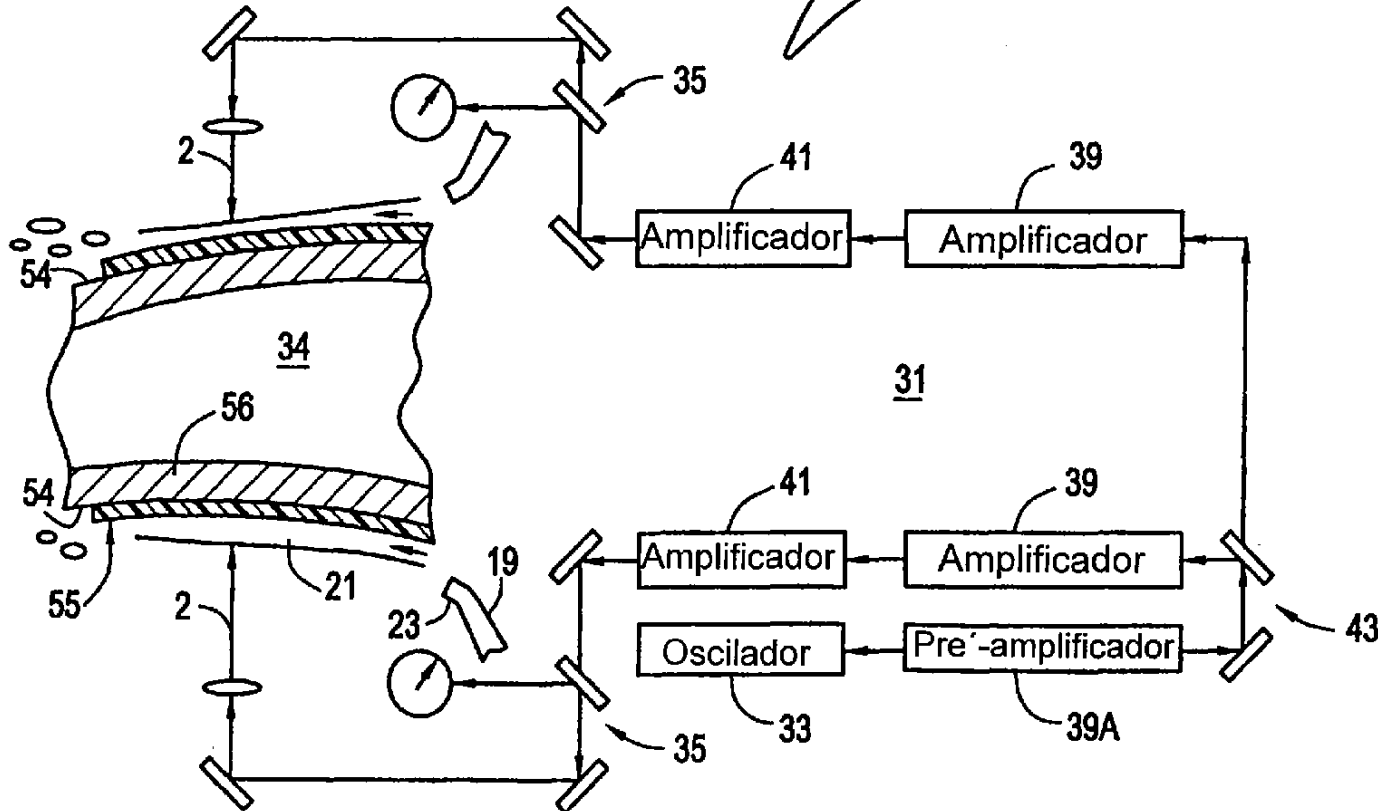


FIG. 16



## RESUMO

Patente de Invenção: **"MÉTODO E SISTEMA PARA MARTELADA DE IMPACTO DUPLO A LASER DE UM ARTIGO"**.

São proporcionados um método e um sistema para martelada por impacto de laser duplo em um artigo. O método permite definir um padrão de pontos (104) compreendendo uma pluralidade de pontos em uma primeira superfície (46) do artigo a ser martelado. O método adicionalmente permite definir um padrão de pontos (106) compreendendo uma pluralidade de pontos em uma segunda superfície (48) do artigo a ser martelado. As primeira e segunda superfícies compreendem superfícies mutuamente opostas uma a outra. Cada um dos respectivos pontos na segunda superfície está disposto para corresponder a um respectivo ponto na primeira superfície e compreendendo uma pluralidade de pares de pontos correspondentes. Uma etapa de geração (108) permite gerar feixes de laser duplos respectivamente alinhados para simultaneamente colidir em cada um dos respectivos pares de pontos correspondentes.