



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

**(11) PI 0922749-0 B1**



**(22) Data do Depósito:** 04/12/2009

**(45) Data de Concessão:** 05/01/2021

**(54) Título:** PÁ DE TURBINA EÓLICA

**(51) Int.Cl.:** F03D 3/06.

**(30) Prioridade Unionista:** 05/12/2008 US 61/120338; 17/07/2009 US 61/271179; 24/06/2009 US 61/220187.

**(73) Titular(es):** MODULAR WIND ENERGY, INC..

**(72) Inventor(es):** BERNARD G. MADRID; SHELDON VILHAUER; MYLES L. BAKER; CORY P. ARENDT.

**(86) Pedido PCT:** PCT US2009066875 de 04/12/2009

**(87) Publicação PCT:** WO 2010/065928 de 10/06/2010

**(85) Data do Início da Fase Nacional:** 03/06/2011

**(57) Resumo:** SISTEMA DE TURBINA EÓLICA, MÉTODOS PARA FABRICAR UMA LÂMINA DE TURBINA EÓLICA E PARA OPERAR TURBINA EÓLICA, LÂMINA DE TURBINA EÓLICA E APARELHO PARA COMPRIMIR UMA PLURALIDADE DE CAMADAS DE MATERIAL COMPÓSITO PRÉ-CURADO UMA À OUTRA PARA LAMINAÇÃO. Sistemas e métodos de turbina eólica são revelados aqui. Um sistema representativo inclui uma pá de turbina eólica tendo uma região interna tendo uma estrutura interna de suporte de carga, e uma região externa tendo uma estrutura interna de suporte de carga sem treliça. Em determinados modos de realização, a estrutura de treliça pode incluir um arranjo triangular de longarinas, e/ou pode incluir membros de acoplamento de treliça que conectam componentes da treliça sem o uso de furos nas longarinas. Longarinas podem ser produzidas de uma pluralidade de membros compósitos extrudados por tração laminados juntos em porções estendidas longitudinalmente. As porções estendidas longitudinalmente podem ser conectadas em juntas que intercalam projeções e rebaixos de cada uma das porções de longarina. As pás podem incluir transições em forma de leque em uma porção de acoplamento a cubo, formada por camadas laminadas e/ou uma combinação de camadas laminadas e placas de transição.

## PÁ DE TURBINA EÓLICA

### Referência a pedidos relacionados

[001] O presente pedido reivindica prioridade para os seguintes pedidos de patente provisórios: US 61/120.338, solicitado aos 5 de dezembro de 2008; 61/220.187, solicitado aos 24 de junho de 2009; e 61/271, 179, solicitado aos 17 de julho de 2009. Cada um deles aqui incorporado em sua totalidade, pela referência

### Campo técnico

[002] A presente invenção é direcionada, de modo geral, a pás de turbina eólica eficientes e estruturas de pá de turbina eólica, incluindo pás de turbina eólica leves, segmentadas e/ou, de outro modo, modulares, e sistemas e métodos de fabricação, montagem, e uso associados.

### Fundamentos

[003] À medida que os combustíveis fósseis se tornam mais escassos e mais caros de extrair e processar, produtores e usuários de energia estão se tornando cada vez mais interessados em outras formas de energia. Uma destas formas de energia que viu, recentemente, uma ressurgência, é a energia eólica. A energia eólica é colhida tipicamente colocando-se uma grande quantidade de turbinas eólicas em áreas geográficas que tendem a experimentar ventos constantes, moderados. As turbinas eólicas modernas incluem, tipicamente, um gerador elétrico conectado a uma ou mais pás de turbina acionadas pelo vento, que giram em torno um eixo vertical ou de um eixo horizontal.

[004] Geralmente, pás de turbina maiores (por exemplo, mais longas) produzem energia mais eficientemente do que pás curtas. Consequentemente, há um desejo, na indústria de pá de turbina eólica, de fazer pás tão longas quanto possível. Entretanto, pás longas criam diversos desafios. Por exemplo, as pás longas são pesadas e têm, por conseguinte, uma quantidade significativa de inércia, que pode reduzir a eficiência com que as pás

produzem a energia, particularmente em condições de pouco vento. Além disso, pás longas são difíceis de fabricar e, em muitos casos, também são difíceis de transportar. Consequentemente, permanece uma necessidade de pás de turbina eólicas grandes, eficientes, leves, e métodos apropriados para transportar e montar estas pás.

#### Breve Descrição dos desenhos

[005] A Figura 1 é uma ilustração isométrica, parcialmente esquemática, de um sistema de turbina eólica tendo pás configuradas de acordo com um modo de realização da invenção.

[006] A Figura 2A é uma vista de perfil, parcialmente esquemática, de uma pá de turbina eólica tendo uma estrutura híbrida de treliça/sem treliça, de acordo com um modo de realização da invenção.

[007] A Figura 2B é uma ilustração ampliada de uma porção da pá de turbina eólica mostrada na Figura 2A.

[008] As Figuras 2C-2F são ilustrações esquemáticas em seção transversal de porções de pá de turbina eólica tendo estruturas de treliça, de acordo com diversos modos de realização da invenção.

[009] Figura 3 é uma ilustração isométrica, parcialmente esquemática, de uma porção de uma pá de turbina eólica tendo três longarinas que fazem parte de uma estrutura de treliça, de acordo com um modo de realização da invenção.

[0010] A Figura 4 é uma ilustração isométrica, parcialmente esquemática, de uma porção de uma pá de turbina eólica tendo uma estrutura interna sem treliça, de acordo com um modo de realização da invenção.

[0011] A Figura 5A é uma ilustração isométrica, parcialmente esquemática, de uma porção interna de uma pá de turbina eólica tendo membros de treliça configurados de acordo com um modo de realização da invenção.

[0012] As Figuras 5B-5C são ilustrações isométricas ampliadas de um

membro de acoplamento de treliça configurado de acordo com um modo de realização da invenção.

[0013] As Figuras 5D-5F ilustram diversas vistas de uma porção interna de uma pá de turbina eólica tendo uma estrutura de treliça presa, pelo menos parcialmente, com membros de acoplamento de treliça configurados de acordo com modos de realização da invenção.

[0014] A Figura 6A é uma vista de perfil lateral, parcialmente esquemática, de uma longarina tendo múltiplas porções, cada uma com camadas que terminam em posições escalonadas para formar uma linha de ligação variando não monotonamente.

[0015] A Figura 6B é uma ilustração de um modo de realização da estrutura mostrada na Figura 6A com braçadeiras posicionadas para impedir ou limitar a delaminação, de acordo com um modo de realização da invenção.

[0016] A Figura 6C é uma ilustração ampliada de uma porção da longarina mostrada na Figura 6B.

[0017] As Figuras 6D-6G são ilustrações, parcialmente esquemáticas, das longarinas tendo junções configuradas de acordo com outros modos de realização da invenção.

[0018] A Figura 7A é uma ilustração isométrica, parcialmente esquemática, de uma longarina tendo camadas que divergem em uma região de acoplamento a cubo, de acordo com um modo de realização da invenção.

[0019] A Figura 7B é uma ilustração isométrica, parcialmente esquemática, de uma longarina conectada a placas de transição em forma de leque em uma região de acoplamento a cubo, de acordo com outro modo de realização da invenção.

[0020] A Figura 8A é uma vista de perfil lateral parcialmente esquemática, de um subconjunto de estrutura de pá de turbina eólica configurada de acordo com um modo de realização da invenção, e a Figura 8B é uma vista de extremidade ampliada, parcialmente esquemática, de uma

nervura do subconjunto da Figura 8A.

[0021] As Figuras 9A-9C são vistas isométricas, parcialmente esquemáticas, não em escala, de porções de longarina a bordo, intermediárias e externas, configuradas de acordo com modos de realização da invenção.

[0022] As Figuras 9D e 9E incluem vistas cortadas de perfil lateral, parcialmente esquemáticas, de porções de longarina a bordo e intermediárias das Figuras 9A e 9B, respectivamente, e a Figura 9F é uma vista de perfil lateral, parcialmente esquemática, de uma união entre porções de extremidade adjacentes da porção a bordo da longarina e da porção intermediária da longarina das Figuras 9A e 9B, configuradas de acordo com diversos modos de realização da invenção.

[0023] As Figuras 10A e 10C-10E são uma série de vistas de perfil lateral, parcialmente esquemáticas, de uma porção de um subconjunto de pá que ilustra vários estágios em um método para fabricar uma longarina de pá de acordo com um modo de realização da invenção, e a Figura 10B é uma vista de extremidade ampliada de uma porção de uma nervura representativa que ilustra outro estágio no método de fabricação de pá.

[0024] As Figuras 11A-11 C são vistas isométricas ampliadas de uma porção de uma estrutura de pá de turbina eólica, uma vista de extremidade de uma nervura representativa, e uma vista isométrica da estrutura de pá de turbina eólica, respectivamente, ilustrando vários aspectos de uma longarina fabricada de acordo com um modo de realização da invenção.

[0025] A Figura 12A é uma vista isométrica de um aparelho de compressão configurado de acordo com um modo de realização da invenção, e a Figura 12B é uma vista isométrica, parcialmente explodida, do aparelho de compressão da Figura 12A.

[0026] As Figuras 13A e 13B são vistas isométricas ampliadas de porções de extremidade opostas de uma primeira porção de ferramenta do aparelho de compressão das Figuras 12A e 12B.

[0027] A Figura 14A é uma vista isométrica de uma segunda porção de ferramenta do aparelho de compressão das Figuras 12A e 12B, e a Figura 14B é uma vista isométrica, parcialmente explodida, da segunda porção de ferramenta da Figura 14A.

[0028] A Figura 15 é uma vista de extremidade ampliada, em seção transversal, de uma longarina laminada de pá sendo comprimida pelo aparelho de compressão das Figuras 12A e 12B durante um ciclo de cura de adesivo, de acordo com um modo de realização da invenção.

[0029] Figura 16 é uma vista isométrica, parcialmente esquemática, de uma ferramenta de arranjo em camadas que ilustra vários estágios em um método para fabricar um longarina de pá de turbina eólica de acordo com outro modo de realização da invenção.

#### DESCRIÇÃO DETALHADA

[0030] A presente invenção é direcionada, de modo geral, a pás de turbina eólica eficientes, longarinas de pá de turbina eólica e outras estruturas, e sistemas e métodos de fabricação, montagem, e uso associados. Diversos detalhes que descrevem estruturas e/ou processos que são bem conhecidos e frequentemente associados às pás de turbina eólica não são apresentados na descrição a seguir para evitar obscurecer, desnecessariamente, a descrição dos vários modos de realização da invenção. Além disso, embora o relatório a seguir apresente diversos modos de realização, vários outros modos de realização podem ter configurações diferentes ou componentes diferentes daqueles descritos nesta seção. Em particular, outros modos de realização podem ter elementos adicionais ou podem faltar um ou mais dos elementos descritos abaixo com referência às Figuras 1-16. Nas Figuras 1-16, muitos dos elementos não estão desenhados em escala para finalidades de clareza e/ou de ilustração.

[0031] A Figura 1 é uma ilustração isométrica, parcialmente esquemática, de um sistema global 100 que inclui uma turbina eólica 103

tendo pás 110 configuradas de acordo com um modo de realização da invenção. A turbina eólica 103 inclui uma torre 101 (uma porção da mesma mostrada na Figura 1), um alojamento ou uma nacele 102 portada no topo da torre 101, e um gerador 104 posicionado dentro do alojamento 102. O gerador 104 é conectado a uma haste ou fuso tendo um cubo 105 que se projeta para fora do alojamento 102. Cada pá 110 inclui uma porção de acoplamento a cubo 112 na qual as pás 110 são conectadas ao cubo 105, e uma ponta 121 posicionada radial ou longitudinalmente para fora do cubo 105. Em um modo de realização mostrado na Figura 1, a turbina eólica 103 inclui três pás conectadas a um eixo horizontalmente orientado. Consequentemente, cada pá 110 é submetida a cargas variando ciclicamente, à medida que ela gira entre as posições de 12:00, 3:00, 6:00 e 9:00h, devido ao efeito da gravidade ser diferente em cada posição. Em outros modos de realização, a turbina eólica 103 pode incluir outros números de pás conectadas a um eixo horizontalmente orientado, ou a turbina eólica 103 pode ter uma haste com uma orientação vertical, ou outra diferente. Em qualquer um destes modos de realização, as pás 110 podem ter estruturas configuradas de acordo com os arranjos descritos abaixo em maior detalhe com referência às Figuras 2A-16.

[0032] A Figura 2A é uma ilustração parcialmente cortada, parcialmente esquemática, de uma das pás 110 mostradas na Figura 1. A pá 110 se estende externamente em uma direção radial ou longitudinal a partir de uma região interna 113 que inclui a porção de acoplamento a cubo 112, para uma região externa 114 que inclui a ponta 121. A porção de acoplamento a cubo 112 pode incluir um ou mais elementos de acoplamento a cubo, por exemplo, um anel com um círculo de parafuso, um ou mais mancais, fixadores, e/ou outros elementos. A estrutura interna da pá 110 pode ser diferente, na região interna 113, daquela na região externa 114. Por exemplo, a região interna 113 pode incluir uma estrutura de treliça 140 formada de uma pluralidade de traves ou longarinas se estendendo longitudinal ou radialmente 170, nervuras se

estendendo como linhas 142, e membros de treliça 143 conectados entre as longarinas 170 e as nervuras 142. A estrutura de treliça 140 pode ser circundada por um casco 115 (a maior parte do mesmo removida na Figura 2A) que apresenta ao vento, durante a operação, uma superfície lisa, aerodinâmica. A região externa 114 pode incluir uma estrutura sem treliça, que será descrita em maior detalhe, mais tarde, com referência à Figura 4. Como usado aqui, o termo “estrutura de treliça” se refere, de modo geral, a uma estrutura de suporte de carga que inclui membros delgados, geralmente retos, formando formas ou unidades fechadas (por exemplo, unidades triangulares). O termo “estrutura sem treliça” se refere, de modo geral, a uma estrutura de suporte de carga tendo um arranjo que não se baseia em, ou não se baseia, primariamente, em membros delgados retos formando a unidades de forma fechada, para resistência. Estas estruturas podem incluir, por exemplo, estruturas monocoque e semi-monocoque. Consequentemente, o casco 115 da região interna 113, geralmente, não suporta carga, e o casco 115 na região externa 114 é de suporte de carga.

[0033] Em um aspecto particular de um modo de realização mostrado na Figura 2A, a pá 110 inclui três segmentos 116, mostrados como um primeiro segmento 116a, um segundo segmento 116b, e um terceiro segmento 116c. Cada um dos primeiros e segundos segmentos 116a, 116b pode ter a estrutura de treliça 140 descrita acima, e o terceiro segmento 116c pode ter uma estrutura sem treliça. Consequentemente, a pá 110 pode ter uma estrutura de treliça para dois terços internos de sua expansão, e uma estrutura sem treliça para o terço externo. Em outros modos de realização, estes valores podem ser diferentes, dependendo, por exemplo, do tamanho, da forma e/ou de outras características da pá 110. Por exemplo, em um modo de realização, a estrutura de treliça 140 se estende externamente sobre a maior parte da envergadura ou do comprimento da pá 110, mas por uma quantidade menor do que, ou maior do que, dois terços do comprimento. Os segmentos 116 podem ser fabricados

individualmente e, em seguida, conectados um ao outro em uma instalação de fabricação, ou em um local de instalação do usuário final. Por exemplo, cada um dos segmentos 116 pode ser dimensionado para caber em um recipiente de 16,15m, ou em outro recipiente apropriadamente dimensionado, para expedição. Em outros modos de realização, um ou mais dos segmentos (por exemplo, o primeiro segmento 116a e o segundo segmento 116b) podem ser construídos inteiramente no local da instalação.

[0034] Ainda em outros modos de realização, a pá 110 pode incluir outros números de segmentos 116 (por exemplo, dois ou mais segmentos). Em qualquer um desses modos de realização, segmentos individuais 116 podem incluir nervuras 142, membros de treliça 143, e porções das longarinas 170 que se estendem pelo comprimento do segmento 116. Os segmentos 116 podem ser unidos uns aos outros pela junção de porções adjacentes de longarinas, por exemplo, como explicado mais adiante com referência às Figuras 6A-6C e 8A-16. Por exemplo, o primeiro segmento 116a pode incluir um ou mais primeiros segmentos de longarina que são unidos aos correspondentes segundos segmentos de longarina do segundo segmento 116b. As longarinas unidas resultantes podem se estender ao longo de eixos longitudinais correspondentes, geralmente lisos, contínuos. Em qualquer um desses modos de realização, o casco 115 pode ser disposto sobre a estrutura de treliça 140 com ou sem a formação de uma união na interface entre segmentos adjacentes 116. Por exemplo, as porções de longarina podem ser unidas em uma localização entre duas nervuras vizinhas 142, e um painel relativamente pequeno de casco 115 pode ser disposto sobre a união de longarina e as duas nervuras vizinhas 142. As nervuras vizinhas 142 podem ser afastadas por, aproximadamente, um metro, em um modo de realização, e por outros valores, em outros modos de realização. Painéis do casco maiores 115 podem ser colocados a bordo e no exterior do painel pequeno. Em outro modo de realização, o casco 115 pode não ter junções ao longo da

envergadura e pode ser disposto como um elemento contínuo. Em qualquer um desses modos de realização, o casco 115 pode ser acoplado (por exemplo, unido adesiva ou por ultrassom) apenas às nervuras 142, ou às nervuras 142 e às longarinas 170. Em qualquer um desses modos de realização, a estrutura de treliça 140 pode servir como estrutura primária para portar cargas de cisalhamento e de flexão na pá 110.

[0035] A Figura 2B é uma ilustração isométrica, parcialmente esquemática, de uma porção da pá 110 mostrada na Figura 2A, tomada em uma localização onde a estrutura interna da pá 110 é uma estrutura de treliça 140. Consequentemente, a estrutura de treliça 140 pode incluir múltiplas longarinas 170 (estão mostradas quatro na Figura 2B) acopladas a nervuras afastadas 142. Os membros de treliça 143 podem ser conectados entre longarinas vizinhas 170, por exemplo, usando-se as técnicas descritas posteriormente com referência às Figuras 5A-5F.

[0036] As Figuras 2C-2F são ilustrações esquemáticas, em seção transversal, das pás 110 tendo arranjos de treliça configurados de acordo com uma variedade de modos de realização. A Figura 2C ilustra uma pá 110 tendo quatro longarinas 170 posicionadas em um arranjo geralmente retangular. A Figura 2D ilustra uma pá 110 tendo seis longarinas 170, incluindo quatro longarinas 170 posicionadas em um arranjo geralmente retangular, e duas longarinas adicionais 170, uma posicionada à frente do arranjo geralmente retangular, e uma posicionada atrás do arranjo geralmente retangular. A Figura 2E ilustra uma pá 110 tendo quatro longarinas 170 posicionadas em um arranjo geralmente em forma de losango, e a Figura 2F ilustra uma pá 110 tendo três longarinas 170 posicionadas em um arranjo triangular. Em outros modos de realização, a pá 110 pode incluir longarinas 170 tendo outros arranjos.

[0037] Figura 3 é uma ilustração isométrica de uma porção interna de uma pá 110 tendo uma estrutura de treliça 140 que inclui um arranjo

triangular de longarinas 170 similar, de modo geral, àquele mostrado na Figura 2F. A pá 110 se estende em uma direção radial longitudinal, ou ao longo da envergadura, ao longo de um eixo ao longo da envergadura S, e estende para frente e para trás ao longo de um eixo transversal ao longo da linha C. Consequentemente, a pá 110 pode ter uma região de borda de ataque frontal 117 com uma borda de ataque frontal 117a, e uma região de borda de fuga traseira 118, com uma borda de fuga 118a. A espessura da pá 110 pode ser medida em relação a um eixo de espessura T transversal tanto ao eixo ao longo da envergadura S, como ao eixo ao longo da linha C.

[0038] Em um modo de realização particular mostrado na Figura 3, a pá 110 pode incluir três longarinas 170, incluindo uma primeira longarina 170a e uma segunda longarina 170b, ambas posicionadas na região da borda de ataque 117 e/ou em direção à borda de ataque 117a e afastadas uma da outra ao longo do eixo de espessura T. A pá 110 pode incluir, adicionalmente, uma terceira longarina 170c posicionada na região da borda de fuga 118 e/ou em direção à borda de fuga 118a e afastada de ambas, da primeira longarina 170a e da segunda longarina 170b, ao longo do eixo ao longo da linha C. Cada uma das longarinas 170a-170c é acoplada a uma pluralidade de nervuras 142 (uma estando visível na Figura 3) que por sua vez são afastadas umas das outras ao longo do eixo ao longo da envergadura S. Cada uma das longarinas 170a-c pode ter um seção transversal geralmente retangular. As longarinas frontais 170a, 170b podem ter uma dimensão ao longo da linha maior do que uma dimensão de espessura, e a longarina traseira 170c pode ter uma dimensão de espessura maior do que uma dimensão ao longo da linha. A terceira longarina 170c pode se estender sobre a maior parte da dimensão de espessura da pá 110 e, em um modo de realização particular, pode se estender sobre a totalidade ou sobre quase a totalidade da dimensão de espessura. Por exemplo, a terceira longarina 170c pode ter uma dimensão na direção da espessura que seja, aproximadamente, a mesma que a dimensão da nervura

142 na direção da espessura.

[0039] Uma característica do arranjo mostrado na Figura 3 é que ele pode incluir uma única longarina (a terceira longarina 170c) na região de borda de fuga 118. Por exemplo, a estrutura de treliça 140 pode incluir apenas três longarinas se estendendo longitudinalmente 170 em qualquer localização longitudinal determinada, com apenas uma das longarinas 170 na região de borda de fuga 118. Este arranjo pode permitir que a terceira longarina 170c seja posicionada a uma distância maior ao longo da linha, em direção oposta às primeira e segunda longarinas 170a, 170b, do que em alguns arranjos que incluem quatro longarinas (por exemplo, o arranjo mostrado nas Figuras 2B-2C). Espaçando-se a terceira longarina 170c mais distante das primeira e segunda longarinas 170a, 170b, a capacidade da estrutura de treliça 140 de manusear grandes cargas na direção ao longo da linha C é realçada. Isto pode ser particularmente importante para pás de turbina eólica montadas a um eixo horizontal, devido ao fato destas pás serem submetidas a cargas de gravidade significativas na direção ao longo da linha C quando as pás estão nas posições 3:00 e 9:00 descritas acima com referência à Figura 1. Consequentemente, é esperado que este arranjo possa ser mais leve e/ou melhor capacitado para suportar cargas significativas na direção ao longo da linha C do que pelo menos alguns arranjos que têm quatro longarinas. Ao mesmo tempo, é esperado que este arranjo seja mais simples, mais leve e/ou mais barato do que os arranjos que incluem mais de quatro longarinas, por exemplo, o arranjo descrito acima com referência à Figura 2D.

[0040] Os componentes estruturais internos descritos acima podem ser fabricados de materiais de compósitos e/ou não de compósitos, apropriados. Por exemplo, as longarinas 170 podem ser formadas de um laminado de camadas, cada uma incluindo fibra de vidro unidirecional, fibras de carbono, e/ou outras fibras em uma matriz de resinas termocuradas e/ou termoplásticas apropriadas. As fibras podem ser geralmente orientadas paralelas ao longo da

envergadura S sobre a maior parte do comprimento da pá 110, e podem ter outras orientações em localizações específicas, como descrito mais abaixo com referência às Figuras 6A-7A. Em outros modos de realização, longarinas de compósitos também podem ser fabricadas por infusão, prepreg (pré-impregnação), extrusão por tração, ou moldagem por pressão. Em ainda outros modos de realização, as longarinas 170 podem ser formadas de materiais metálicos, incluindo ligas usinadas, forjadas ou fundidas, laminados metálicos, estruturas impressadas, bem como, de híbridos de metal/compósito (por exemplo, envoltórios de compósito com núcleo metálico, por exemplo, núcleo em favo de mel) etc. Os membros de treliça 143 podem ser formados de alumínio (por exemplo, alumínio 2024-T6) ou de outro metal, compósito, ou outro material apropriado. As nervuras 142 podem ser formadas de um compósito de fibra de vidro e espuma ou balsa, por exemplo, um núcleo de balsa impressado entre placas de face de fibra de vidro. Em outros modos de realização, as nervuras 142 podem ser formadas de fibra de vidro sozinha, sem um núcleo de espuma ou de balsa, ou as nervuras 142 podem ser formadas com outras técnicas e/ou componentes. Por exemplo, as nervuras 142 podem ter uma construção corrugada ou frisada. Os nervuras 142 podem ser formadas de um único painel, ou dois painéis afastados, sem a estrutura do núcleo entre eles. As nervuras 142 também podem ser feitas de metal, de materiais de compósitos, como fibra de vidro, fibras do carbono, e/ou outras fibras em uma matriz de resinas termocuradas e termoplásticas, e/ou de materiais plásticos (sem reforço) (por exemplo, resina sem fibras). Por exemplo, nervuras de compósito podem ser fabricadas por laminação úmida, infusão, prepreg, fibra picada pulverizada, moldagem por pressão, moldagem à vácuo, e/ou outras técnicas apropriadas de produção em massa.

[0041] A Figura 4 é uma ilustração parcialmente esquemática de uma porção da pá de turbina eólica 110 localizada na região externa 114 descrita acima com referência à Figura 2A. Neste modo de realização, a estrutura

interna da pá de turbina eólica 110, na região externa 114, não é uma estrutura de treliça. Por exemplo, a estrutura pode incluir, no lugar dela, uma alma relativamente fina 119 orientada geralmente paralela ao eixo de espessura T e se estendendo ao longo do eixo ao longo da envergadura S. A alma 119 pode ser conectada ou formada integralmente com flanges 120 se estendendo na direção ao longo da linha C. Longarinas se estendendo ao longo da envergadura 470a, 470b são acopladas a cada um dos flanges 120 que são, por sua vez, conectados a um casco 115, uma porção do qual é mostrada na Figura 4A. Em um modo de realização, a estrutura pode incluir nervuras afastadas 142 posicionadas na região de borda de fuga 118. Em outros modos de realização, esta nervura 142 pode se estender, também, para a região de borda de ataque 117. O casco 115 pode ser formado de uma intercalação de fibra de vidro-balsa-fibra de vidro, ou de fibra de vidro-espuma-fibra de vidro. Em outros modos de realização, o casco 115 pode ser formado de materiais de compósitos fabricados por laminação úmida, infusão, prepreg, fibra picada pulverizada, moldagem por pressão, moldagem à vácuo, e/ou por outras técnicas de produção em massa. O casco 115 pode ter a mesma construção em ambas, a região externa 114 mostrada na Figura 4, e a região interna 113 mostrada na Figura 3. As nervuras 142 podem ter uma construção similar. A alma 119 e flanges 120 podem ser formados da fibra de vidro, por exemplo, fibra de vidro unidirecional. Em outros modos de realização, qualquer um dos componentes antecedentes pode ser formado de outros materiais apropriados. As longarinas 470a, 470b, localizadas na região externa 114, podem ser ligadas às longarinas correspondentes na região interna 113 (Figura 2A) usando-se uma variedade de técnicas compreendendo, mas não de modo limitativo, aquelas descritas posteriormente com referência às Figuras 6A-6C e 8A-16. Em qualquer um desses modos de realização, as longarinas 470a, 470b, localizadas na região externa 114, podem se estender ao longo dos mesmos eixos longitudinais

contínuos, geralmente lisos, como as longarinas de contrapartes na região interna 113 para transferir eficientemente cargas da região externa 114 para a região interna 113.

[0042] Uma característica do arranjo descrito acima com referência às Figuras 2A-4 é que a pá 110 pode incluir estruturas internas de treliça e sem treliça. Uma vantagem deste arranjo é que ele pode ser mais estruturalmente eficiente do que um projeto que inclua uma estrutura de treliça, sozinha, ou uma estrutura sem treliça, sozinha. Por exemplo, a estrutura de treliça pode ser usada na região interna 113 (por exemplo, próximo ao cubo) onde cargas de flexão são maiores do que o são próximo à ponta 111, e onde a pá 110 é relativamente espessa. Na região externa 114, a estrutura sem treliça pode ser mais fácil de integrar nesta porção relativamente fina da pá 110. É esperado, também, que a estrutura sem treliça, nesta região, seja estruturalmente mais eficiente do que uma estrutura de treliça, que tende a perder eficiência quando a relação de aspecto das formas fechadas formadas pelos membros de treliça se torna grande.

[0043] A Figura 5A é uma ilustração isométrica, parcialmente esquemática, de uma porção de uma estrutura de treliça representativa 140 configurada de acordo com um modo de realização particular da invenção. Neste modo de realização, a estrutura de treliça 140 inclui três longarinas 170, identificadas como uma primeira longarina 170a, uma segunda longarina 170b e uma terceira longarina 170c. Em outros modos de realização, a estrutura de treliça 140 pode ter outros números e/ou arranjos de longarinas 170. Em qualquer um desses modos de realização, a estrutura de treliça 140 pode incluir membros de treliça 143 e nervuras 142, além das longarinas 170. Os membros de acoplamento de treliça 150 podem conectar os membros de treliça 143 às longarinas 170. Por exemplo, os membros de treliça 143 podem incluir uma primeira característica de acoplamento 151a (por exemplo, um primeiro furo de montagem) alinhada com uma segunda característica de

acoplamento 151b (por exemplo, um segundo furo de montagem correspondente) portada pelo membro de acoplamento de treliça 150. Quando as duas características de acoplamento 151a, 151b incluem furos correspondentes, elas podem ser conectadas via um membro de fixação adicional 157, por exemplo, um rebite ou um fixador com roscas. Em outros modos de realização, as características de acoplamento 151a, 151b podem ser conectadas diretamente uma à outra, por exemplo, se uma característica incluir um dente expansível e a outra incluir um furo correspondente.

[0044] A Figura 5B ilustra uma porção representativa da estrutura de treliça 140 descrita acima com referência à Figura 5A. Como mostrado na Figura 5B, um membro de acoplamento de treliça representativo 150 é posicionado ao longo da segunda longarina 170b de modo a receber e se acoplar aos múltiplos membros de treliça 143. Cada um dos membros de treliça 143 pode incluir um rasgo 145 que recebe uma porção de acoplamento de treliça em forma de flange 154 do membro de acoplamento de treliça 150. Neste modo de realização, as características de acoplamento 151a, 151b incluem os furos correspondentes 158a, 158b que são conectados aos membros de fixação 157 descritos acima com referência à Figura 5A.

[0045] A Figura 5C é uma ilustração isométrica ampliada de um dos membros de acoplamento de treliça 150 mostrados nas Figuras 5A-5B. Neste modo de realização, o membro de acoplamento de treliça 150 inclui uma porção de acoplamento de longarina 152 (por exemplo, tendo um canal 153 no qual a longarina correspondente 170 é posicionada), e uma ou mais porções de acoplamento de treliça 154 (duas mostradas na Figura 5B). As porções de acoplamento de treliça 154 podem ter uma forma plana, tipo flange, na qual as segundas características de acoplamento 151 b (por exemplo, os furos de montagem 158b) são posicionadas. Em um modo de realização particular mostrado na Figura 5B, o membro de acoplamento de treliça 150 é formado de dois componentes ou peças complementares: um

primeiro componente ou peça 156a e o segundo componente ou peça 156b. A primeira peça 156a inclui duas primeiras porções de flange 155a, e a segunda peça 156b inclui duas segundas porções de flange 155b. Quando as duas peças 156a, 156b são colocadas juntas, as primeiras porções de flange 155a se casam com as segundas porções de flange correspondentes 155b para formar dois pares de flange, cada um formando uma das porções de acoplamento de treliça 154. Consequentemente, cada primeira porção de flange 155a pode ficar em contato, superfície-a-superfície, com a correspondente segunda porção de flange. As primeiras e segundas porções 155a, 155b podem ter furos de montagem alinhados configurados para receber um fixador correspondente. As duas peças 156a, 156b também formam o canal 153. Em um aspecto particular deste modo de realização, a primeira peça 156a e a segunda peça 156b são dimensionadas de modo que, quando colocadas juntas, o canal resultante 153 seja ligeiramente menor do que a seção transversal da longarina em torno da qual elas são colocadas. Consequentemente, quando as duas peças de 156a, 156b são forçadas uma em direção à outra, o membro de acoplamento de treliça 150 pode ser preso com braçadeira em torno da longarina correspondente, prendendo, desse modo, o membro de acoplamento de treliça 150 em posição. Por exemplo, quando a segunda característica de acoplamento 151b inclui um furo de montagem, o fabricante pode passar um fixador 157 através do mesmo para acoplar o membro de acoplamento de treliça 150 ao membro de treliça correspondente 143 (Figura 5A), e também prender com braçadeira o membro de acoplamento de treliça 150 em torno da longarina correspondente 170 (Figura 5A).

[0046] Em outros modos de realização, os membros de acoplamento de treliça 150 podem ser formados usando-se outras técnicas. Por exemplo, os membros de acoplamento de treliça 150 podem ser extrudados, moldados, fundidos ou usinados. Em qualquer um desses modos de realização, o membro de acoplamento de treliça 150 pode ser formado de um material leve,

por exemplo, um metal como o alumínio ou o aço, ou um compósito apropriado. Em outros modos de realização, os membros de acoplamento de treliça 150 podem ser formados de outros materiais que acomodem prontamente as características de acoplamento 151b. Os membros de acoplamento de treliça 150 podem ser presos às longarinas correspondentes usando-se a técnica de braçadeira descrita acima, e/ou outras técnicas, incluindo, mas não de modo limitativo, ligação adesiva ou de co-cura.

[0047] Os membros de acoplamento de treliça 150 podem ter outras formas e/ou configurações em outros modos de realização. Por exemplo, a porção de acoplamento de longarina 152 não precisa se estender em torno de toda a circunferência da longarina correspondente 170, mas pode se estender, em vez disto, apenas em torno de uma porção da longarina 170. Em alguns modos de realização para os quais uma união adesiva entre o membro de acoplamento de treliça 150 e a longarina 170 prove resistência suficiente, o membro de acoplamento de treliça 150 pode ter apenas uma superfície relativamente pequena contatando a longarina 170. O membro do acoplamento de treliça pode incluir outros números de porções de acoplamento de treliça 154, por exemplo, apenas uma porção de acoplamento de treliça 154, ou mais de duas porções de acoplamento de treliça 154.

[0048] Ainda em outros modos de realização, os membros de acoplamento de treliça 150 podem ser formados de outros materiais. Por exemplo, os membros de acoplamento de treliça 150 podem ser formados de um material de compósito. Em um exemplo particular, o membro de acoplamento de treliça 150 é formado enrolando-se tranças (por exemplo, pregas de tranças) em torno da longarina 170, e sobrepondo-se as extremidades das tranças (ou pregas) para formar um ou mais flanges. As tranças são acopladas à longarina 170 com um adesivo, ou via um processo de co-cura. O membro de treliça 143 correspondente acoplado ao membro do acoplamento de treliça 150 pode ter um rasgo 145 que recebe o flange e que é

preso ao flange com um adesivo.

[0049] Uma característica de um modo de realização do membro de acoplamento de treliça 150 descrito acima com referência às Figuras 5A-5C é que não exige furos na longarina 170 para prover um acoplamento entre a longarina 170 e os membros de treliça correspondentes 143. Em lugar disso, o membro de acoplamento de treliça 150 pode ser preso por braçadeira, ou de outra maneira, à longarina 170 e os furos podem ser localizados no membro de acoplamento de treliça 150 em vez de na longarina 170. Este arranjo pode ser particularmente benéfico quando a longarina 170 inclui materiais de compósito, uma vez que, tipicamente, é mais difícil formar furos de montagem nestes materiais, e/ou estes furos podem ser mais propensos a iniciar a propagação de fraturas e/ou a criar concentrações de tensão na longarina 170.

[0050] As Figuras 5D-5F ilustram outras vistas da estrutura de treliça 140 descrita acima com referência à Figura 5A. A Figura 5D é uma vista lateral de uma porção da estrutura de treliça 140, ilustrando uma nervura representativa 142. A nervura 142 inclui uma alma 146 e um flange 147 se estendendo em torno da alma 146. A alma 146 pode incluir um ou mais recortes 148 (três mostrados na Figura 5D) que acomodam as longarinas correspondentes 170a-170c. Em um modo de realização particular mostrado na Figura 5D, o recorte 148, acomodando a terceira longarina 170c, pode se estender totalmente através da espessura da nervura 142. Como resultado, uma porção de borda de fuga 141 da nervura 142 é descontínua do restante da alma 146 da nervura 142. Consequentemente, o flange 147 da nervura 142 pode prender a porção de borda de fuga 141 da nervura 142 ao resto da nervura 142.

[0051] A Figura 5E é uma vista da estrutura de treliça 140 de uma posição frontal e acima da região da borda de ataque 117, e a Figura 5F é uma vista da estrutura de treliça 140 de uma posição acima da região da borda de

arrasto 118. Como mostrado em ambas as Figuras, 5E e 5F, os membros de treliça podem incluir primeiros membros de treliça 143a e segundos membros de treliça 143b. Os primeiros membros de treliça 143a podem ser posicionados adjacentes à alma 146 de uma nervura correspondente 142, e podem ser unidos à alma 146, em particular, via um adesivo ou outra técnica de ligação. Consequentemente, os primeiros membros do treliça 143a, em combinação com os membros de acoplamento de treliça 150, podem prender as nervuras 142 às longarinas 170a-170c. Os segundos membros de treliça 143b podem se estender transversalmente (por exemplo, diagonalmente) entre nervuras 142 e/ou longarinas 170 vizinhas para aumentar a resistência e a rigidez globais da estrutura de treliça 140.

[0052] A Figura 6A é uma vista de perfil lateral, parcialmente esquemática, de uma junção entre duas porções 171 de um longarina 170. As duas porções podem incluir uma primeira porção 171a e uma segunda porção 171b, e a junção pode ser formada ao longo de uma linha de ligação 176 variando não monotonamente (por exemplo, em ziguezague). É esperado que esta linha de ligação 176 produza uma ligação mais forte entre as primeiras e segundas porções 171a, 171b do que uma linha de ligação reta ou diagonal. Cada uma das primeira e segunda porções 171a, 171b pode fazer parte de um segmento vizinho diferente da longarina global 170, como descrito acima com referência à Figura 2A. Por exemplo, a primeira porção 171a pode ser parte do primeiro segmento 116a mostrado na Figura 2A, e a segunda porção 171b pode ser parte do segundo segmento 116b.

[0053] A primeira porção 171a pode incluir primeiras camadas múltiplas, empilhadas, laminadas 172a, e a segunda porção 171b pode incluir segundas camadas múltiplas, empilhadas, laminadas 172b. Em um modo de realização particular, as camadas 172a, 172b podem ser formadas de um material de fibra unidirecional (por exemplo, fibra de vidro ou uma fibra do carbono) e uma resina correspondente. Cada uma das camadas 172a, 172b

pode ser formada de uma única prega ou de múltiplas pregas (por exemplo, seis pregas). As camadas 172a, 172b podem ser camadas de prepregs, acamadas manualmente, de extrusão inversa, ou podem ser formadas usando-se outras técnicas, por exemplo, técnicas de moldagem por transferência auxiliada a vácuo. As primeiras camadas 172a terminam nas primeiras terminações 173a, e as segundas camadas 172b terminam nas segundas terminações 173b. Terminações vizinhas 173a, 173b, localizadas em diferentes posições ao longo do eixo de espessura T, podem ser escalonadas em relação uma à outra para criar a linha de ligação 176 em ziguezague. Este arranjo produz projeções 174 e os rebaixos correspondentes 175 nos quais as projeções 174 se engatam. Em um aspecto particular deste modo de realização, cada camada tem uma terminação escalonada em relação à sua vizinha, exceto onde a linha de ligação 176 muda de direção. Nestes pontos, duas camadas adjacentes podem ser terminadas na mesma localização e ligadas uma à outra para impedir que uma única camada seja submetida a níveis de tensão aumentados.

[0054] Durante um processo de fabricação representativo, as primeiras camadas 172a, cada uma, são empilhadas, ligadas e curadas, como são cada uma das segundas camadas 172b, quando as duas porções 171a, 171b são posicionadas afastadas uma da outra. As camadas 172a, 172b são pré-recortadas antes de serem empilhadas de modo que, quando empilhadas, formem os rebaixos 175 e as projeções 174. Após as duas porções 171a, 171b terem sido curadas, os rebaixos 175 e/ou as projeções 174 podem ser revestidas e/ou carregadas com um adesivo. As duas porções 171a, 171b são, então, trazidas uma em direção à outra, de modo que as projeções 174, de cada porção, sejam recebidas nos rebaixos correspondentes 175 da outra. A região de junção pode, então, ser unida e curada.

[0055] A Figura 6B é uma ilustração de uma longarina 170 que tem uma linha de ligação 176 geralmente similar àquela descrita acima com referência

à Figura 6A. Como mostrado também, na Figura 6B, a longarina 170 pode incluir uma ou mais braçadeiras ou cintas 177 posicionadas na ou próximo à linha de ligação 176. As braçadeiras 177 podem ser posicionadas para impedir ou parar a delaminação que pode resultar entre qualquer uma das camadas na longarina de compósito 170. Por exemplo, como mostrado na Figura 6C, se uma delaminação potencial 178 começar entre duas camadas 172a, a força compressiva provida pela braçadeira 177 pode impedir que a delaminação 178 se espalhe ainda mais em uma direção ao longo da envergadura. A braçadeira 177 pode ser posicionada onde é esperado que o risco potencial de delaminação seja alto, por exemplo, na, ou próximo à terminação 173 das camadas mais externas 172a, 172b, mostradas na Figura 6B. Em outros modos de realização, a função provida pelas braçadeiras 177 pode ser provida por outras estruturas. Por exemplo, os membros de acoplamento de treliça 150 descritos acima podem executar esta função, além de prover locais de acoplamento locais para os membros de treliça.

[0056] As Figuras 6D-6G são uma série de vistas de perfil lateral, parcialmente esquemáticas, das longarinas 670a-670d, respectivamente, ilustrando várias junções que podem ser formadas entre porções de longarina adjacentes 671, de acordo com outros modos de realização da invenção. As longarinas 670 podem ser, pelo menos de modo geral, similares na estrutura e na função à longarina 170 descrita acima em detalhe. Por exemplo, como mostrado na Figura 6D, a longarina 670a pode incluir uma primeira porção 671a tendo primeiras camadas múltiplas, empilhadas, laminadas 672a, e uma segunda porção 671b tendo segundas camadas múltiplas, empilhadas, laminadas 672b. Além disso, a primeira porção 671a pode ser unida à segunda porção 671b ao longo de uma linha de ligação 676a variando não monotonamente (por exemplo, em ziguezague) ao longo do eixo de espessura T. Entretanto, neste modo de realização particular, as primeiras camadas 672a e as segundas camadas 672b têm primeiras terminações 673a e segundas

terminações 673b, respectivamente, que não são paralelas. Ou seja, as terminações 673 são chanfradas ou inclinadas em relação ao eixo ao longo da linha C. Os chanfros podem ter as mesmas direção e extensão para cada camada, ou estas características podem variar de uma camada para a seguinte. Por exemplo, como mostrado nas Figuras 6D e 6E em linhas tracejadas, a camada abaixo da camada de topo pode ser chanfrada na direção oposta à da camada de topo. Os chanfros, em camadas vizinhas, podem ser posicionados diretamente acima e abaixo um do outro, como mostrado nas Figuras 6D e 6E, ou podem ser deslocados em uma direção ao longo da envergadura, de modo a não ficarem sobrepostos.

[0057] Com referência, em seguida, à Figura 6E, a longarina 670b pode ser, pelo menos de modo geral, similar na estrutura e na função à longarina 670a descrita acima em detalhe. Por exemplo, a longarina 670b pode incluir uma primeira porção 671c tendo primeiras camadas múltiplas, empilhadas, laminadas 672a, e uma segunda porção 671d tendo segundas camadas múltiplas, empilhadas, laminadas 672b. Entretanto, neste modo de realização particular, as primeiras camadas 672a têm primeiras terminações 673c que formam uma projeção 674a, e as segundas camadas 672b têm segundas terminações 673d que formam a um rebaixo 675a. A projeção 674a é recebida no rebaixo 675a para formar uma linha de ligação 676b que varia não monotonamente ao longo do eixo de espessura T e do eixo ao longo da linha C.

[0058] Com referência, em seguida, à Figura 6F, a longarina 670c é, pelo menos de modo geral, similar na estrutura e na função à longarina 670a descrita acima em detalhe. Entretanto, neste modo de realização particular, as primeiras camadas 672a incluem as primeiras terminações 673e, e as segundas camadas 672b incluem as segundas terminações 673f, que formam projeções 674b e rebaiços 675b alternados ao longo do eixo ao longo da linha C. Isto resulta em uma linha de ligação 676c variando não monotonamente ao

longo do eixo ao longo da linha C mas não ao longo do eixo de espessura T.

[0059] Com referência, em seguida, à Figura à 6G, neste modo de realização particular as primeiras camadas 672a incluem primeiras terminações 673g, e as segundas camadas 672b incluem terminações 673h, que formam às projeções 674c e rebaixos 675c alternados ao longo do eixo ao longo da linha C, e as projeções 674d e rebaixos 675d alternados ao longo do eixo de espessura T. Como a explicação antecedente ilustra, há uma ampla variedade de linhas de ligação variando não monotonamente, escalonadas, em ziguezague, se sobrepondo, e/ou de outras maneiras, que podem ser usadas para unir eficiente e fortemente porções de longarinas em conjunto, de acordo com a presente invenção. Consequentemente, a presente invenção não é limitada a linhas de ligação tendo qualquer configuração particular.

[0060] Uma característica dos modos de realização descritos acima com referência às Figuras 6A-6G é que eles podem incluir porções de longarina conectadas umas às outras ao longo de uma linha de ligação que tenha uma forma de ziguezague, ou variando, de outro modo, de maneira não monotônica. Uma vantagem esperada deste arranjo é que a linha de ligação será mais forte do que uma linha de ligação simplesmente vertical ou diagonal. Além disso, é esperado que a formação da linha de ligação possa ser simplificada devido ao fato de não exigir o uso de um número significativo de elementos de fixação adicionais, e pode, em vez disso, empregar uma técnica de ligação similar, de modo geral, à técnica usada para a ligação de camadas individuais das duas porções. Ainda adicionalmente, a ligação entre as porções de longarina pode ser formada sem aquecimento, ou apenas com aquecimento local, o que evita a necessidade de aquecer a pá inteira. As características antecedentes podem, por sua vez, simplificar a facilidade com que um fabricante e/ou um instalador formam uma grande pá de turbina eólica que esteja, inicialmente, em múltiplos segmentos (por exemplo, os segmentos 116 descritos acima com referência à Figura 2A), que são, então, unidos uns

ao outros, por exemplo, em um local de instalação. Detalhes adicionais de técnicas de fabricação apropriadas serão descritos mais tarde com referência às Figuras 8A-16.

[0061] Em outros modos de realização, a longarina 170 pode incluir outras configurações e/ou materiais. Por exemplo, pregas selecionadas podem ser formadas de metal ou de fibra de carbono, em vez de fibra de vidro. Todas as pregas não precisam ter a mesma espessura. Consequentemente, as dimensões e materiais selecionados para cada prega podem ser selecionados para produzir uma resistência, rigidez, resistência à fadiga e custo, desejados.

[0062] A Figura 7A é uma ilustração parcialmente esquemática de uma porção de acoplamento a cubo 112 configurada de acordo com um modo de realização da invenção. Para finalidades de ilustração, a Figura 7A ilustra apenas a porção de acoplamento a cubo 112, e em particular, a transição entre as longarinas se estendendo longitudinalmente 170 e um elemento de acoplamento a cubo, por exemplo, um anel de acoplamento a cubo se estendendo circunferencialmente 180. O anel 180 pode incluir uma estrutura sem ser de compósito, por exemplo, um elemento metálico, e pode ter uma direção ao longo da envergadura relativamente curta, como mostrado na Figura 7A, ou uma dimensão ao longo da envergadura mais longa, em outros modos de realização. O anel 180, ou a porção de acoplamento a cubo 112, podem ser circunferencialmente contínuos, ou formados de múltiplas seções arranjadas circunferencialmente. Por exemplo, a porção de acoplamento a cubo 112 pode incluir uma seção circunferencial para cada longarina 170, com cada seção conectada a um anel contínuo 180. Outros elementos de acoplamento a cubo que podem ser incluídos na região do acoplamento a cubo 112 não estão mostrados na Figura 7A. A porção de acoplamento a cubo 112 pode incluir uma transição para quatro longarinas 170 (como mostrado na Figura 7A), ou outro número de longarinas 170 (por exemplo, três longarinas 170, como mostrado na Figura 3).

[0063] Cada uma das longarinas 170 pode incluir um compósito laminado de camadas 172, e cada uma das camadas 172 pode, por sua vez, incluir múltiplas pregas. Por exemplo, em um modo de realização particular, cada uma das longarinas 170 pode incluir um laminado de quinze camadas 172, cada uma tendo um total de seis pregas, para um total de noventa pregas. Cada uma das pregas pode ter fibras orientadas unidirecionalmente, por exemplo, em alinhamento com o eixo de longarina S. Consequentemente, estas fibras tem um desvio de  $0^\circ$  do eixo de longarina S. As camadas 172 podem ser empilhadas uma em cima da outra, cada uma com as fibras orientadas a  $0^\circ$  em relação ao eixo de longarina S, e podem ser cortadas de modo a terem a forma mostrada na Figura 7A. O número de pregas orientadas a  $0^\circ$  em relação ao eixo de longarina S pode ser reduzido em uma direção se estendendo em direção ao anel 180. Por exemplo, o número destas pregas pode ser reduzido de noventa, no lado direito da Figura 7A (onde os longarinas 170 têm uma forma em seção transversal retangular geralmente fixa) para vinte, no anel 180, no lado esquerdo da Figura 7A (onde a estrutura tem uma forma mais fina, arqueada). As setenta camadas suprimidas 172 podem ser terminadas de uma maneira escalonada de modo que a espessura global da estrutura seja reduzida gradualmente da direita para a esquerda

[0064] À medida que as camadas 172 orientadas a  $0^\circ$  são removidas, o fabricante pode adicionar camadas orientadas a outros ângulos em relação ao eixo de longarina S. Por exemplo, o fabricante pode adicionar camadas tendo fibras orientadas a  $+45^\circ$  e a  $-45^\circ$  em relação ao eixo de longarina S. Em um modo de realização particular, vinte a trinta destas pregas podem ser adicionadas, de modo que o número total de pregas no anel 180 fique entre quarenta e cinquenta, em comparação às noventa pregas no lado direito da Figura 7A. Adicionando-se as pregas orientadas a  $+45^\circ$ ,  $-45^\circ$  à estrutura, na porção de acoplamento a cubo 112, a carga portada pelas longarinas 170 pode ser espalhada em uma direção circunferencial e distribuída de forma mais

uniforme no anel 180. Para realçar ainda mais este efeito, o caminho de carga pode ser “direcionado” provendo-se um número diferente de pregas a  $+45^\circ$  em comparação às pregas a  $-45^\circ$ . Este arranjo pode, consequentemente, reduzir ou eliminar a probabilidade de que os parafusos individuais que passam através dos furos de parafuso 182 no anel 180 experimentarão cargas significativamente maiores do que outros parafusos localizados em posições circunferenciais diferentes. Como resultado, é esperado que este arranjo proveja não apenas uma transição suave da seção transversal de forma aerodinâmica da pá 110 para a forma de seção transversal circular na porção de acoplamento a cubo 112, mas também é esperado que distribua as cargas mais uniformemente em relação às estruturas existentes.

[0065] A Figura 7B é outra ilustração de uma porção de acoplamento a cubo 112 na qual a longarina 170 inclui camadas 172 de fibras se estendendo unidirecionalmente, alinhadas com o eixo de longarina S. Neste modo de realização, camadas individuais 172 terminam nas terminações 173. Um ou mais elementos de terminação 179 (por exemplo, placas), cada um tendo uma forma curva, tipo leque, podem ser empilhados contra a longarina 170, e podem incluir rebaixos que recebem as camadas terminadas 172. Em um modo de realização particular mostrado na Figura 7B, este arranjo inclui três elementos de transição 179, dois dos quais visíveis na Figura 7B. Cada um dos dois elementos de transição visíveis 179 acomoda múltiplas camadas 172 (por exemplo, quatro ou mais camadas 172). Um vão 183, entre os dois elementos de transição 179, recebe um terceiro elemento de transição (não mostrado na Figura 7B para finalidade de clareza) que recebe, por sua vez, as camadas 172 restantes. Cada um dos elementos de transição 179 pode, então, ser acoplado ao anel 180, o qual, por sua vez, é conectado a um mancal de passo 181. O mancal de passo 181 é usado para variar o passo da pá de turbina eólica 110, no uso. Cada um dos elementos de transição 179 pode ter uma forma de seção transversal geralmente arqueada onde ele se conecta ao

anel 180, e uma forma de seção transversal geralmente lisa, retangular, ou retilínea, em seu ponto mais distante do anel 180, onde se conecta à longarina 170.

[0066] Em outros modos de realização, a região de transição entre o anel de acoplamento a cubo 180 ou outra característica de acoplamento e o resto da pá 110 pode ter outros arranjos. Por exemplo, o arranjo geral de pregas em forma de leque ou de pregas em combinação com elementos de transição pode ser aplicado a outras estruturas de pá que podem não incluir as longarinas descritas acima. Em outro exemplo, o arranjo de pregas a  $+45^\circ$ ,  $-45^\circ$  descrito acima pode ser usado para “direcionar” cargas (por exemplo, distribuir mais uniformemente o carregamento nos furos de parafuso 182) nas pás 110 que não incluem as longarinas 170, ou nas pás 110 que incluem longarinas ou outras estruturas arranjadas diferentemente daquelas descritas acima.

[0067] A Figura 8A é uma vista de perfil lateral, parcialmente esquemática, de um conjunto de fabricação 801 da pá de turbina 110 configurado de acordo com um modo de realização da invenção, e a Figura 8B é uma vista de extremidade ampliada tomada ao longo da linha 8B-8B na Figura 8A, que ilustra uma nervura representativa 142 suportada por uma escora de ferramenta 802. Com referência às Figuras 8A e 8B, em conjunto, o conjunto de fabricação 801 inclui uma pluralidade de nervuras 142 suportadas por escoras de ferramenta individuais 802 em localizações apropriadas ao longo da envergadura. Como explicado acima, a pá de turbina 110 inclui um segmento de pá 116a a bordo, ou primeiro segmento de pá 116a, um segmento intermediário ou segundo segmento 116b da pá, e um segmento externo ou terceiro segmento de pá 116c. No modo de realização ilustrado, a segunda longarina 170b (por exemplo, a longarina inferior ou a longarina de “pressão”) foi montada nas nervuras 142. A longarina 170b inclui uma porção a bordo ou primeira porção de longarina 871a, um porção de longarina intermediária ou segunda porção de longarina 871b, e uma porção externa ou

terceira porção de longarina 871c.

[0068] Com referência, em seguida, à Figura 8B, como explicado acima com referência à Figura 5D, as nervuras 142 incluem uma pluralidade de recortes 148 configurados para receber os membros de acoplamento de treliça 150 correspondentes. Mais particularmente, no modo de realização ilustrado, a nervura representativa 142 inclui um primeiro recorte 148a configurado para receber a primeira longarina 170a (por exemplo, a longarina de sucção; não mostrada nas Figuras 8A ou 8B), um segundo recorte 148b configurado para receber a segunda longarina 170b (por exemplo, a longarina de pressão), e um terceiro recorte 148c configurado para receber a terceira longarina 170c (por exemplo, a longarina traseira; igualmente não mostrada nas Figuras 8A ou 8B). Como descrito abaixo em maior detalhe, em vários modos de realização, uma ou mais das longarinas 170 podem ser fabricadas laminando-se uma pluralidade de camadas de compósitos pré-fabricadas, ou por “extrusões por tração” conjuntas, em posição sobre o conjunto de fabricação 801. Detalhes adicionais destes modos de realização são descritos abaixo em maior detalhe em relação à Figura 9A-16.

[0069] As Figuras 9A-9C são uma série de vistas isométricas ampliadas, parcialmente esquemáticas, da porção de longarina a bordo 871a, da porção de longarina intermediária 871b, e da porção de longarina externa 871c, configuradas de acordo com modos de realização da invenção. Com referência, primeiramente, à Figura 9A, no modo de realização ilustrado, a longarina 170b pode ser fabricada de uma pluralidade de camadas 972 (identificadas individualmente como as camadas 972a-o) que são ligadas ou, de outra maneira, mutuamente laminadas, no lugar, no conjunto de fabricação 801 (Figura 8A). Em modos de realização particulares, as camadas 972 podem incluir materiais de compósitos pré-fabricados, como extrusões por tração ou “Planck” de materiais de compósitos extrudados por tração. Como é sabido, extrusão por tração de compósito é um processo de fabricação que

cria produtos de polímero ou de resina reforçados com fibra tendo características de forma, resistência e resiliência relativamente consistentes. Em um processo de extrusão por tração típico, o material de reforço (por exemplo, fibras unidirecionais, cabos, cabo trançado, fita etc., de fibras de vidro, fibras de aramida, fibras de carbono, fibras de grafita, fibras de Kevlar, e/ou de outro material) é arrastado através de um banho da resina (por exemplo, um banho de resina líquida termo curável de resina de epóxi, resina de vinil éster, resina de poliéster, plástico). O elemento fibroso, úmido, é, em seguida, puxado através uma matriz de aço aquecida, na qual o controle exato de temperatura cura a resina e modela o material no perfil desejado. As extrusões por tração, podem, então, ser cortadas no comprimento desejado para o uso. A resistência, cor e outras características podem ser projetadas no perfil por mudanças na mistura da resina, materiais de reforço, perfis de matriz, e/ou outros parâmetros de fabricação.

[0070] No modo de realização ilustrado, as camadas 972 podem ser formadas de plancks extrudados por tração tendo seções transversais geralmente retangulares. Em um modo de realização, por exemplo, as camadas 972 podem ter larguras de seção transversal de, aproximadamente, 5,08cm a, aproximadamente, 30,48cm, ou de, aproximadamente, 10,16cm a, aproximadamente, 25,4cm, e espessuras de seção transversal de, aproximadamente, 0,205cm a, aproximadamente 1,27cm, ou a, aproximadamente, 0,635cm. Em outros modos de realização, as camadas 972 podem ter outras formas e tamanhos. Em modos de realização particulares, as camadas 972 podem ser fornecidas pela Creative Pultrusions, Inc., 214 Industrial Lane, Alum Bank, PA 15521. Em outros modos de realização, as camadas 972 podem ser compreendidas de outros tipos de materiais extrudados por tração, bem como, de outros tipos de materiais de compósitos incluindo ambos, materiais de compósitos pré-fabricados e acamados manualmente. Em ainda outros modos de realização, os métodos de

fabricação das longarinas de pá de turbina descritos aqui podem ser implementados usando-se outros tipos de materiais laminados. Estes materiais podem incluir, por exemplo, madeira (por exemplo, madeira de balsa, compensado etc.), metais (por exemplo, alumínio, titânio etc.), bem como, combinações de madeira, metais, compósitos etc.

[0071] Com referência, ainda, à Figura 9A, a porção de longarina a bordo 871a inclui uma porção de extremidade a bordo 979a e uma porção de extremidade externa 979b. Cada uma das porções de extremidade inclui um arranjo escalonado de camadas 972. Por exemplo, com referência à porção de extremidade externa 979b, cada uma das camadas 972 inclui uma terminação correspondente 973 (identificada individualmente como as terminações 973a-o) que é escalonada em relação às terminações adjacentes 973 para formar as projeções 974 e os rebaixos correspondentes 975. Além disso, em vários modos de realização, as camadas 972 podem ser afuniladas em direção às terminações 973 nas porções de extremidade 979. Como descrito abaixo em maior detalhe, este arranjo das projeções 974 e rebaixos 975 alternados facilita a união da primeira porção de longarina 871a à segunda porção de longarina 871b em uma junção de sobreposição muito eficiente com uma linha de ligação em ziguezague.

[0072] Com referência, em seguida, à Figura 9B, a segunda porção de longarina 871b também é compreendida de uma pluralidade de camadas 972 tendo terminações 973 que são escalonadas para criar um arranjo de projeções 974 e rebaixos correspondentes 975 alternados. Como a primeira porção de longarina 871, a segunda porção de longarina 871b inclui uma porção de extremidade a bordo 979c e uma porção de extremidade externa 979d. Entretanto, como ilustrado na Figura 9B, a segunda porção de longarina 871b se torna mais fina (isto é, afunila na espessura) em direção à porção de extremidade externa 979d. No modo de realização ilustrado, isto é conseguido pela terminação sucessiva das camadas externas 972 à medida que elas se

estendem para fora da porção de extremidade a bordo 979c. Este afunilamento gradual da longarina 170b pode ser feito para reduzir o peso e/ou para moldar a resistência da longarina 170b para as cargas estruturais reduzidas que ocorrem em direção à ponta da pá de turbina 110.

[0073] Com referência em seguida à Figura 9C, a terceira porção de longarina 871c inclui uma porção de extremidade a bordo 979c e uma porção correspondente de extremidade externa 979f. Como esta vista ilustra, a longarina 170b continua a se afunilar em direção à porção de extremidade externa 979f terminando várias camadas 972 à medida que elas se aproximam da porção de extremidade 979f.

[0074] As Figuras 9D e 9E incluem vistas laterais ampliadas, parcialmente esquemáticas, que ilustram detalhes adicionais da primeira porção de longarina 871a e da segunda porção de longarina 871b configuradas de acordo com um modo de realização da invenção. Além disso, estas Figuras igualmente ilustram várias características das porções de extremidade de algumas das camadas 972.

[0075] Como mostrado na Figura 9D, a porção de extremidade externa 979b da primeira porção de longarina 871a inclui uma pluralidade de projeções 974 e rebaixos correspondentes 975 alternados, formados pelas terminações escalonadas 973 das respectivas camadas 972. Como esta vista ilustra adicionalmente, as porções de extremidade das camadas 972 podem ser afuniladas gradualmente em direção à terminação 973 para facilitar e moldar, adicionalmente, às projeções 974/rebaixos 975 em rebaixos/projeções transicionando gradualmente. Por exemplo, no modo de realização ilustrado, os últimos 5,08cm a 15,24cm, ou, aproximadamente, os últimos 10,16cm de cada camada 972 podem ter um afunilamento de ambos os lados (se, por exemplo, for uma camada interna 972) ou um afunilamento em um único lado (se, por exemplo, for uma camada externa 972) para uma terminação 973 de, aproximadamente, 0,0cm a, aproximadamente, 0,18cm, ou, aproximadamente,

0,10cm.

[0076] Com referência, em seguida, à Figura 9E, a porção de extremidade interna 979c da segunda porção de longarina 871b inclui uma pluralidade de projeções 974 configuradas para se engatar nos rebaixos correspondentes 975 da porção de extremidade externa 979b da primeira porção de longarina 871a. Similarmente, a porção de extremidade a bordo 979c também inclui uma pluralidade dos rebaixos 975 configurados para receber as projeções correspondentes 974 da porção de extremidade externa 979b da primeira porção de longarina 871a. Por exemplo, durante a fabricação da longarina 170b, a primeira projeção 974a sobre a porção de extremidade externa 979b da primeira porção de longarina 871a é engatada no primeiro rebaixo correspondente 975a na porção de extremidade a bordo 979c da segunda porção de longarina 871b. Embora as respectivas porções de extremidade 979 sejam mutuamente engatadas desse modo durante a montagem da longarina 170b sobre o conjunto de fabricação 801 da Figura 8A, as porções de extremidade 979 que se casam não são mutuamente ligadas, realmente, neste momento, de modo que as seções de pá 116 (Figura 8A) podem ser separadas após a fabricação e transportadas individualmente para o local de instalação.

[0077] Como mostrado na Figura 9F, quando a porção de extremidade externa 979b da primeira porção de longarina 871a é finalmente unida à porção de extremidade a bordo 979c da segunda porção de longarina 871b, no local de instalação, as projeções 974 e os rebaixos 975 alternados criam uma sobreposição ou uma linha de ligação 976 em ziguezague. Como é conhecido por aqueles experientes na técnica, esta é uma junção estrutural muito eficiente, e pode evitar, ou pelo menos reduzir, a necessidade de outro reforço estrutural da junção entre a primeira porção de longarina 871a e a segunda porção de longarina 871b.

[0078] As Figuras 10A e 10C-10E são uma série de vistas de perfil

lateral, parcialmente esquemáticas, de uma porção do conjunto de fabricação 801 da Figura 8A, ilustrando vários estágios em um método de fabricação da longarina 170b, in situ, sobre a estrutura de treliça da pá de turbina 110, de acordo com um modo de realização da invenção. A Figura 10B é uma vista ampliada de extremidade tomada ao longo da linha 10B-10B na Figura 10A, ilustrando aspectos adicionais deste método de fabricação de longarina. Com referência, primeiramente, às Figuras 1A e 1OB, em conjunto, as nervuras 142 foram presas às suas escoras de ferramenta correspondentes 802, e uma pluralidade de membros de treliça 143 foi instalada (pelo menos temporariamente) entre os correspondentes membros de acoplamento de treliça 150. Cada membro de acoplamento de treliça 150, do modo de realização ilustrado, inclui uma primeira peça 1056a e uma segunda peça 1056b que se casa com a primeira. Como mostrado na Figura 10A, apenas a primeira peça 1056a é acoplada à estrutura de treliça durante a construção da longarina 170b. Como explicado abaixo mais detalhadamente, após todas as camadas de longarina 772 terem sido arranjadas corretamente sobre a primeira peça 1056a do membro de acoplamento de treliça 150, a segunda peça 1056b é engatada na posição e presa à primeira peça 1056a.

[0079] Com referência, em seguida, à Figura 10C, as camadas individuais de longarina 772 são colocadas sequencialmente na posição sobre a primeira peça 1056a do membro de acoplamento de treliça 150 de cada nervura 142. À medida que as camadas de longarina 772 são colocadas uma em cima da outra, as terminações 773 são posicionadas como mostrado nas Figuras 7A-7E para produzir o perfil desejado da longarina. Uma camada de adesivo (por exemplo, adesivo de epóxi, adesivo de resina autocurável etc.) pode ser aplicada a uma ou a ambas as superfícies de camadas adjacentes 772 que se casam. As camadas de longarina 772 podem ser mantidas temporariamente em posição, durante o processo de empilhamento, com braçadeiras 1002 (por exemplo, braçadeiras C e/ou outras braçadeiras

apropriadas conhecidas na técnica).

[0080] Com referência, em seguida, à Figura 10D, uma vez que todas as camadas 772 tenham sido arranjadas corretamente sobre as primeiras peças 1056a dos membros de acoplamento de treliça 150, as camadas 772 podem ser comprimidas durante o ciclo de cura de adesivo usando-se uma ferramenta de aperto apropriada, como o aparelho de compressão 1090 descrito abaixo em maior detalhe. Mais particularmente, uma pluralidade dos aparelhos de compressão 1090 podem ser posicionados sobre a porção de longarina 871 entre as nervuras 142 para comprimir o conjunto de camadas 972 durante o processo de cura. O aparelho de compressão 1090 é descrito abaixo em maior detalhe com referência às Figuras 12A-15.

[0081] Com referência, em seguida, à Figura 10E, uma vez o adesivo entre as camadas 972 tenha sido curado, as segundas peças 1056b de cada um dos membros de acoplamento de treliça 150 podem ser instaladas sobre a estrutura de treliça e unidas às primeiras peças correspondentes 1056a com fixadores com roscas e/ou outros métodos apropriados. Em um modo de realização, o adesivo pode ser aplicado entre as superfícies da primeira peça 1056a e a porção de longarina 871 que se casam, e/ou entre a segunda peça 1056b e a porção de longarina 871, para ligar a porção de longarina 871 aos respectivos membros de acoplamento de treliça 150. Em outros modos de realização, este adesivo pode ser omitido.

[0082] A Figura 11A é uma vista isométrica ampliada de uma porção da estrutura de treliça da pá de turbina 110, e a Figura 11B é uma vista de extremidade de uma nervura representativa 142 ilustrando aspectos das longarinas 170 instaladas. Em um modo de realização, a segunda peça 1056b do membro do acoplamento de treliça 150 pode ser casada à primeira peça 1056a deslizando-se a segunda peça 1056b lateralmente para o recorte 148. Para este procedimento, as porções de extremidade dos membros de treliça 143 podem ser destacadas temporariamente das porções de acoplamento de

treliça 1154 correspondentes ao membro de acoplamento de treliça 150. Uma vez que ambas as peças 1056 do membro de acoplamento de treliça 150 estejam em suas respectivas posições, as porções de extremidade dos membros de treliça 143 podem ser rejuntadas às porções de acoplamento de treliça 1154. Em um modo de realização, as porções de extremidade dos membros de treliça 143 e as porções de acoplamento de treliça correspondentes 1154 podem ser perfuradas com furos piloto subdimensionados e, em seguida, perfurados no tamanho normal durante a montagem final. Além disso, as porções de extremidade dos membros de treliça 143 podem ser acopladas às porções de acoplamento de treliça 1154 por fixadores 859, congelados antes da instalação nos furos de fixação correspondentes, de modo que se expandam para um engate por pressão após a instalação. Em outros modos de realização, os membros de treliça 143 podem ser acoplados aos membros de acoplamento de treliça 150 usando-se outros métodos apropriados conhecidos na técnica.

[0083] A Figura 11C é uma vista isométrica, parcialmente esquemática, de uma porção do conjunto de fabricação 801 após a longarina 170b ter sido inteiramente montada e instalada sobre a estrutura de treliça da pá de turbina 110. Com referência às Figuras 11A e 11C, em conjunto, embora as porções de extremidade 979 da segunda porção de longarina 871b e a terceira porção de longarina 871c, que se casam, sejam montadas no local para assegurar que se engatem perfeitamente, em conjunto, durante a montagem final, as porções de extremidade 979 não são ligadas durante a fabricação da treliça. Isto permite que a segunda seção de pá 116b e a terceira seção de pá 116c sejam separadas uma da outra na instalação de fabricação para o transporte até o local de instalação. Consequentemente, no modo de realização ilustrado, as porções de extremidade 979 das porções de longarina 871 não são mutuamente ligadas durante o processo de fabricação, mas formam, em vez disso, junções de separação 1120 onde as longarinas 170 serão mutuamente

unidas quando a pá de turbina 110 for montada no local. Em um modo de realização, as longarinas podem ser mutuamente unidas no local usando-se os sistemas e os métodos descritos em detalhe no pedido de patente provisório US 61/180.816, solicitado aos 22 de maio de 2009 e aqui incorporado em sua totalidade, pela referência.

[0084] A Figura 12A é uma vista isométrica do aparelho de compressão 890 configurado de acordo com um modo de realização da invenção, e a Figura 12B é uma vista isométrica, parcialmente explodida, do aparelho de compressão 1090. Com referência às Figuras 12A e 12B, em conjunto, o aparelho de compressão 1090 inclui uma primeira porção de ferramenta 1250a e uma segunda porção de ferramenta 1250b. No modo de realização ilustrado, as porções de ferramenta 1250 são imagens espelhadas uma da outra, ou são pelo menos muito similares uma à outra. Cada porção de ferramenta 1250 inclui uma placa de suporte 1254 e flanges laterais opostos 1256 (identificados individualmente como um primeiro flange lateral 1256a e um segundo flange lateral 1256b) que se estendem a partir da mesma. Como descrito abaixo em maior detalhe, as porções de ferramenta 1250 são configuradas para se engatarem mutuamente em um arranjo de concha em torno de uma porção da longarina laminada 170 para compactar e comprimir o conjunto de camadas de longarina (por exemplo, as camadas 772) enquanto o adesivo entre as camadas cura. Mais particularmente, cada uma das porções de ferramenta 1250 inclui um ou mais membros expansíveis 1258 configurados para se expandir para dentro a partir da placa de sustentação 1254 para, desse modo, comprimir a seção de longarina correspondente durante o processo de cura. No modo de realização ilustrado, o primeiro flange lateral 1256a é um tanto mais largo do que o segundo flange lateral 1256b, de modo que os flanges que se casam 1256 possam se sobrepor e serem presos temporariamente com fixadores 1252 (por exemplo, fixadores com roscas, como cavilhas, parafusos etc.) durante o processo de compressão

e cura. Cada porção de ferramenta 1250 também pode incluir uma primeira porção de extremidade 1261 e uma segunda porção de extremidade oposta 1262. Podem ser providas empunhaduras 1253 nas porções de extremidade 1261 e 1262 para facilitar a colocação, instalação e/ou remoção manuais das porções de ferramenta 1250. As porções de ferramenta 1250 podem ser fabricadas de vários materiais que tenham a resistência, rigidez, e características de fabricação suficientes. Por exemplo, em um modo de realização, as porções de ferramenta 1250 podem ser formadas de alumínio usinado, soldado, ou formado, de outra maneira, na forma desejada. Em outros modos de realização, as porções de ferramenta 1250 podem ser fabricadas de outros metais apropriados compreendendo aço, bronze etc., bem como, de materiais não metálicos apropriados, como materiais de compósitos.

[0085] A Figura 13A é uma vista isométrica explodida da primeira porção de extremidade 1261 da primeira porção de ferramenta 1250a, e a Figura 13B é uma vista isométrica ampliada da segunda porção de extremidade 1262. Com referência, primeiramente, à Figura 13A, cada porção de ferramenta 1250 inclui um manifold 1360 para carregar e descarregar os membros expansíveis 1258 com um fluido (por exemplo, ar comprimido). No modo de realização ilustrado, um duto 1368 (identificados individualmente como os dutos 1368a-c) se estende entre cada membro expansível 1258 e um acessório de carregamento/drenagem 1366. O acessório de carregamento/drenagem 1366 pode incluir um orifício com roscas 1370, ou outra característica (por exemplo, um acoplamento a ar de alta pressão) configurada para receber um acessório correspondente para escoar fluido para os respectivos membros expansíveis 1258 através dos dutos 1368. Em um modo de realização, por exemplo, os membros expansíveis 1258 podem ser carregados com ar comprimido para expandi-los e, desse modo, comprimir o conjunto de camadas da longarina 170 durante o ciclo de cura. Em outros modos de realização, os membros expansíveis 1258 podem ser carregados

com outros tipos de gás ou líquidos (por exemplo, água, óleo etc.) para expandi-los e para comprimir o conjunto de camadas de longarina.

[0086] As porções de extremidade proximal dos membros expansíveis 1258 podem incluir um fechamento de extremidade 1364 para vedar o membro expansível 1258 e manter a pressão. No modo de realização ilustrado, os fechamentos de extremidade 1364 podem incluir duas ou mais placas que imprensam a porção de extremidade do membro expansível 1258 entre elas, de modo a impedir vazamento. Em outros modos de realização, outras estruturas e sistemas podem ser usados para vedar as porções de extremidade proximal dos membros expansíveis 1258. Como mostrado na Figura 13B, as porções de extremidade distal dos membros expansíveis 1258 podem ser fechadas e vedadas com uma placa de fechamento de extremidade apropriada 1365 fixada à placa de suporte 1254 com uma pluralidade dos fixadores 1352. Em outros modos de realização, as porções de extremidade dos membros expansíveis 1258 podem ser fixadas à porção de ferramenta 1250 e/ou fechadas e vedadas usando-se outros meios apropriados.

[0087] A Figura 14A é uma vista isométrica ampliada da segunda porção de ferramenta 1250b, e a Figura 14B é uma vista isométrica parcialmente explodida da segunda porção de ferramenta 1250b. Com referência à Figura 14B, cada um dos membros expansíveis 1258 pode incluir uma estrutura tubular flexível compreendida por uma camada externa 1430 e uma camada interna 1432.

[0088] A camada externa 1430 pode incluir um material apropriado para prover resistência ao membro expansível 1258, e a camada interna 1432 pode incluir um material apropriado para vedar o membro expansível 1258. Por exemplo, a camada de vedação interna 1432 pode incluir um revestimento de borracha, e a camada externa 1430 pode incluir nylon tecido, fibra de vidro etc. Consequentemente, em um modo de realização, o membro expansível 1258 pode incluir uma estrutura que seja pelo menos similar, de modo geral,

na estrutura e na função a uma mangueira de incêndio. Em outros modos de realização, os membros expansíveis 1258 podem incluir outros materiais e ter outras estruturas.

[0089] Figura 15 é uma vista de extremidade ampliada tomada substancialmente ao longo da linha 15-15, na Figura 10D, ilustrando o uso do aparelho de compressão 1090, de acordo com um modo de realização da invenção. Nesta vista, as camadas de longarina 972 foram posicionadas apropriadamente sobre a subestrutura de treliça, com adesivo de ligação entre as camadas. A primeira porção de ferramenta 1250a foi posicionada sobre um lado da longarina 170, e a segunda porção de ferramenta 1250b foi posicionada sobre o outro lado. Cada primeiro flange 1256a de cada porção de ferramenta 1250 sobrepõe o segundo flange correspondente 1256b da porção de ferramenta oposta 1250. Uma vez que as duas porções de ferramenta 1250 tenham sido posicionadas corretamente, as porções de ferramenta 1250 são acopladas temporariamente com os fixadores 1252. Uma fonte de pressão (por exemplo uma fonte de ar comprimido) é, então, acoplada ao manifold 1360 sobre cada porção de ferramenta 1250, e os membros expansíveis 1258 são expandidos a uma pressão suficiente. À medida que se expandem, os membros expansíveis 1258 proveem uma pressão uniforme distribuída sobre a longarina laminada 170. A pressão pode ser modulada como necessário para prover um nível desejado de compactação e de compressão durante o processo de cura. Além disso, um saco de vácuo apropriado, ou outra camada protetora de película fina, pode ser envolvido em torno da longarina 170 para evitar a entrada de adesivo no aparelho de compressão 1090. Depois que a longarina 170 foi curada apropriadamente, o aparelho de compressão 1090 pode ser desmontado aliviando-se a pressão nos membros expansíveis 1258 e removendo-se os fixadores 1252.

[0090] Os métodos e sistemas descritos acima em detalhe podem ser usados para montar, in situ, um longarina de pá de turbina eólica em um

subconjunto de fabricação, de acordo com modos de realização da invenção. Mais particularmente, diversos modos de realização da invenção foram descritos acima, em detalhe, para a fabricação de longarinas laminadas usando-se materiais de compósitos extrudados por tração, como "plancks" de compósitos extrudados por tração. Há numerosas vantagens associadas a alguns destes modos de realização. Estas vantagens podem incluir, por exemplo, pás de turbina eólica mais baratas e mais leves em comparação às técnicas de fabricação convencionais. Além disso, o uso de extrusões por tração pode reduzir variações dimensionais nas peças acabadas.

[0091] Em determinados modos de realização, outras estruturas de pá de turbina, como cascos externos, nervuras, membros de treliça etc., podem ser formadas de materiais de compósitos extrudados por tração. Por exemplo, em um modo de realização, os cascos podem ser formados de um ou mais membros de compósitos extrudados por tração (por exemplo, folhas) que são laminados em conjunto. Em outros modos de realização, os membros de treliça podem ser formados por extrusão por tração de compósitos. Consequentemente, os métodos e sistemas aqui apresentados para formar estruturas de pá de turbina de materiais extrudados por tração não são limitados ao uso com longarinas de pá de turbina ou coberturas de longarina, mas também podem ser usados para formar outras estruturas de pá de turbina.

[0092] Entretanto, em outros modos de realização, as longarinas de pá de turbina e/ou outras estruturas de pá, como as longarinas 170 descritas aqui, podem ser fabricadas de materiais de compósitos extrudados por tração usando-se uma ferramenta de produção apropriada. A Figura 16, por exemplo, ilustra uma ferramenta 1610 tendo uma superfície de molde 1612 com um contorno apropriado para a longarina 170b. Para fabricar a longarina 170b sobre a ferramenta 1610, as camadas 972 (por exemplo, plancks extrudados por tração) são posicionadas sequencialmente sobre a superfície de molde 1612. Pinos de ferramenta 1614 e/ou outros localizadores podem ser usados

para posicionar com precisão as camadas 972. As camadas 972 podem ser pré-cortadas nos comprimentos apropriados de modo que, quando arranjadas sobre a superfície de ferramenta 1612, as respectivas porções de extremidade 979 formem a união em ziguezague desejada, ou dedos de sobreposição. Embora, nesse momento, nenhum adesivo seja usado entre as porções de extremidade 979 que se casam, cada camada 972 é coberta com adesivo antes da instalação sobre a ferramenta 1610. Depois que todas as camadas 972 foram colocadas sobre a superfície de ferramenta 1612, o arranjo em camadas pode ser embalado a vácuo para extrair o ar do laminado e comprimir o conjunto de camadas 972. A longarina pode ser curada na temperatura ambiente, ou o pode ser aplicado calor através de uma autoclave ou de outros meios, se desejado para o adesivo particular usado.

[0093] Do antecedente, deve ser notado que foram descritos aqui modos de realização específicos a título de ilustração, mas que a invenção também pode incluir outros modos de realização. Por exemplo, as características descritas acima com referência à Figura 7A, no contexto de quatro longarinas se estendendo ao longo da envergadura, podem ser aplicadas a pás de turbina eólica tendo outros números de longarinas, incluindo três longarinas. Além disso, as estruturas de treliça descritas acima podem ter arranjos diferentes daqueles mostradas especificamente nas Figuras. Os acoplamentos entre longarinas, nervuras, e membros de treliça podem ter arranjos diferentes daqueles descritos acima. Determinados aspectos da invenção descritos no contexto de modos de realização particulares podem ser combinados ou eliminados em outros modos de realização. Além disso, enquanto as vantagens associadas a determinadas modos de realização foram descritas no contexto daqueles modos de realização, outros modos de realização também podem apresentar estas vantagens e, nem todos os modos de realização precisam, necessariamente, apresentar estas vantagens para cair dentro do escopo da invenção. Consequentemente, a invenção pode incluir outros

modos de realização não explicitamente mostrados ou descritos acima. Por conseguinte, a invenção não é limitada, exceto pelas reivindicações anexas.

## REIVINDICAÇÕES

### 1. Pá de turbina eólica (110) que compreende:

uma superfície aerodinâmica externa (115) tendo um eixo ao longo da envergadura se estendendo longitudinalmente, um eixo ao longo da linha se estendendo transversalmente ao eixo ao longo da envergadura, e um eixo de espessura se estendendo transversalmente a ambos os eixos ao longo da linha e ao longo da envergadura, caracterizada pelo fato de compreender:

uma pluralidade de longarinas se estendendo longitudinalmente (170) provendo suporte interno à superfície aerodinâmica (115), em que pelo menos uma das longarinas inclui um laminado de material compósito pré-curado, o laminado de material compósito pré-curado incluindo:

uma pluralidade de camadas de compósito pré-curado (972) empilhadas, cada uma das camadas de compósito pré-curado incluindo uma extrusão por tração de compósito pré-curado; e,

uma pluralidade de camadas adesivas interpostas entre camadas de compósito pré-curado (972) adjacentes.

2. Pá de turbina eólica de acordo com a reivindicação 1, caracterizada pelo fato de cada uma das camadas de compósito pré-curado (972) incluir um produto de resina reforçada por fibra pré-curada.

3. Pá de turbina eólica de acordo com a reivindicação 1, caracterizada pelo fato de a superfície aerodinâmica (115) definir uma seção transversal de aerofólio, em que a pluralidade de longarinas se estendendo longitudinalmente (170) incluem uma longarina de pressão (170b) e uma longarina de sucção (170a) espaçadas uma da outra ao longo do eixo de espessura, e uma longarina para trás (170c) espaçada de ambas as longarinas de pressão e sucção ao longo do eixo ao longo da linha, e em que cada uma das longarinas de pressão, sucção e para trás são constituídas de um laminado de extrusões por tração de compósito pré-curado (972).

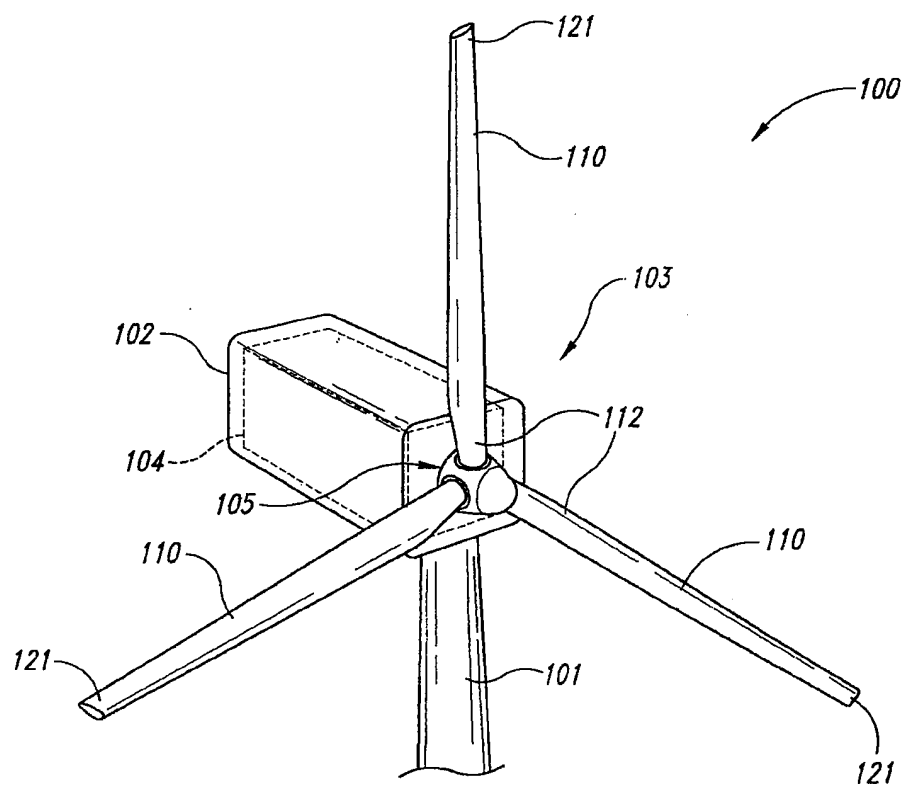
4. Pá de turbina eólica de acordo com a reivindicação 1,

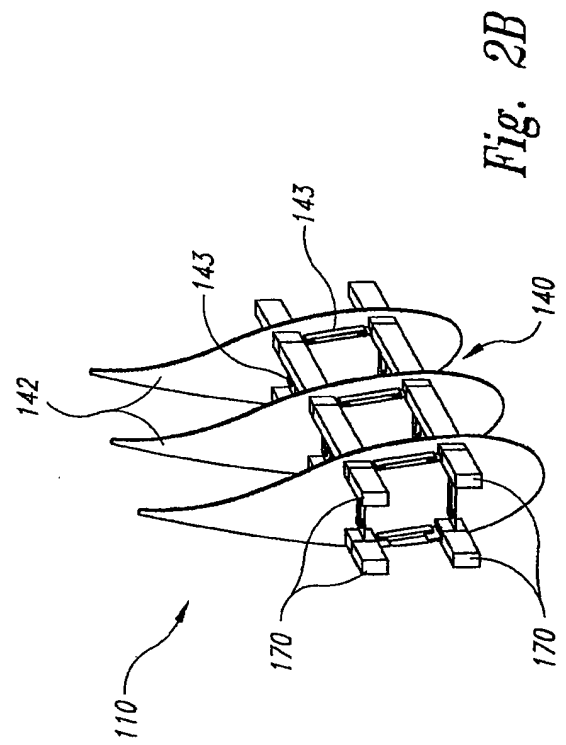
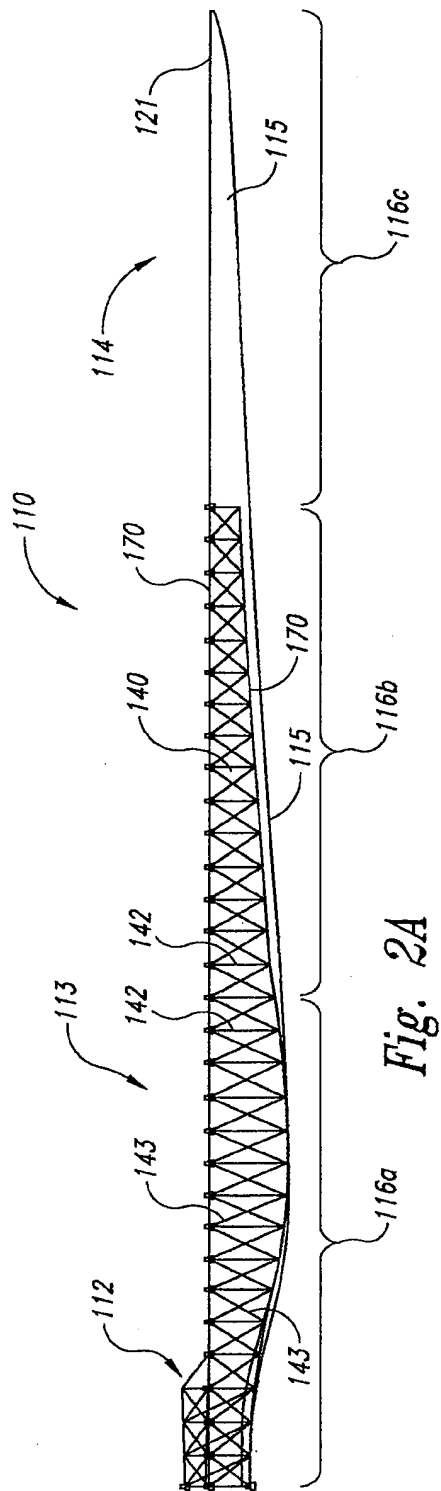
caracterizada pelo fato de compreender adicionalmente uma faixa (177) presa circunferencialmente em torno da pluralidade de camadas de compósito pré-curado (972).

5. Pá de turbina eólica de acordo com a reivindicação 1, caracterizada pelo fato de compreender adicionalmente:

uma pluralidade de nervuras espaçadas longitudinalmente (142); e

uma pluralidade de membros de acoplamento de treliça (150), em que cada um dos membros de acoplamento de treliça inclui uma primeira peça (156a) e uma correspondente segunda peça (156b), em que cada uma das primeiras peças é acoplada à correspondente segunda peça para prender uma porção das camadas de compósito pré-curado (972) juntas entre si, e em que pelo menos uma da primeira peça e da segunda peça de cada membro de acoplamento de treliça é acoplada a uma das nervuras longitudinalmente espaçadas (142).

*Fig. 1*



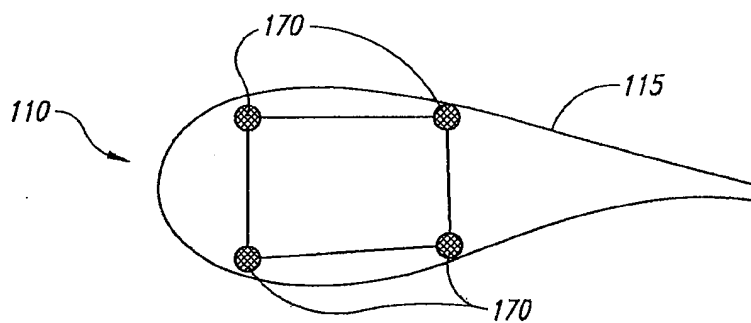


*Fig. 2C*

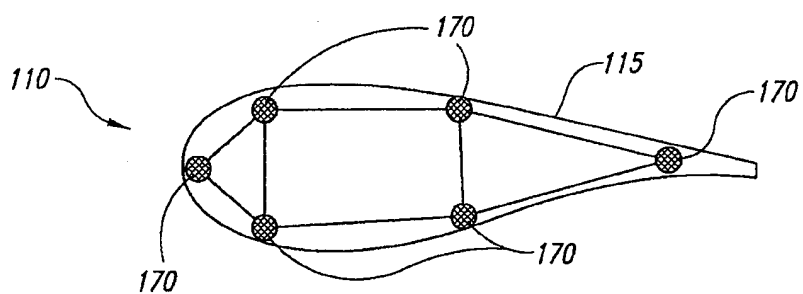


*Fig. 2D*

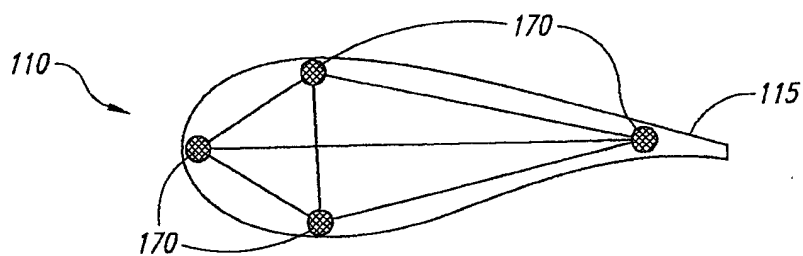


*Fig. 2E*

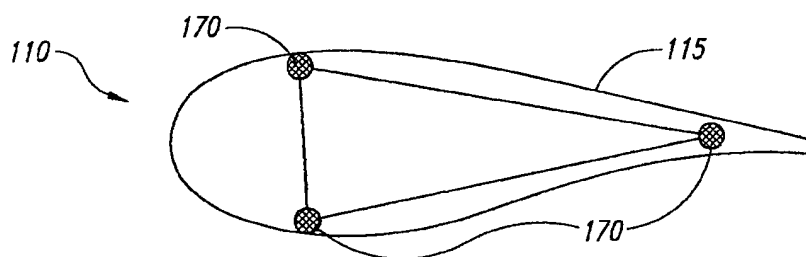


*Fig. 2F*

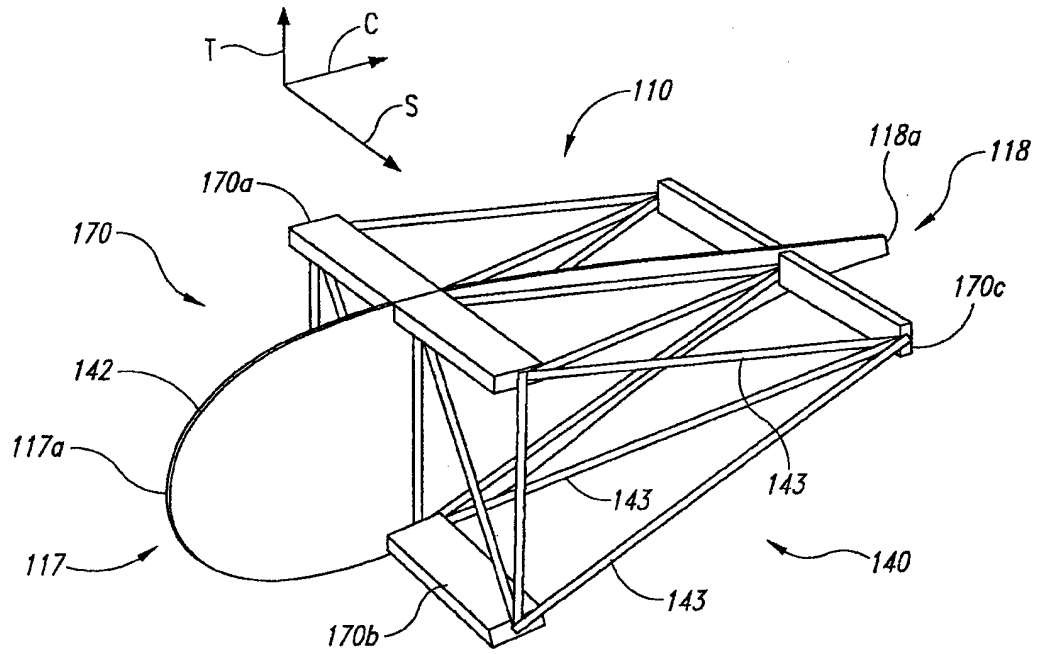


Fig. 3

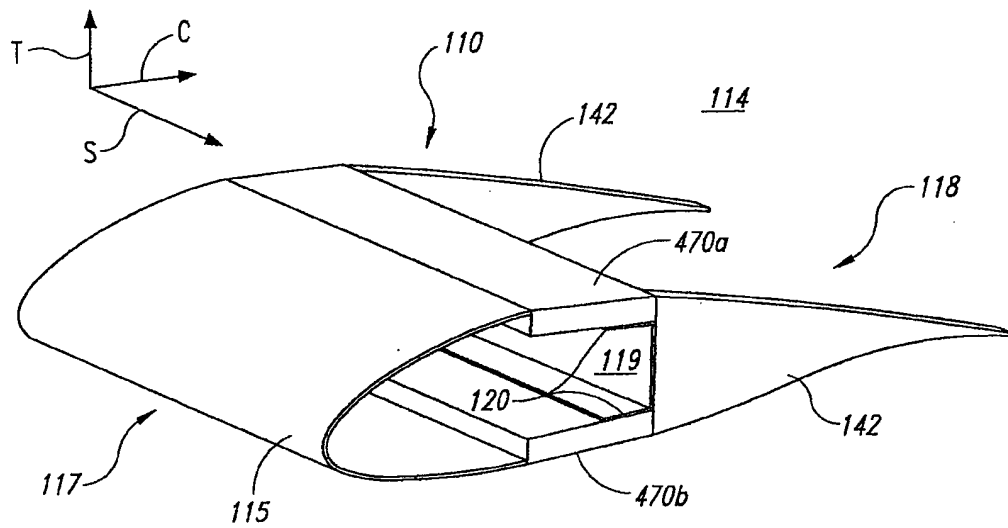
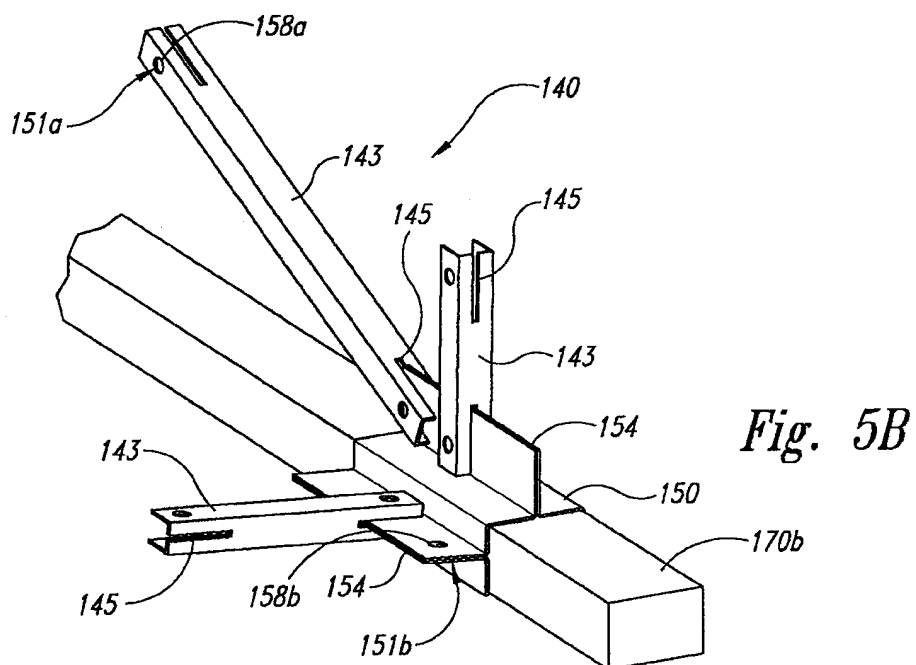
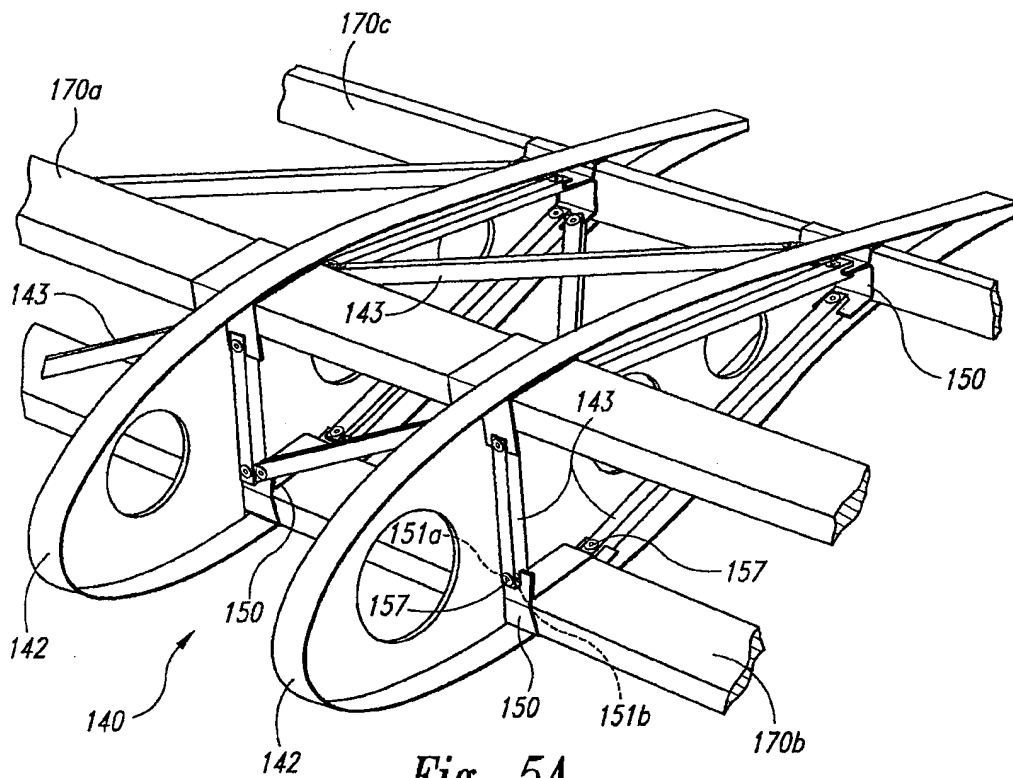
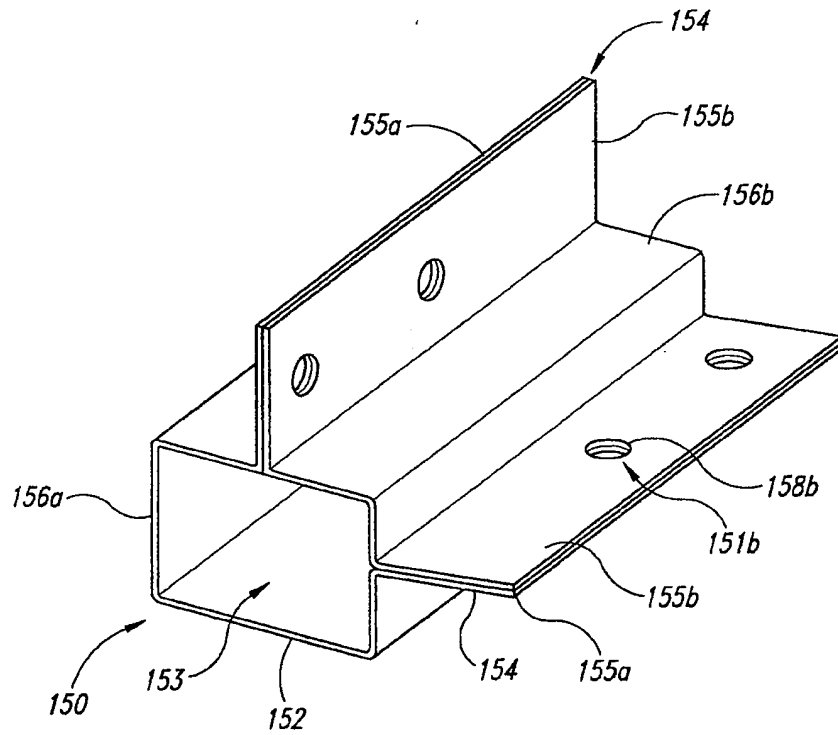
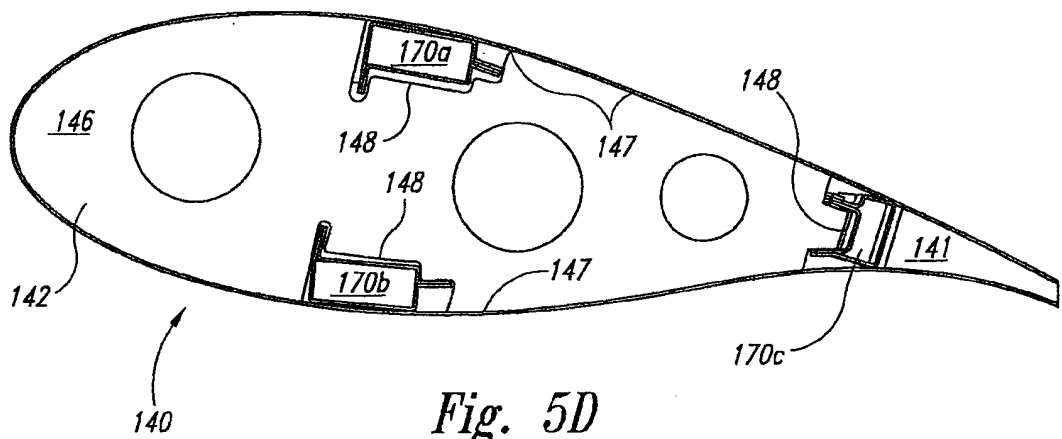
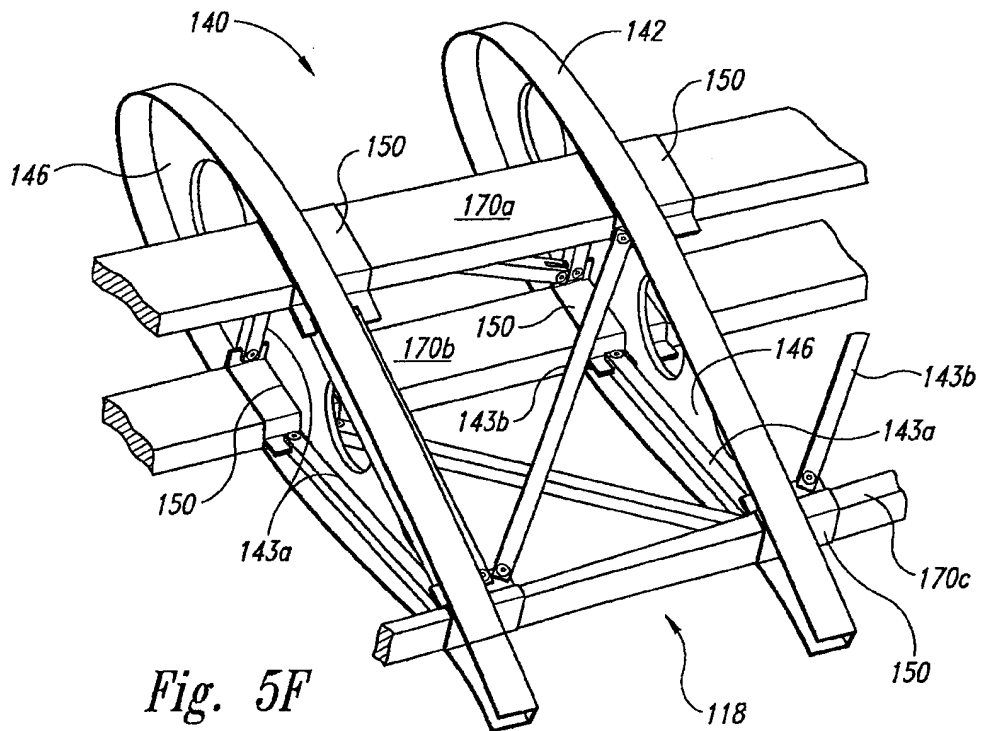
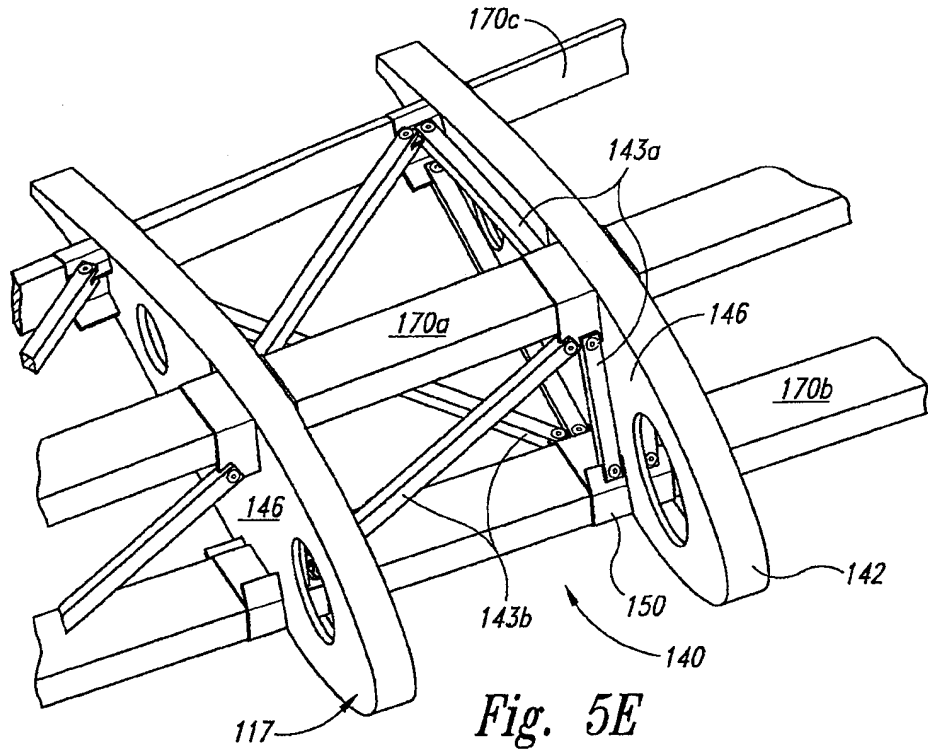


Fig. 4



*Fig. 5C**Fig. 5D*



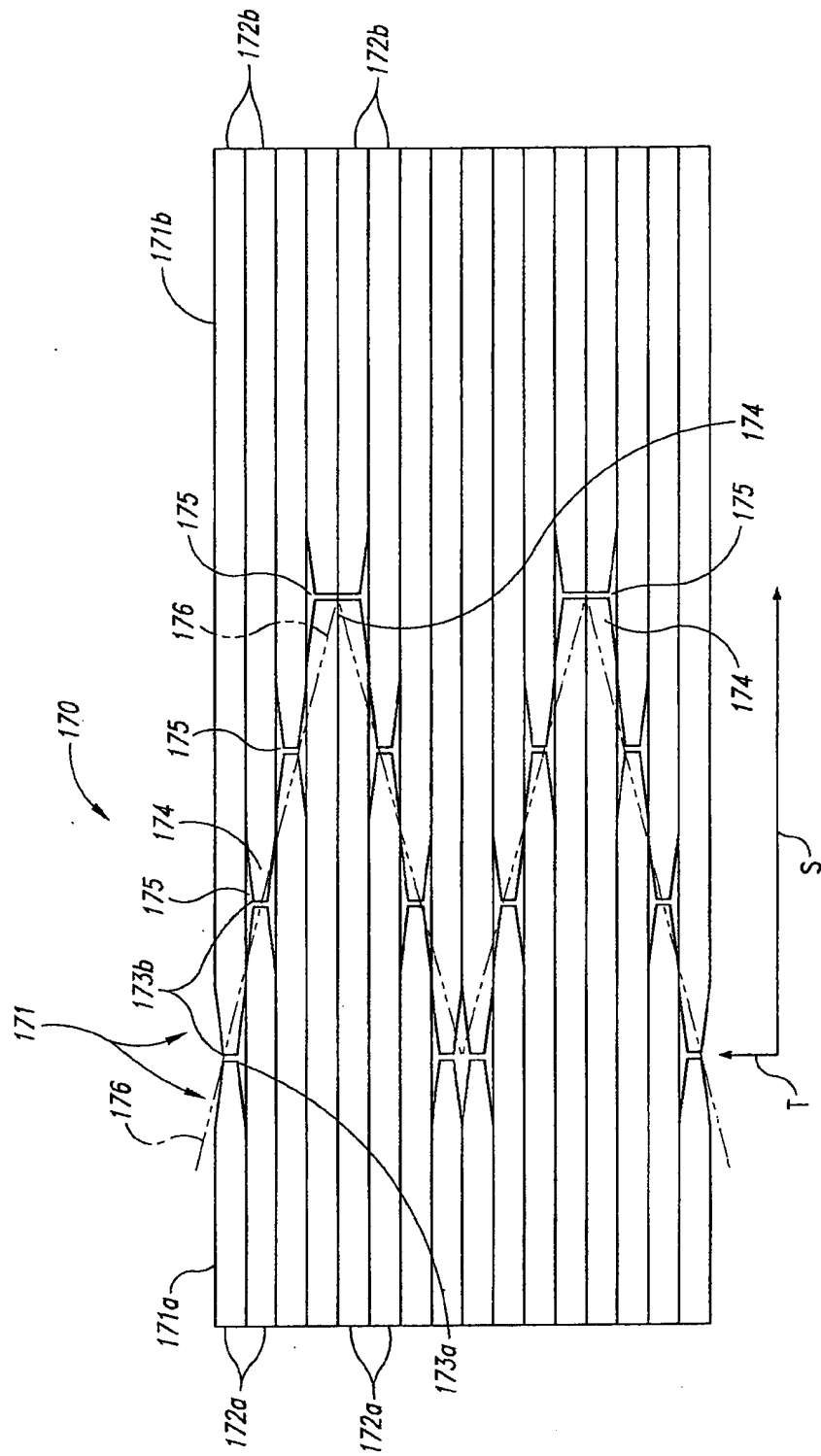


Fig. 6A

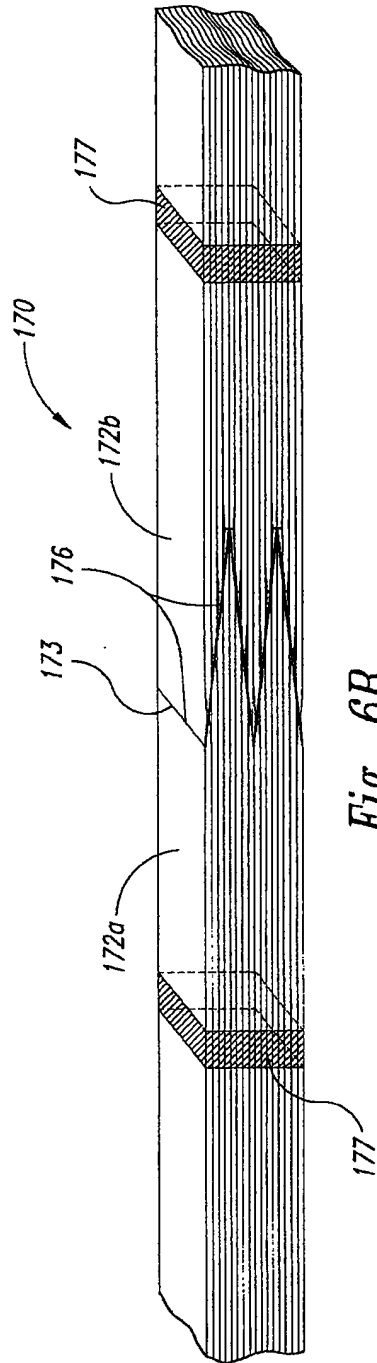


Fig. 6B

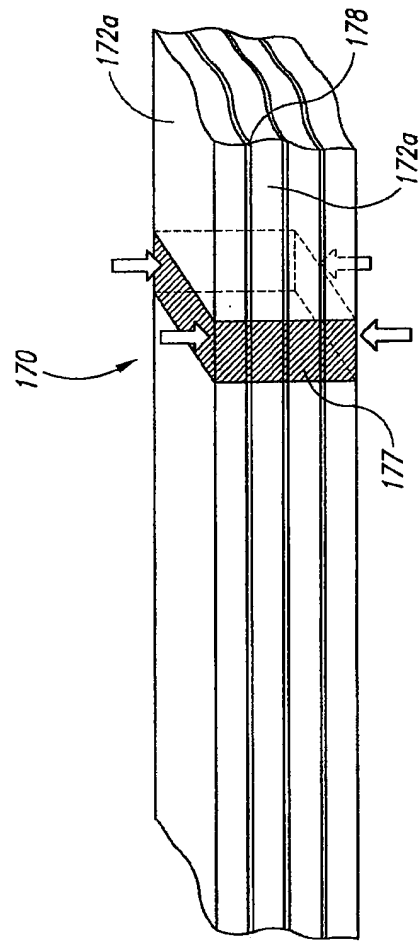


Fig. 6C

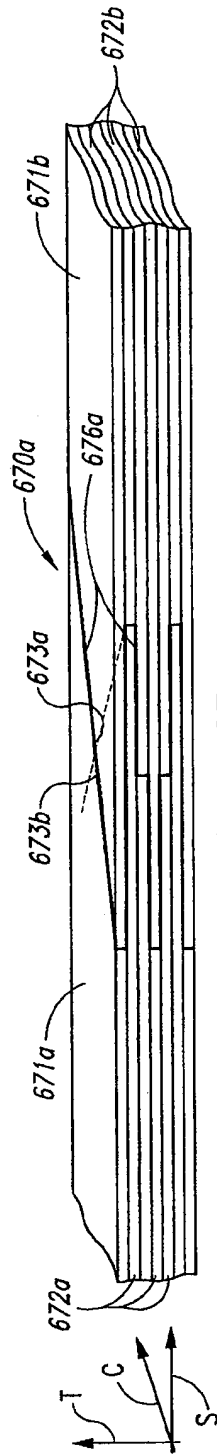


Fig. 6D

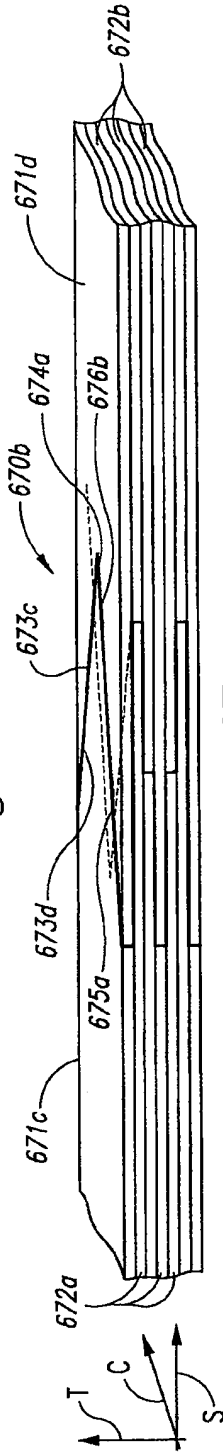


Fig. 6E

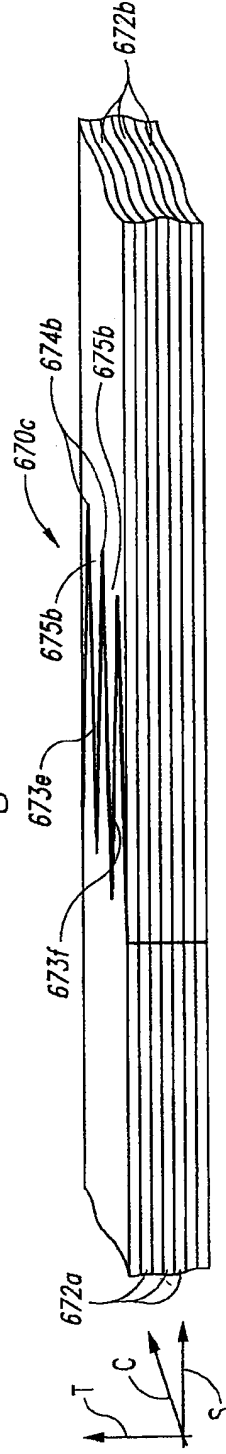


Fig. 6F

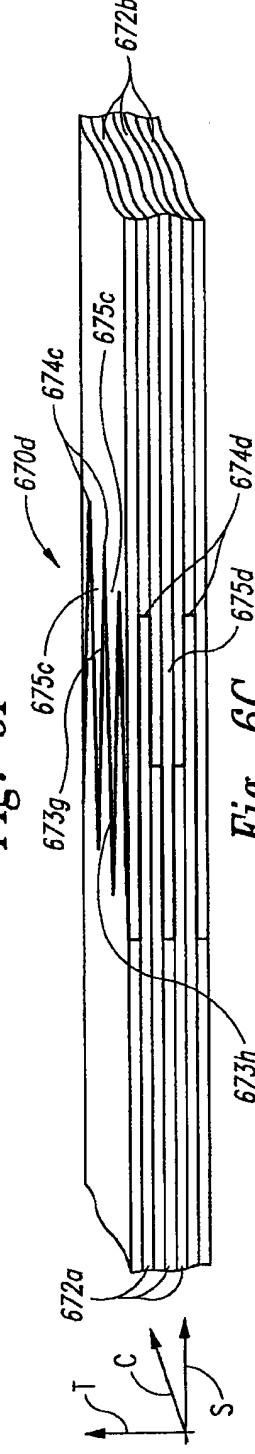
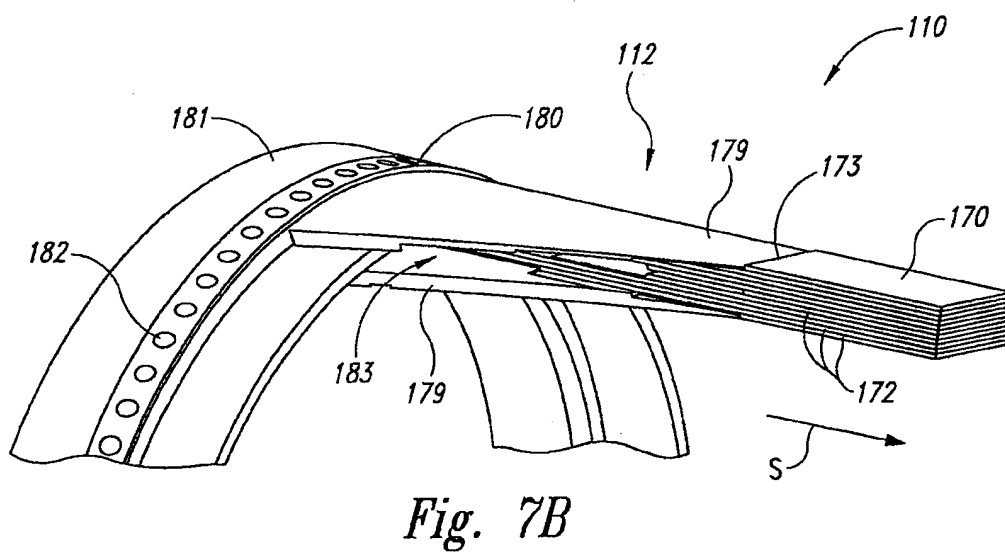
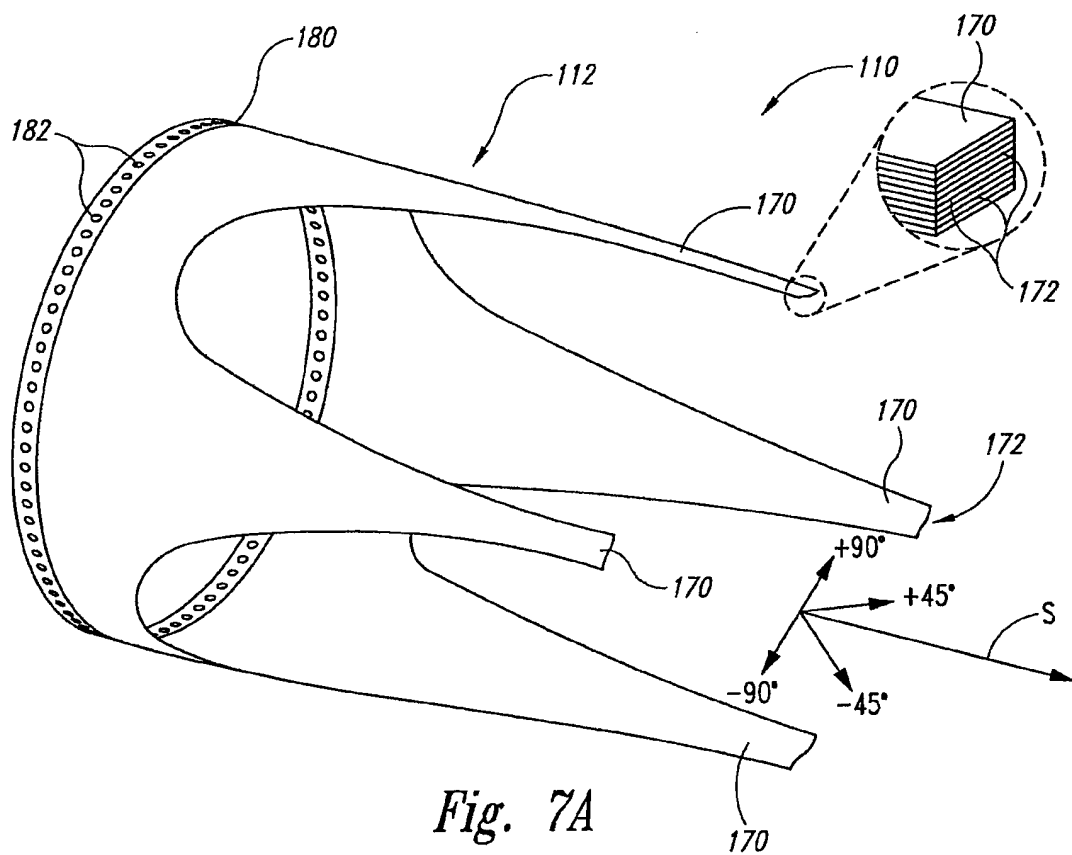


Fig. 6G



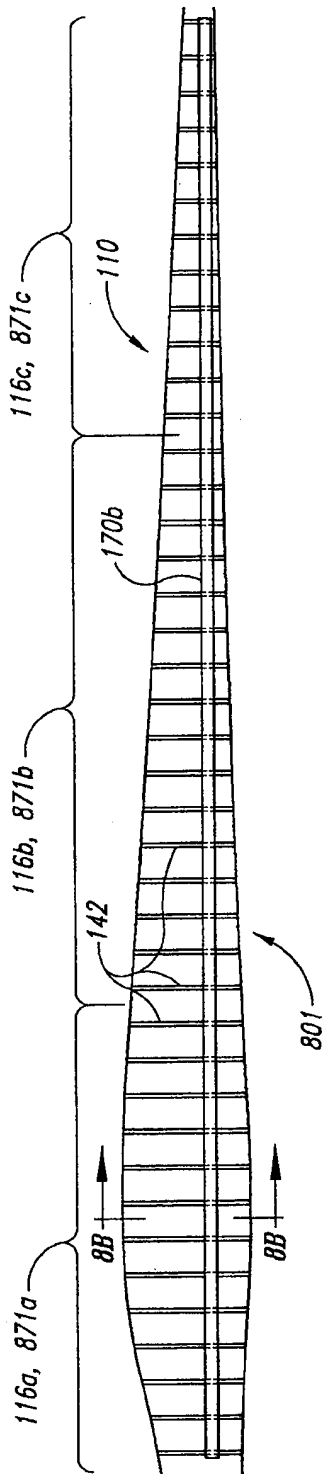


Fig. 8A

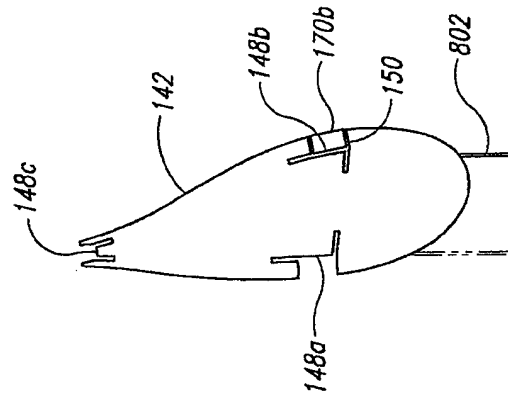
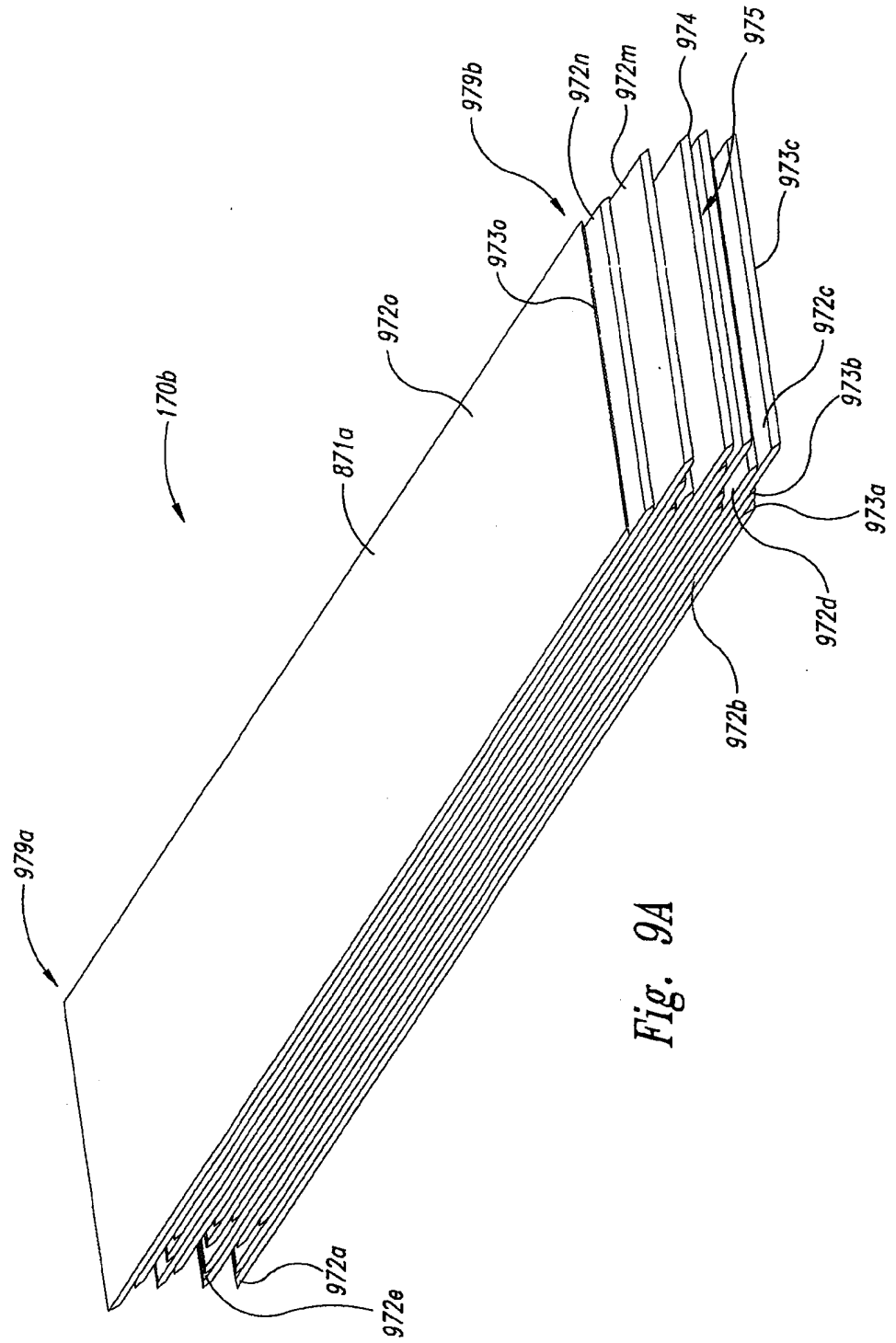
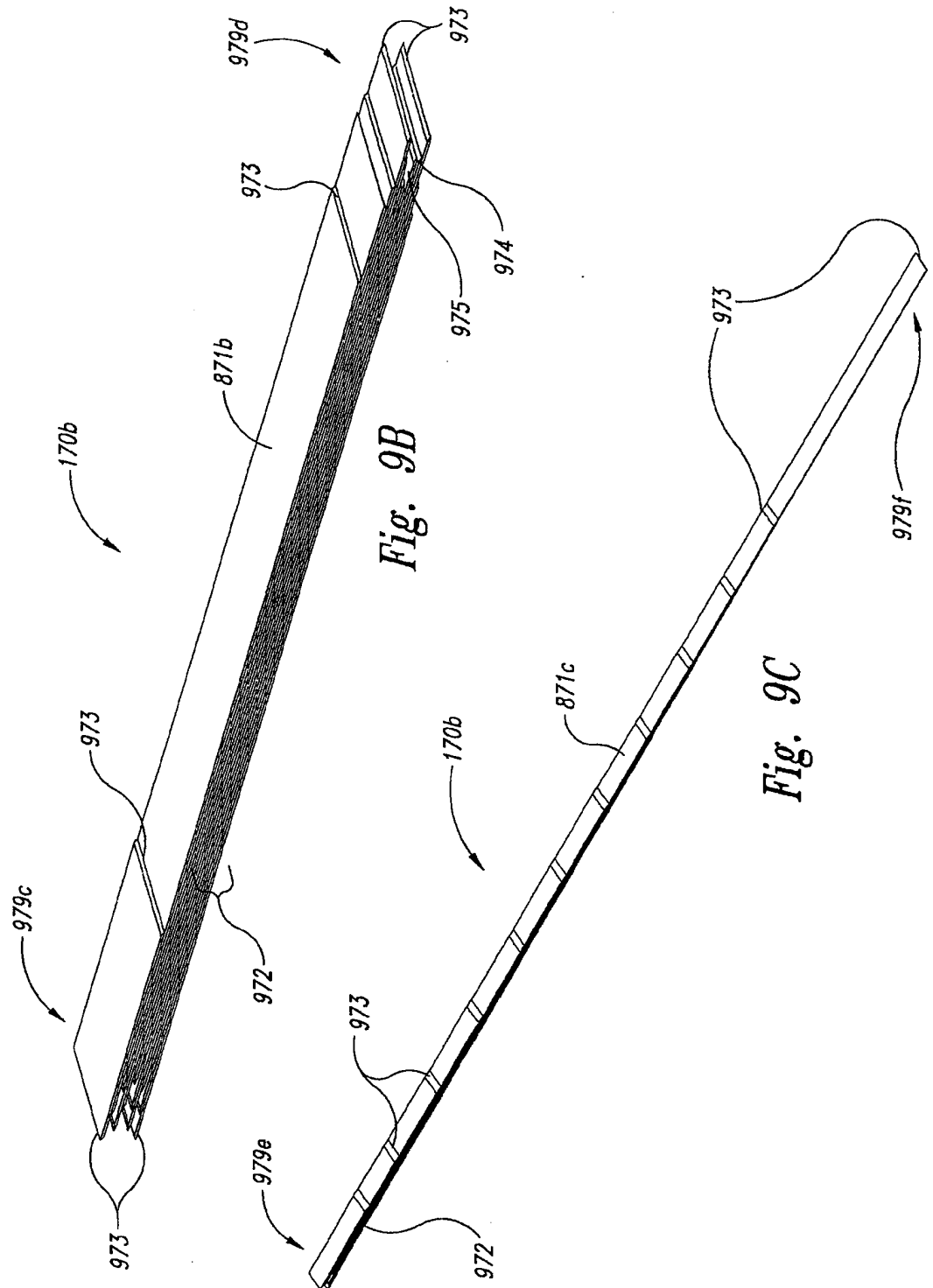
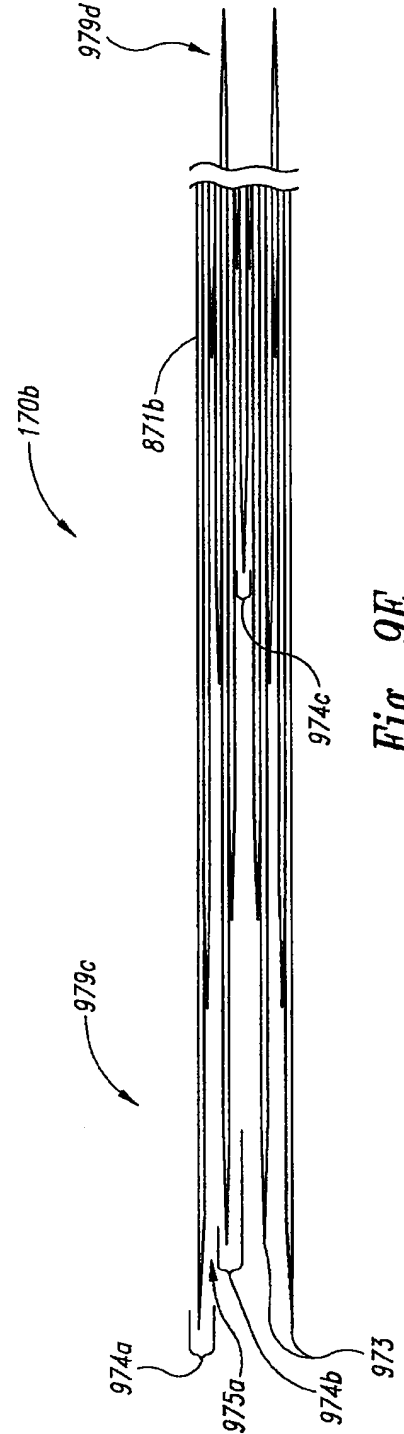
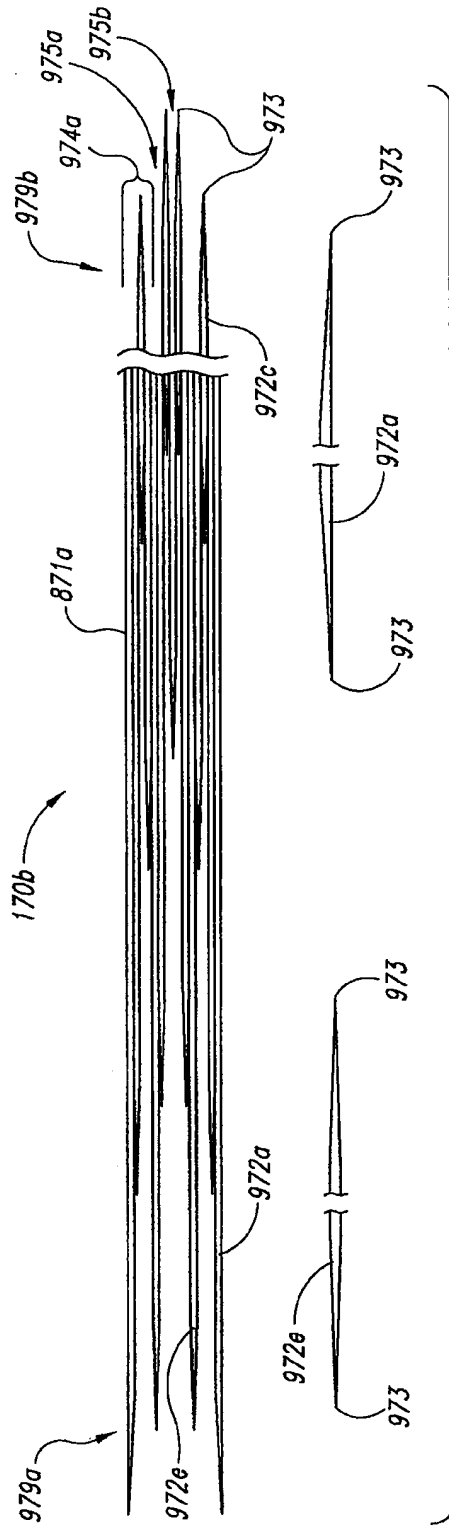


Fig. 8B







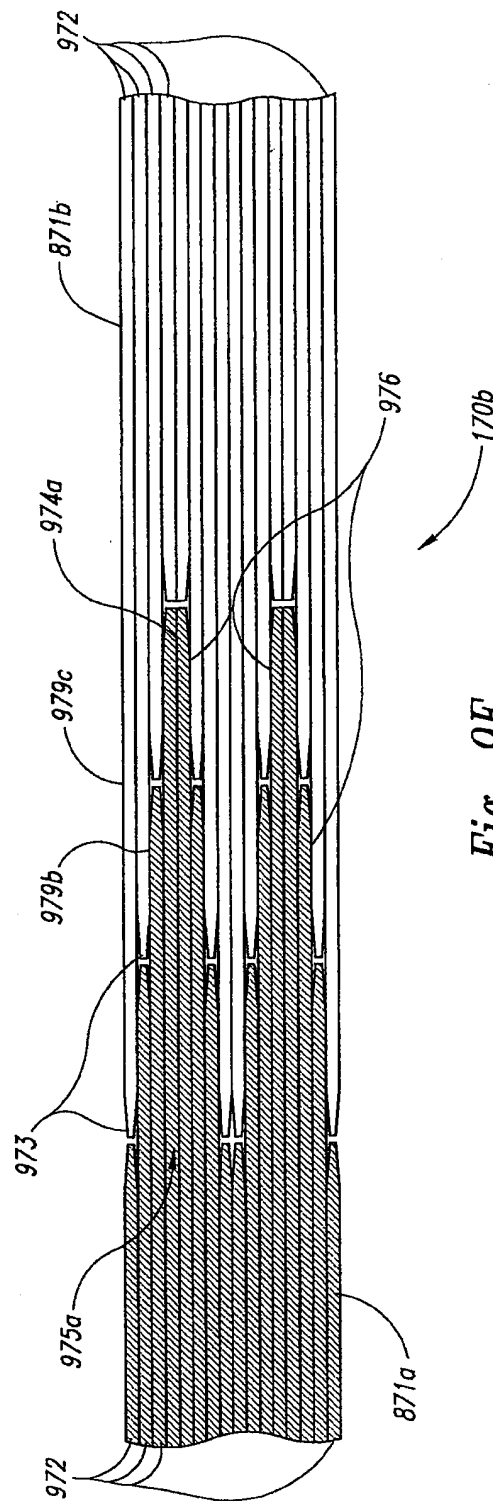
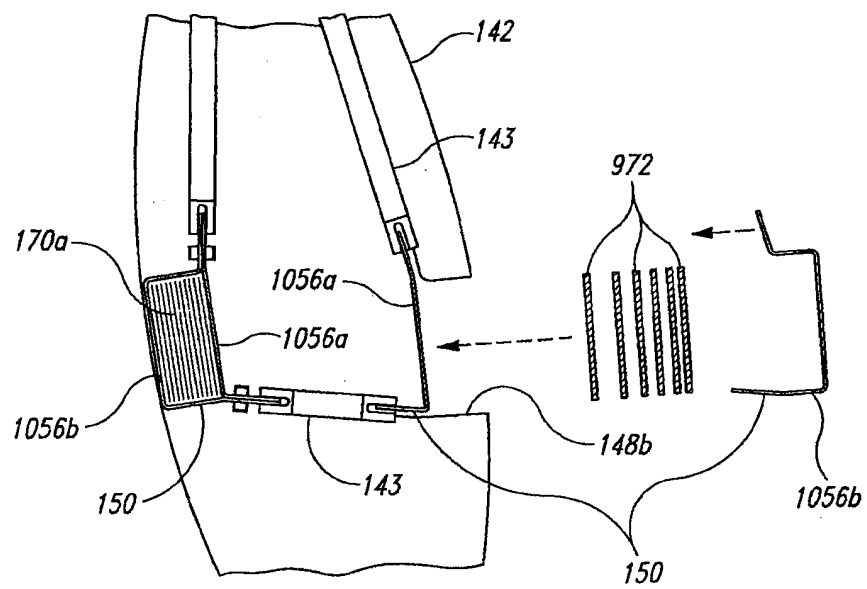
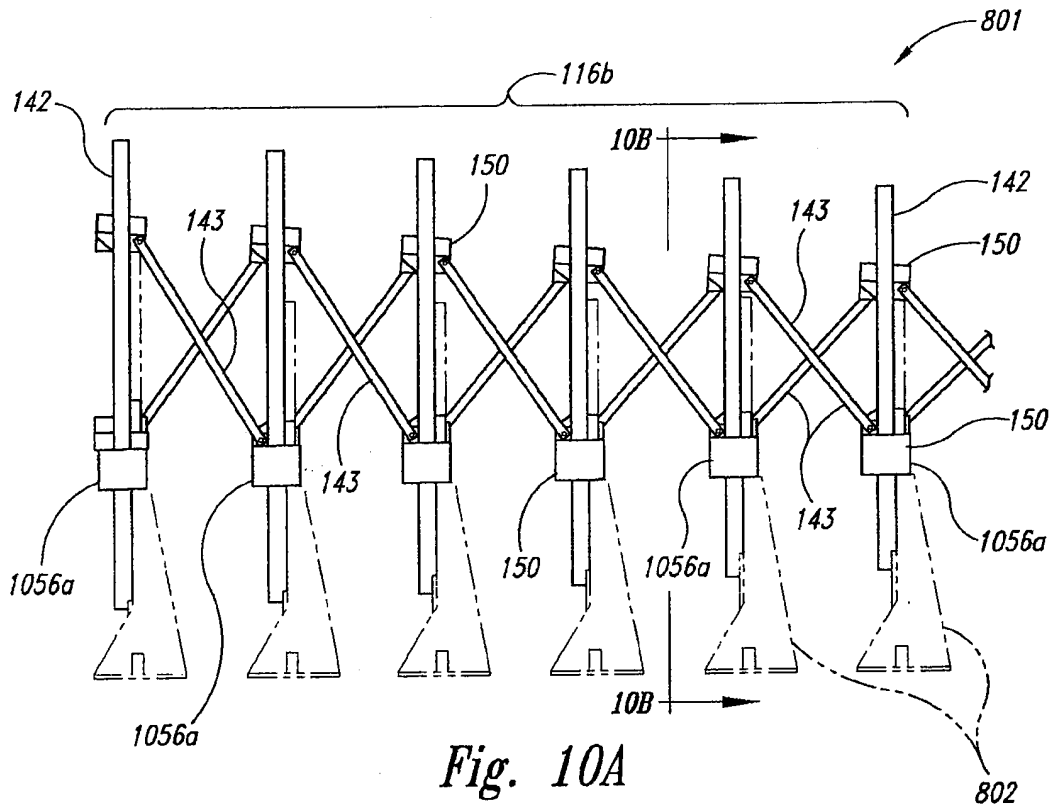
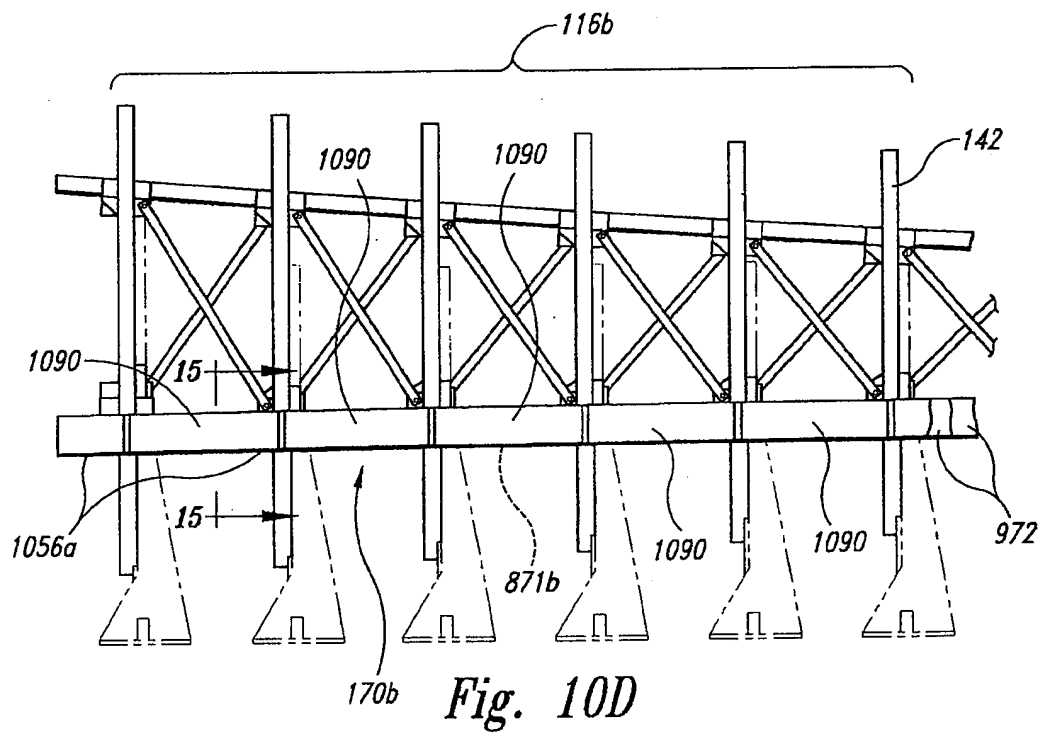
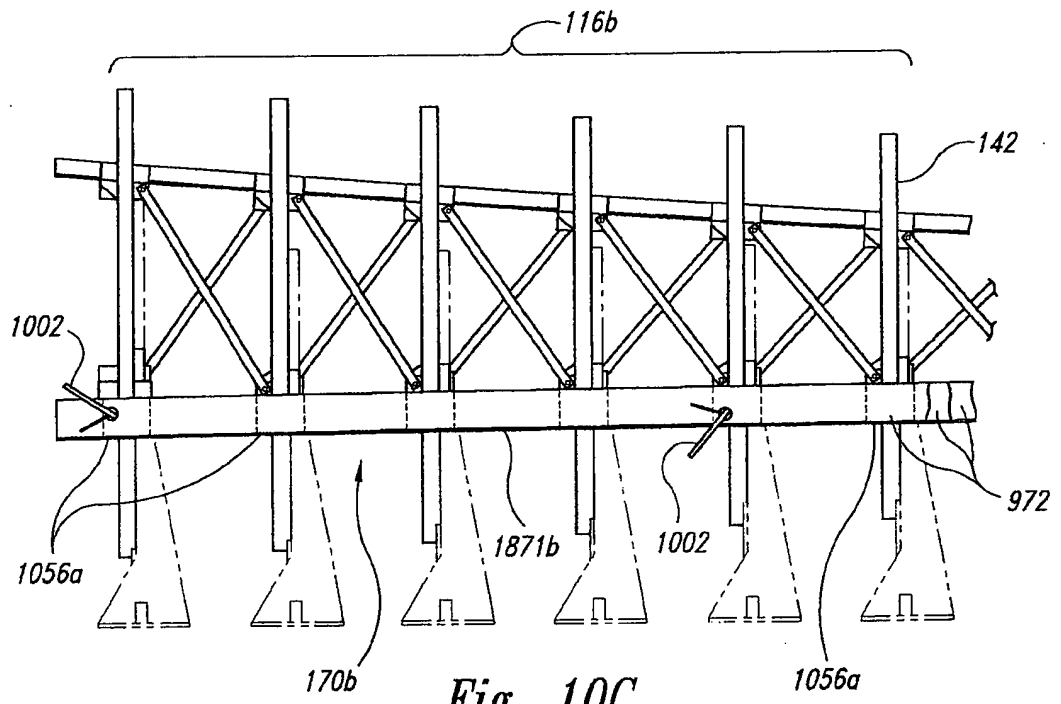
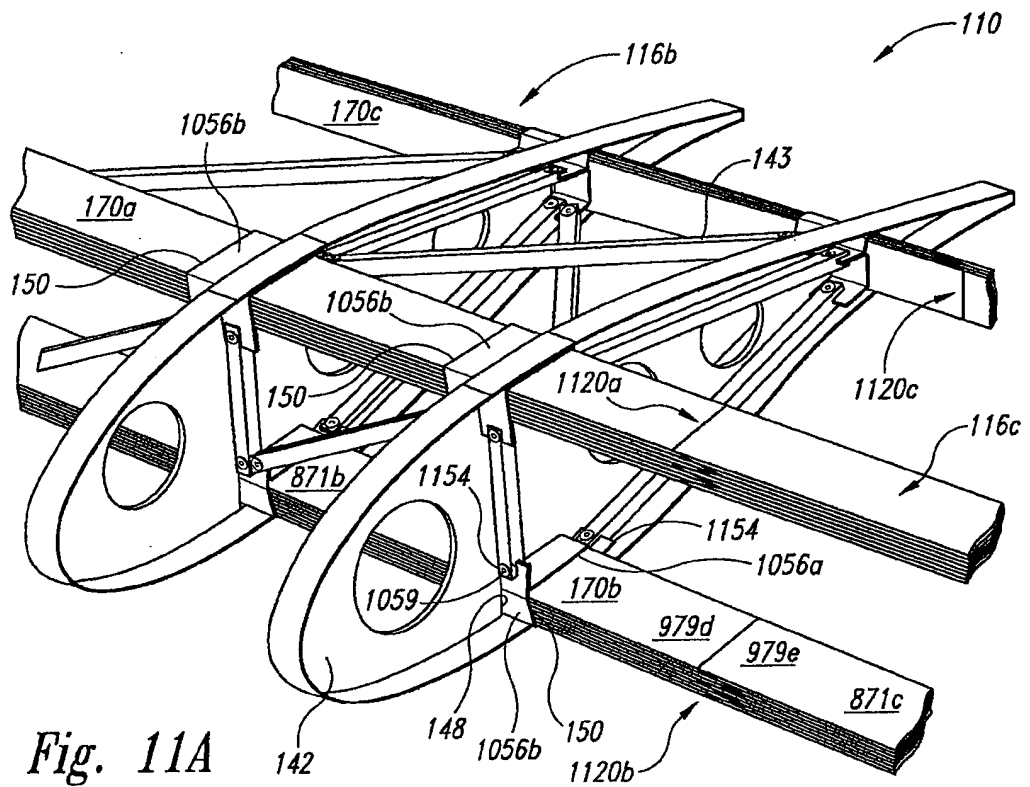
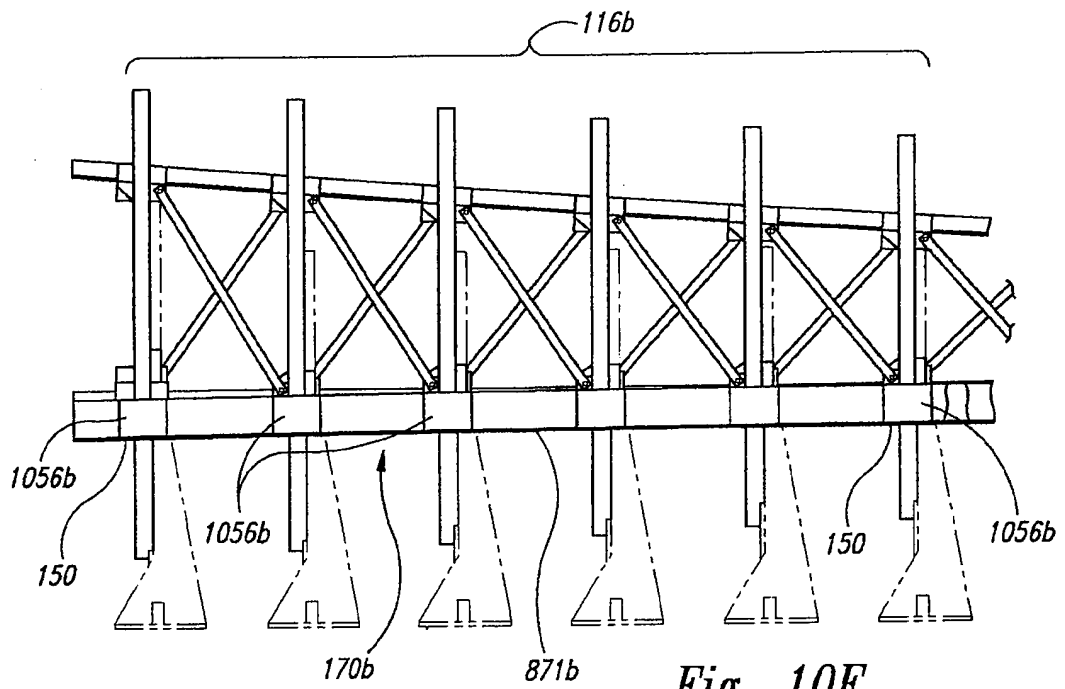
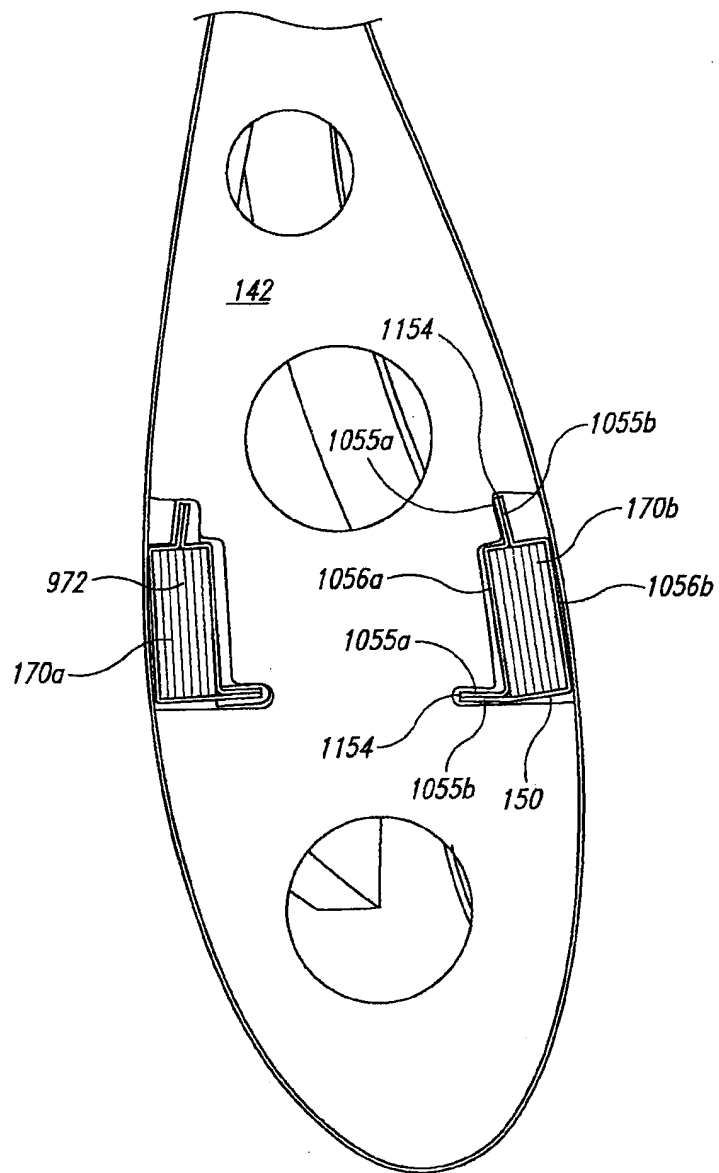


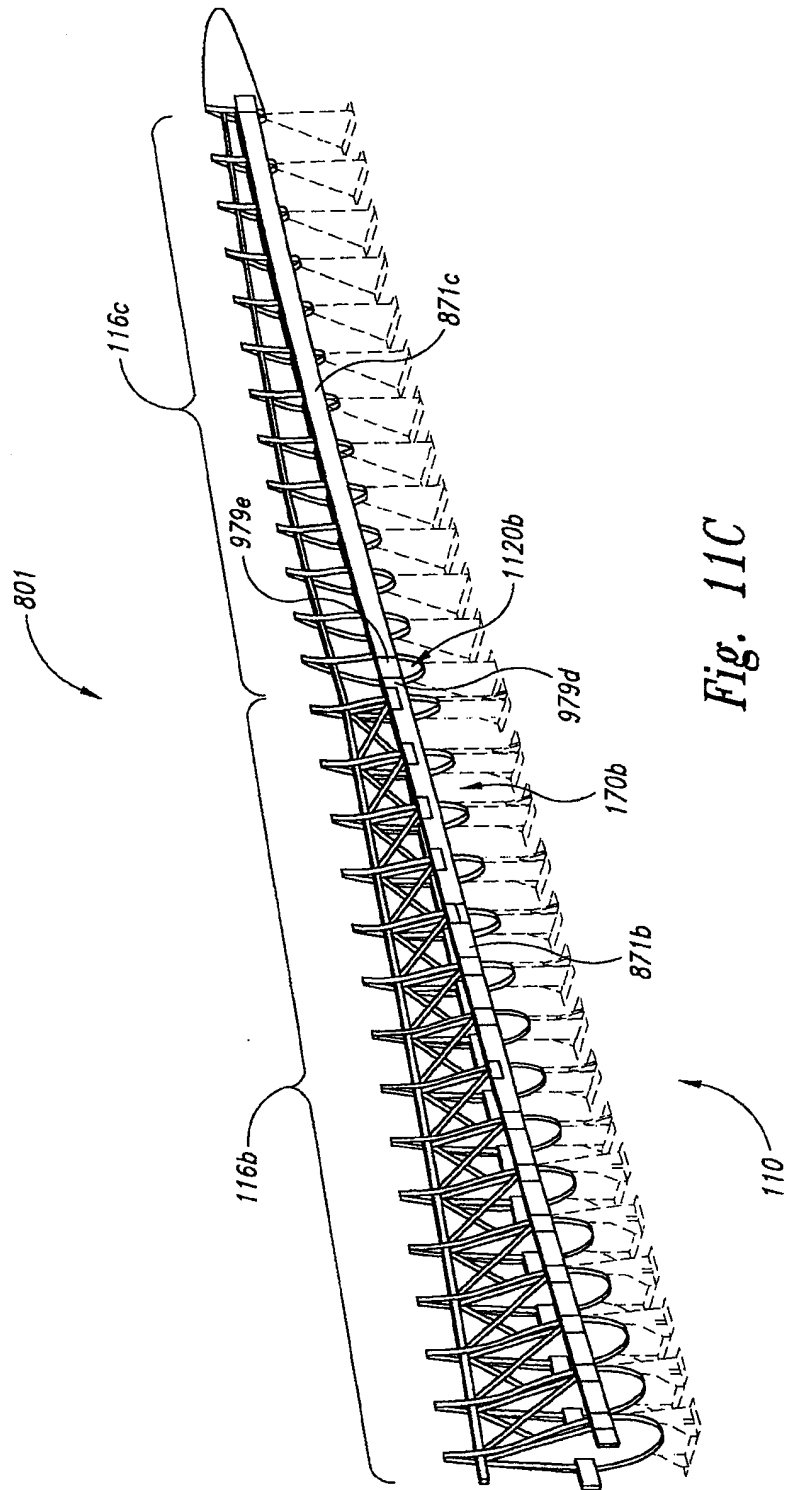
Fig. 9F

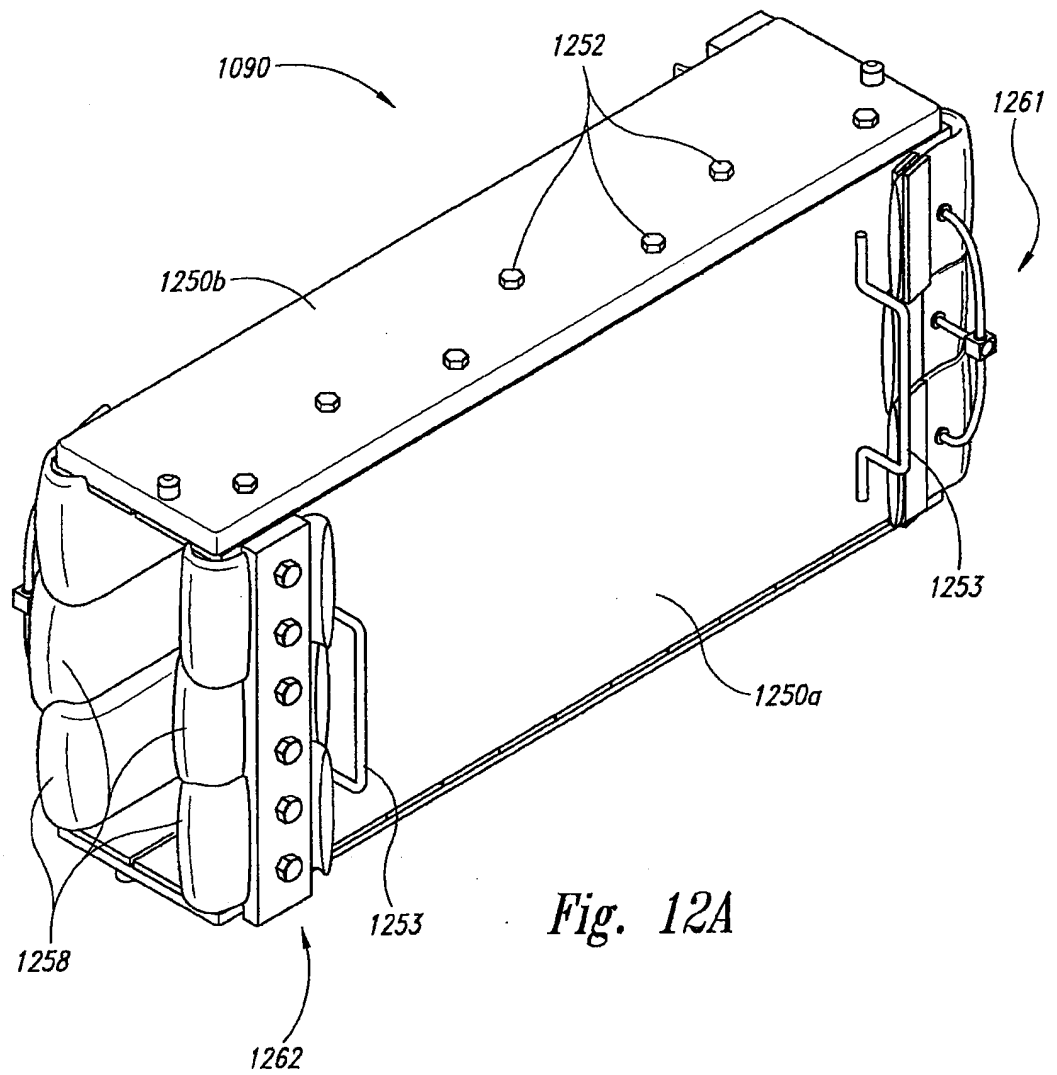


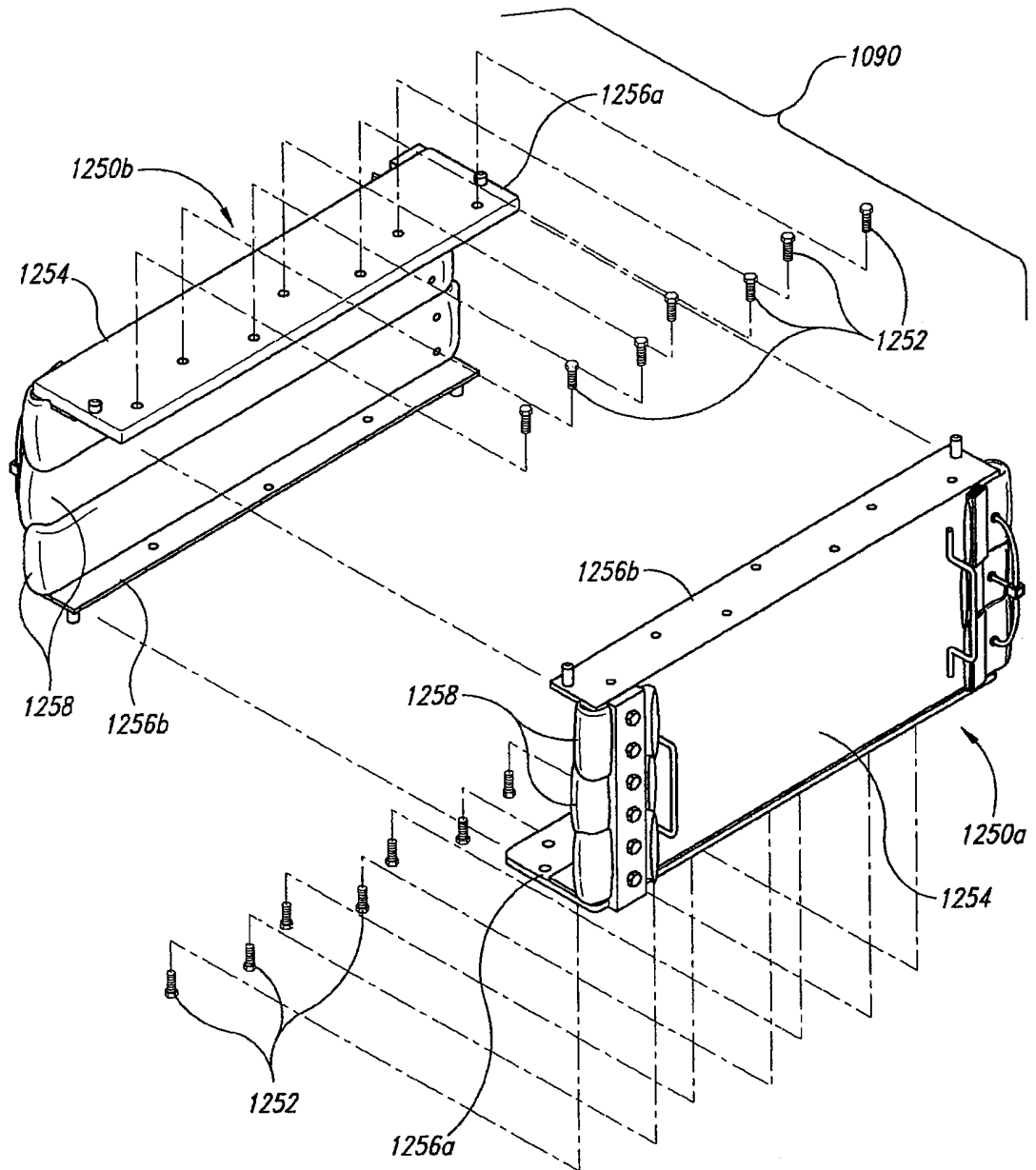




*Fig. 11B*



*Fig. 12A*

*Fig. 12B*

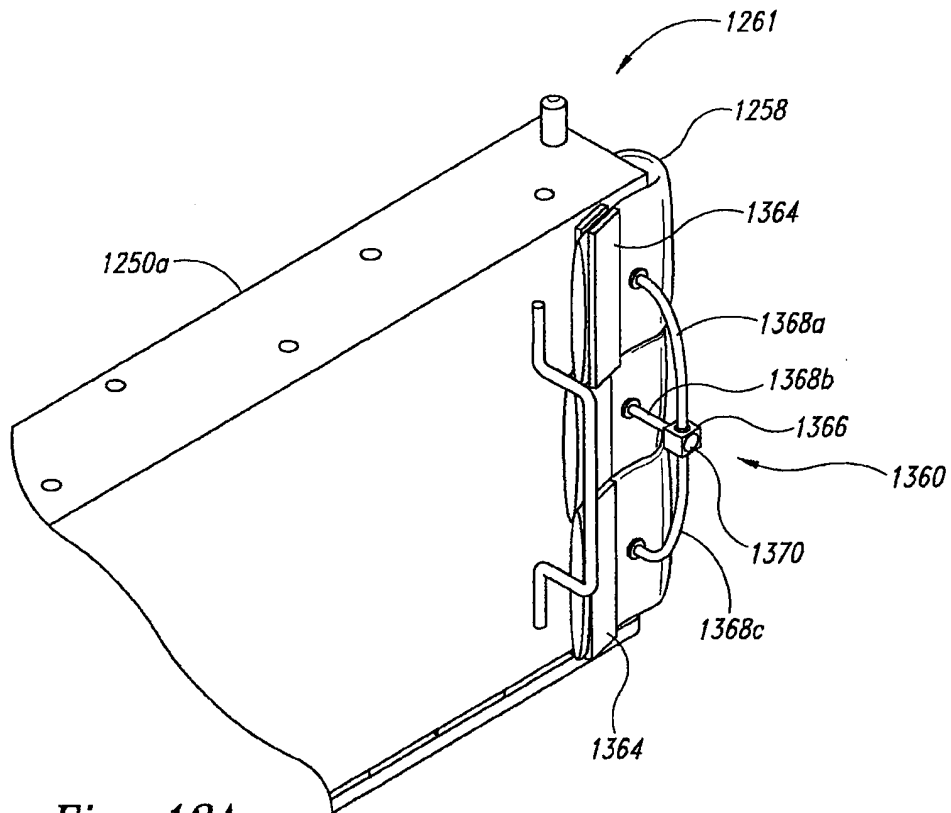


*Fig. 13A*

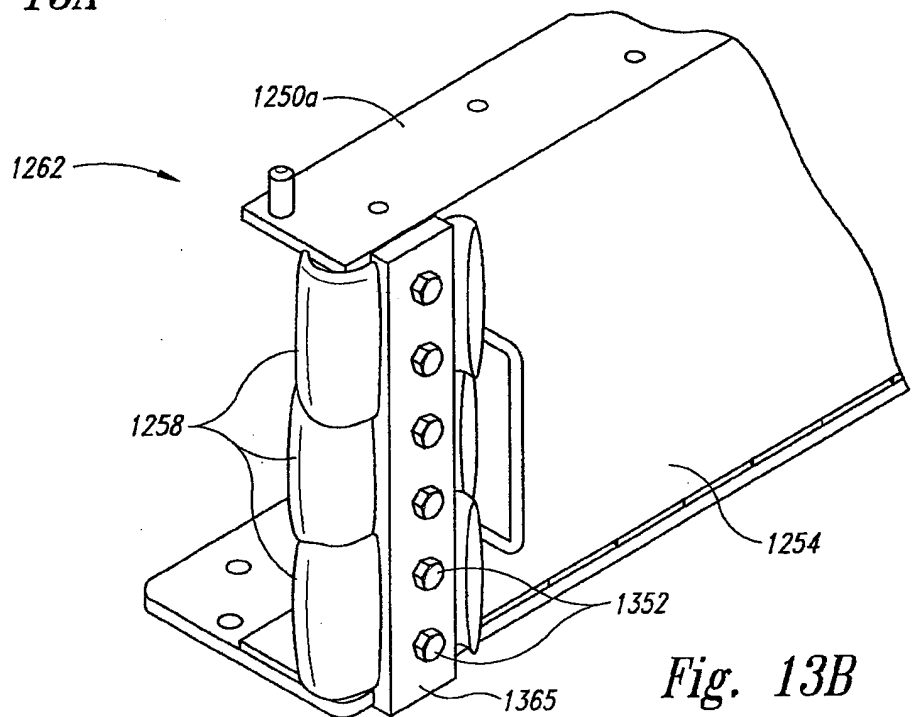


*Fig. 13B*

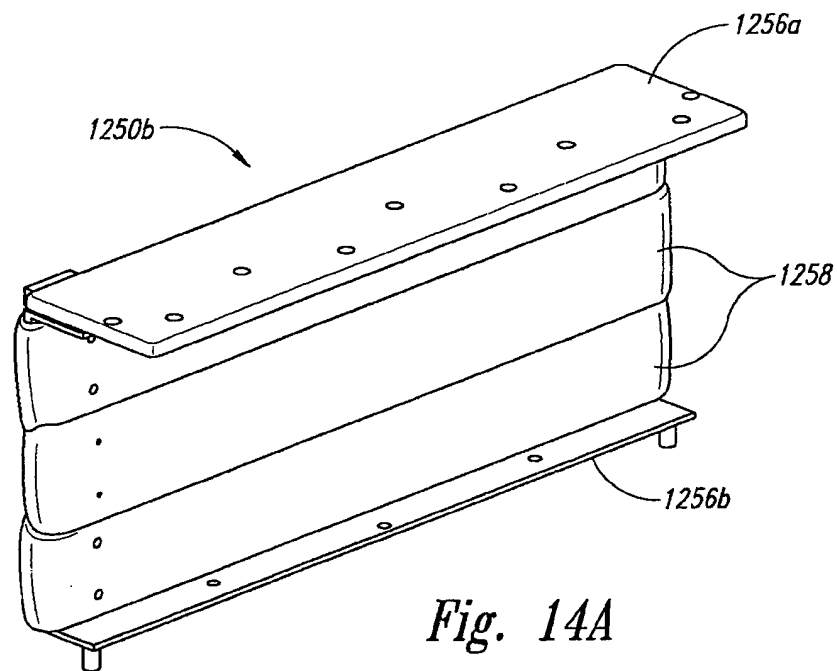


*Fig. 14A*

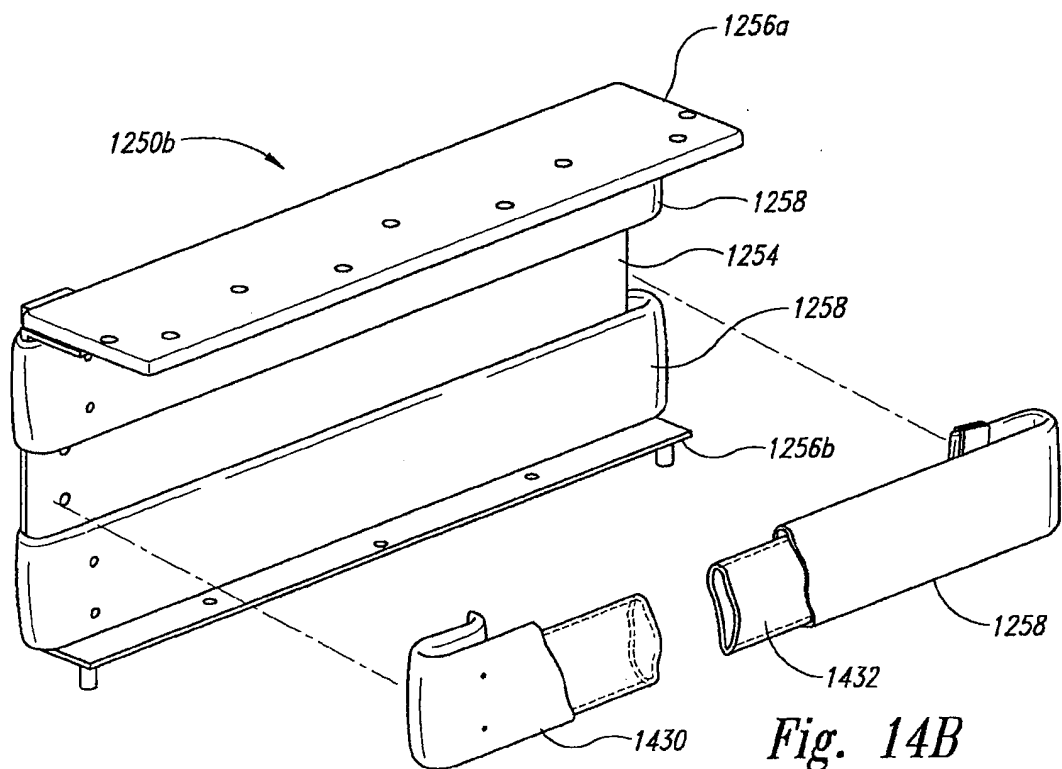


*Fig. 14B*

