



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

(21) BR 102015002142-9 A2

(22) Data do Depósito: 30/01/2015

(43) Data da Publicação: 23/08/2016



(54) Título: TORRE DE CONCRETO ESTRUTURAL E MÉTODO DE MONTAGEM

(51) Int. Cl.: E04H 12/18; E04H 12/16; E04H 12/34

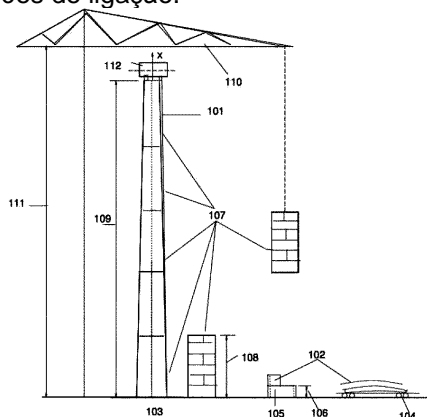
(52) CPC: E04H 12/182; E04H 12/16; E04H 12/342

(73) Titular(es): PROACQUA CONSTRUÇÕES E COMÉRCIO LTDA

(72) Inventor(es): CRISTIANO FERREIRA DE SÁ, MARCOS ONISHI, DANIEL MASSASHI KAKO, PÉRICLES BRASILIENSE FUSCO

(74) Procurador(es): CLOVIS SILVEIRA

(57) Resumo: TORRE DE CONCRETO ESTRUTURAL E MÉTODO DE MONTAGEM, fabricada em concreto estrutural de acordo com técnicas de construção civil, compreendendo uma pluralidade de segmentos-de-torre cilíndricos numa construção telescópica, a união de ditos segmentos sendo realizada por meio de nós duplos de comportamento reverso. O método compreende a construção de um conjunto de segmentos-de-torre compreendendo uma segmento-de-torre base externo de maior diâmetro, segmentos-de-torre intermediários de diâmetros sucessivamente menores uns em relação aos outros e segmento-de-torre de topo de menor diâmetro, todos apoiados diretamente na fundação 310, dispostos uns dentro dos outros, concêntricos entre si. Os segmentos-de-torre intermediários e de topo são içados com o uso de equipamentos hidráulicos de içamento e cabos de içamento sem a necessidade de uso de guindastes externos, içamento esse inteiramente diferente e novo em relação ao estado da técnica. Ao final da operação de içamento são instaladas, em cada um dos nós, as lajes transversais que consolidam transversalmente todas as peças estruturais das regiões de ligação.



## **TORRE DE CONCRETO ESTRUTURAL E MÉTODO DE MONTAGEM**

### **Campo de Aplicação**

**[001]** Refere-se a presente invenção aos sistemas de geração eólica de energia elétrica e, mais particularmente, às torres de sustentação das turbinas movidas pela ação do vento, ditas torres sendo fabricadas em concreto estrutural de acordo com técnicas de construção civil.

### **Estado da Técnica**

**[002]** A geração eólica de energia elétrica é baseada no emprego de turbinas movidas pela ação do vento, montadas em naceles instaladas no topo de torres cujas alturas tendem a ser cada vez mais altas. O interesse pelo aumento da altura das torres decorre do fato de que a velocidade do vento aumenta com a sua distância do solo e que a potência gerada pelas turbinas eólicas varia com o cubo da velocidade do vento. As torres com alturas até da ordem de cem (100) metros podem ser construídas inteiramente com estruturas de concreto, mas para isso é necessário empregar guindastes auxiliares com grande capacidade de carga e com alturas superiores à própria altura a torre a ser construída, guindastes esses que inviabilizam economicamente o aumento da altura das torres de concreto. Torres com maiores alturas, no estado da técnica, têm estruturas mistas em que as partes mais altas são construídas com estruturas metálicas.

**[003]** Os projetos de turbinas eólicas são regulados, em âmbito internacional, pelas normas do "INTERNATIONAL STANDARD IEC

61400-1 - "Wind Turbines - Design requirements", International Electrotechnical Commission, Geneve, 2005.

**[004]** A tecnologia de geração eólica de eletricidade e as perspectivas de seu emprego estão descritas em " *Milton Pinto - Fundamentos de energia eólica, LTC Livros Técnicos e Científicos, Rio de Janeiro, 2013*". O potencial brasileiro de geração eólica de energia elétrica está relatado na publicação "ATLAS DO POTENCIAL EÓLICO BRASILEIRO - Eletrobrás, 2.001".

**[005]** Nas construções sujeitas à ação do vento, os esforços em suas estruturas crescem rapidamente com a altura. Por essa razão, as torres eólicas são construídas com forma aproximada tronco-cônica, e com diâmetro continuamente variável que diminui em direção a seu topo.

**[006]** As torres para a geração eólica de energia elétrica podem ser construídas em terra firme ou em águas pouco profundas, marítimas ou em lagos de grandes dimensões. Em cada caso particular, a base de apoio é adaptada às condições ambientais específicas da construção, mas os procedimentos construtivos das partes elevadas são praticamente sempre da mesma natureza. Os diâmetros das bases das torres inteiramente ou parcialmente de concreto, são da ordem de uma dezena de metros, e os comprimentos buscam atingir e até ultrapassar uma centena de metros.

**[007]** Como as torres eólicas estão usualmente localizadas em sítios isolados, as torres de concreto são construídas com partes de concreto protendido, pré-fabricadas em instalações

industriais existentes na região de realização da obra, não existindo viabilidade econômica na construção de torres de concreto moldadas no local da obra. Essas partes pré-fabricadas são transportadas para a obra por meio de transporte rodoviário em virtude das particularidades desse tipo de construção. As dimensões das peças pré-fabricadas são limitadas pelas dimensões dos veículos rodoviários de transporte. Em princípio, no transporte rodoviário, sem batedores, a maior largura permitida para o veículo de transporte é de aproximadamente 3 metros.

**[008]** No local de construção da torre, no estado da técnica, as peças pré-fabricadas são reunidas em anéis modulares cilíndricos ou tronco-cônicos, consolidados por protensão transversal circular, com alturas de um a três metros. A seguir, esses módulos cilíndricos ou tronco-cônicos são reunidos longitudinalmente uns sobre os outros e consolidados por protensão de armaduras longitudinais, constituindo-se em segmentos-de-torre, com comprimentos da ordem de 10 a 20 metros. Alternativamente, as peças pré-fabricadas industrialmente são construídas com o formato de setores cilíndricos alongados, com comprimentos da ordem de 10 a 20 metros e larguras da ordem de 3 metros, que no canteiro de obra são consolidados por protensão transversal, construindo-se assim os segmentos-de-torre desejados.

**[009]** Uma descrição geral do Estado da Técnica na construção de torres eólicas de concreto pode ser encontrada na internet, no documento " *Concrete Towers for Onshore and Offshore Wind Farms - Conceptual Design Studies* " -54 págs. The Concrete Center, UK,

2007. Nesse documento, a figura 1.6, situada na página 21, mostra claramente que a dificuldade existente nos métodos usuais de construção de torres de concreto com seção transversal cilíndrica ou tronco-cônica é constituída pela necessidade de emprego de guindastes de grande altura para a montagem das torres por sobreposição de seus segmentos-de-torre, uns sobre os outros.

**[010]** Nesse mesmo documento, a figura 1.8, situada na página 23, mostra que nos segmentos-de-torre de concreto, em suas extremidades são colocadas caixas anulares metálicas, feitas de "chapas pesadas" de aço inoxidável, que são solidarizadas às paredes dos segmentos de torre. Essas caixas anulares são destinadas à dupla função de ancoragem dos cabos da protensão longitudinal dos segmentos de torre, que são externos às paredes de concreto, e à ancoragem das barras de solidarização dos dois segmentos-de-torre vizinhos, garantindo que as extremidades das paredes entrem em contato direto, topo a topo.

**[011]** No estado da técnica não existe tecnologia eficiente para a construção de torres eólicas telescópicas de concreto, com segmentos-de-torre cilíndricos, de diâmetros que diminuem à medida que devem ser colocados em posições mais altas na torre. No estado da técnica existem apenas métodos telescópicos de elevação de um único elemento de concreto, usualmente representado por uma caixa d'água.

**[012]** Para essa finalidade, dentro da moderna literatura profissional relativa ao projeto e construção de estruturas de concreto armado e protendido, podem ser citadas as publicações:

**[013]** FUSCO, P.B. - Técnica de armar as estruturas de concreto, Ed. Pini, São Paulo. 1ªed. 1995, 2ª ed. 2013.

**[014]** FUSCO, P.B. - Estruturas de concreto. Solicitações tangenciais. Ed. Pini, São Paulo, 2008.

**[015]** Para o entendimento do estado da técnica na construção de torres de geração eólica de energia elétrica, deve-se esclarecer que, do ponto de vista da engenharia de estruturas, as torres funcionam como vigas verticais em balanço, ou seja, como barras verticais retilíneas engastadas em seu "nó" de fundação.

**[016]** De modo geral, na construção de estruturas feitas com barras pré-fabricadas, de qualquer material, as seções transversais de ligação das barras são tratadas, no modelo teórico, como se elas fossem pontos virtuais de união dessas barras, que teoricamente são tratada como linhas, constituindo-se no que se entende por "nós" da estrutura . Todavia, esses "nós", de verdade, são formados por sistemas estruturais localizados, construídos até com material diferente do material empregado na pré-fabricação das barras da estrutura.

**[017]** No caso de construções de concreto, quando as partes da estrutura são inteiramente produzidas por pré-fabricação, não existe um recurso equivalente ao emprego de solda nas estruturas metálicas, não sendo exequível a ligação direta monolítica de elementos estruturais, entre os quais pudessem ser transmitidos

eficientemente todos os tipos de esforços, esforços normais, esforços cortantes, esforços de flexão e esforços de torção. Quando são empregadas peças estruturais pré-fabricadas de concreto, as formas de ligação aparentemente diretas de tais peças pré-fabricadas, como no caso de pontes, os nós da estrutura são sempre de simples apoio relativo articulado, com vigas apoiadas em pilares por intermédio de aparelhos de apoio, ou no caso de prédios industriais, com vigas apoiadas em consolos curtos salientes das faces dos pilares, não existindo solidarização monolítica dos elementos que são unidos.

**[018]** No caso de segmentos de paredes delgadas de concreto, planas ou cilíndricas, a união direta monolítica pode ser realizada com emprego de protensão, longitudinal ou transversal, que comprima entre si as seções transversais das partes pré-fabricadas. Esse tipo de união pode ser tão resistente quanto as próprias paredes solidarizadas.

**[019]** Todavia, se o que se pretende aplicar é uma força paralela ao plano médio da parede, mas que não esteja contida nesse plano médio, como no caso de forças de protensão aplicadas em abas salientes da parede, essa aplicação produz esforços de flexão na aba de apoio, que se transmitem integralmente à parede de apoio, propagando-se ao longo dessa parede, até ser equilibrado por um elemento rígido ligado à fundação da estrutura, ou pela própria fundação. Nesse caso, a parede deve ser suficientemente resistente para suportar a flexão que lhe vai ser aplicada, e suficientemente rígida para evitar uma rotação por flexão da aba

de carregamento, que possa provocar a ruína funcional da construção.

**[020]** Uma solução proposta para esse problema foi publicada pela *Concrete Center UK 2007*, que consiste no emprego de caixas metálicas rígidas de aço inoxidável nas extremidades de segmentos- de- torre tronco-cônicos, nas quais são embutidas as extremidades das parede de concreto. O emprego de segmentos-de- torre tronco-cônicos foi decorrente da necessidade de que, nas seções de contato, ambos os segmentos-de-torre tivessem o mesmo diâmetro. O emprego de anéis metálicos rígidos decorre da necessidade de equilibrar a flexão provocada pela excentricidade dos cabos de protensão de um dos segmentos, em relação à superfície média da parede desse mesmo segmento, pudesse ser equilibrada pela flexão provocada pela excentricidade dos cabos de protensão do outro segmento, em relação a superfície média de sua própria parede. A proposta publicada pela *Concrete Center UK 2007* mostrou a necessidade de anéis metálicos rígidos para evitar a flexão nas paredes de concreto dos dois segmentos-de- torre unidos por essas caixas de aço. No entanto, como as caixas de ambas as extremidades que se unem têm o mesmo diâmetro, o método construtivo proposto não permite o içamento telescópico dos segmentos-de-torre, pois ambas as caixas estão situadas dentro da torre.

**[021]** No caso de estruturas de aço, a ligação direta das faces das peças em contato, isto é, a ligação direta dos nós de extremidade das peças em contato, pode ser feita diretamente com o emprego de solda ou, de modo indireto, por meio de sistemas



locais especializados de união com peças parafusadas entre si e com as barras da estrutura.

**[022]** No caso de estruturas de concreto, a união monolítica das extremidades de diferentes peças inteiramente pré-fabricadas exigiria o emprego de "peças especiais de união", que passariam a constituir-se em uma espécie de "nós duplos rígidos" da estrutura assim formada. Tais peças especiais de união, que poderiam ter dimensões bastante significativas, passariam a fazer o papel teórico de um "nó duplo", por ficar ligado simultaneamente aos nós de extremidade das duas peças pré-moldadas independentemente, e rígidos, por eliminarem todos os graus de liberdade relativa entre essas extremidades, tornando monolítica a união por ele realizada.

**[023]** Em uma interpretação simplificada desse problema estrutural tridimensional de ligação de peças pré-fabricadas, pode-se analisar a estrutura como se ela fosse uma viga reta, feita com segmentos pré-fabricados.

**[024]** Na construção de torres de concreto de acordo com o estado da técnica, o nó duplo é formado por duas caixas de aço, e tem o que se pode entender como um comportamento estrutural direto, pois quando dois segmentos-de-torre tendem a se comprimir, um contra o outro, os nós de extremidade do "nó" duplo também tendem a se aproximar entre si e, vice-versa, quando os segmentos-de-torre tendem a se afastar, como na situação levantamento com o auxílio de guindastes externos, os nós de extremidade do "nó" duplo também tendem se afastar um do outro.

**[025]** Pelo contrário, no caso de construções telescópicas, o funcionamento telescópico exige que os nós de ligação tenham o comportamento oposto, ou seja, que tenham o “comportamento reverso” caracterizado pelo fato de que as extremidades dos segmentos-de-torre se afastem quando elas tendem a ser comprimidas entre si e, vice-versa, que quando os segmentos-de-torre tendem a ser tracionados os nós de extremidade do nó duplo de comportamento reverso tendem a se comprimir.

**[026]** O nó duplo de comportamento reverso é o nó típico do comportamento telescópico.

**[027]** O método de solidarização dos segmentos-de-torre com nós de comportamento direto foi reapresentado pelo *Concrete Center* em 2007, com a mesma proposta recomendada pelo próprio *Concrete Center*, em sua publicação de 2005, ISBN 1-904818-34-X que, em sua figura 2, à página 5, mostra o emprego de caixas anulares metálicas de grande rigidez para a união de segmentos-de-torre de mesmo diâmetro. Esta solução, evidentemente, não pode ser aplicada a levantamento por um método telescópico, uma vez que ambas as abas metálicas estão dispostas por dentro da seção transversal da torre.

**[028]** Para analisar a construção de torres eólicas, é importante salientar que, em princípio, as estruturas das torres funcionam como se fossem vigas em balanço engastadas na base, suportando seu próprio peso e o peso da turbina colocada em seu topo, além da ação do vento na turbina e no próprio corpo da torre. Todavia, a estrutura da torre não é uma viga usual com

seção transversal maciça. A estrutura da torre, formada pelos segmentos-de-torre constitui-se em um sistema estrutural classificado como casca delgada, que apresenta o risco de ruína por instabilidade transversal da parede de seus anéis constitutivos, em virtude dos elevados esforços de torção existentes em suas paredes delgadas.

**[029]** Desse modo, no estado da técnica, para eliminar essa deficiência intrínseca de resistência do sistema estrutural das torres de parede delgada, o necessário enrijecimento transversal dos segmentos-de-torre, como mostrado nos documentos publicados pelo *Concrete Center UK*, 2007/2005, é realizado também por meio da estrutura formada pelas duas caixas anulares metálicas existentes na união das duas extremidade dos diferentes segmentos-de-torre, fazendo com que o sistema estrutural da torre simule o comportamento estrutural das vigas de seção transversal maciça.

**[030]** Em resumo, no estado da técnica, a segurança estrutural das torres eólicas de concreto é garantida pelo enrijecimento transversal de seus segmentos-de-torre, dado pelo nó duplo de comportamento direto que liga as extremidades dos segmentos-de-torre. Note-se que o nó duplo de comportamento direto impede a elevação telescópica dos segmentos-de-torre e exige que a superposição dos segmentos-de-torre seja feita com o emprego de guindastes externos de altura operacional maior que a altura da própria torre a ser construída.

**[031]** A Fig. 1 exemplifica um dos procedimentos básicos que, de acordo com o estado da técnica, são empregados na construção de torres de concreto destinadas à geração eólica de energia elétrica. Para a construção da torre com altura total 109, os elementos pré-fabricados 102, em forma de setor semicônico ou semicilíndrico, são levados para o canteiro de obra por transporte rodoviário 104 e aí são unidos por procedimentos do Estado da Técnica, formando módulos tronco-cônicos 105, de altura 106, que por sua vez são unidos por procedimentos usuais formando segmentos-de-torre 107 de altura 108. De modo geral, os módulos tronco-cônicos ou cilíndricos 105 são montados com alturas 106 variando de um a três metros. Com isso, os segmentos-de-torre 107 podem ter alturas 108 que variam usualmente de dez a vinte metros. Para a montagem da torre, os segmentos de torre 107, que dispõem de anéis estruturais metálicos de reforço em ambas as extremidades, devem ser suspensos e colocados em suas respectivas posições de projeto por guindastes 110, de altura operacional 111 maior que a altura total 109 da torre a ser construída. Durante a construção da torre, os segmentos-de-torre 107, após serem colocados em suas posições finais, são ligados entre si por meio de barras de aço que unem as abas metálicas existentes na face interna das duas extremidades de ambos os segmentos-de-torre que se juntam. Desse modo, essas barras de ligação solidarizam o conjunto de segmentos-de-torre entre si. Após essa solidarização, os equipamentos 112 de geração de energia elétrica são colocados sobre o segmento-de-torre 101 mais alto.

**[032]** Um caminho óbvio para evitar o emprego de guindastes de grande porte e de grande altura para a suspensão dos segmentos-de-torre é o emprego dos nós duplos de comportamento reverso das estruturas telescópicas.

**[033]** O emprego de estruturas telescópicas surgiu com os primórdios da revolução industrial. Desde o aperfeiçoamento do telescópio, feito por Galileu Galilei no início do século XVII, a construção de estruturas telescópicas em instrumentos, aparelhos e máquinas floresceu ao longo de todo mundo civilizado, até se chegar aos copos metálicos telescópicos dos escoteiros da primeira metade do século XX, às antenas telescópicas de rádio dos automóveis e escadas de incêndio da segunda metade do século XX, e aos artefatos telescópicos de alumínio e de plástico estrutural do século XXI.

**[034]** O emprego de estruturas telescópicas em construções da Engenharia Civil já ocorre de longa data. Assim, por exemplo, a patente norte-americana US4,312,167 de 26/01/1982 privilegia um método de construção de torres e das respectivas caixas d'água de grande porte, o qual emprega dispositivos de montagem telescópica, que foram inventados para esse tipo específico de construção.

**[035]** Do mesmo modo, a patente norte americana US4,486,989 de 11/12/1984 privilegia um método de construção de caixas d'água elevadas por método telescópico adequado á construção considerada.

**[036]** De maneira semelhante, a patente norte-americana US4,660,336 de 18/04/1987 privilegia um método de construção de caixa d'água elevada e da respectiva torre realizada por um processo telescópico cujos elementos inventados são pertinentes ao tipo de construção considerada.

**[037]** Uma tentativa de apresentar uma tecnologia de construção de torres de geração eólica de energia elétrica, com o emprego de elevação telescópica dos segmentos-de-torre, foi feita com a patente britânica GB2451191 publicada em 27/03/2013, com prioridade de 18/07/2007. Esta patente refere-se à construção de torres *off-shore* em águas pouco profundas. De acordo com o desenho (Fig. 10 A desse documento), os segmentos-de-torre, após serem construídos, são transportados na horizontal, por flutuação, e colocados em posição vertical no local da obra. Na fase inicial da construção, os segmentos-de-torre são dispostos sobre a fundação da torre em um arranjo concêntrico entre si e com o eixo da torre, cuja configuração é adequada à elevação telescópica. A elevação dos segmentos-de-torre, de acordo com o desenho (Fig. 11 do documento) e do relatório, não é feita pelo içamento telescópico dos sucessivos segmentos-de-torre. Pelo contrário, em cada etapa de levantamento dos segmentos-de-torre, a operação é feita por meio de macacos hidráulicos de levantamento por empurra, aplicados em plataformas metálicas de apoio do conjunto de abas salientes dos segmentos ainda não levantados, construídas no interior da torre, com diâmetros adequados a cada etapa particular. Na extremidade superior dos segmentos-se-torre existe um elemento (detalhe 56, figuras 3B e 10C), voltado para o interior da torre, mas com a finalidade

única de servir de guia de fim de curso. É importante assinalar que o apoio dos segmentos-de-torre sobre os segmentos que lhes ficam imediatamente abaixo é feito por peças metálicas inclinadas (detalhe 96, Fig. 10C) cujo apoio e funcionamento não são explicados, sendo informado apenas que elas transmitem as cargas vindas da aba inferior dos segmento-de-torre a recessos não descritos, existentes na periferia do topo da parede do segmento-de-torre posicionada mais baixo que aquela em elevação, não existindo nenhum elemento estrutural de enrijecimento transversal das regiões de ligação dos sucessivos segmentos-de-torre.

**[038]** Os métodos de construção das torres de sistemas de geração eólica de energia elétrica, feitas de aço ou de concreto estrutural, sempre compreendem as mesmas três fases seguintes: construção de segmentos-de-torre ao nível da base, içamento desses segmentos colocando-os em posições sobrepostas, e solidarização da união desses segmentos em suas posições finais.

**[039]** Da mesma maneira que na fabricação de outros sistemas telescópicos, na construção telescópica de torres é preciso que os segmentos-de-torre tenham uma conformação geométrica que permita o seu posicionamento uns dentro dos outros, em posições concêntricas entre si e em relação ao eixo da torre a ser construída, e que sejam capazes de resistir aos esforços a que vão ser sujeitos durante a construção e durante sua vida útil, na qual a torre deve funcionar como um sistema estrutural solidário de comportamento monolítico.

**[040]** Da mesma maneira que na fabricação de outros sistemas telescópicos, para a instalação dos dispositivos de içamento dos segmentos-de-torre e para o travamento desses movimentos quando esses segmentos atingem suas posições especificadas no projeto, os segmentos-de-torre devem ser dotados de abas salientes em suas extremidades, com a aba da extremidade de avanço voltada para dentro da torre, e a aba da extremidade de retaguarda voltada para fora da torre.

**[041]** Da mesma maneira que na fabricação de torres por outros diferentes métodos construtivos que empregam a união de segmentos-de-torre pré-fabricados, em um método telescópico também é indispensável que o conjunto de segmentos interligados resulte em um sistema estrutural integrado, com comportamento estrutural de viga em balanço engastada na base. Para isso, as uniões dos diferentes segmentos-de-torre devem comportar-se como nós rígidos da estrutura, que possam garantir um comportamento monolítico do sistema estrutural.

**[042]** A figura 2-A do presente relatório ilustra os problemas básicos existentes nas uniões de segmentos-de-torre das torres destinadas à geração eólica de energia elétrica. Essa figura mostra que a flexão e a ruptura provocadas por forças aplicadas a flanges delgadas salientes, paralelamente às paredes que as sustentam. A flexão das abas é integralmente propagada para a parede de sustentação, independentemente da existência e da posição de eventuais enrijecedores triangulares ("mãos francesas") colocados perpendicularmente à parede de sustentação.



**[043]** A figura 2-B apresenta uma solução do estado da técnica, recomendada pelo *Concrete Center* em suas publicações (2007/2005) já citadas anteriormente, para ser aplicada à união de paredes delgadas de torres cilíndricas construídas por superposição dos segmentos-de-torre com emprego de guindastes de grande altura. As paredes cilíndricas dos segmentos-de-torre dispõem em sua extremidade superior de um anel metálico rígido 201, e em sua extremidade inferior de um anel metálico rígido 202. Os anéis metálicos dos segmentos-de-torre vizinhos, com iguais diâmetros, são ligados por barras de aço 506 que aplicam forças 203. De forma análoga, os cabos 204 de protensão longitudinal são ancorados em ambos os anéis metálicos da extremidades de cada segmento-de-torre. A cada barra de união e cabo de protensão correspondem trechos 205 ao longo do perímetro das abas salientes 208 dos anéis rígidos. As barras de ligação aplicam binários de torção concentrados, com representação intuitiva 206, agindo no sentido horário nos setores do anel metálico 202, e aplicam binários de torção concentrados, com representação intuitiva 207, agindo no sentido anti-horário nos setores do anel metálico 201.

**[044]** Essa figura 2-B mostra o efeito global desses binários de torção, sobre o anel metálico 201 da extremidade inferior do segmento-de-torre que participa da união, por meio da representação vetorial 209 desses binários. Embora a resultante desses binários ao longo de todo o perímetro da aba 208 seja nula, a resultante 210 ao longo da metade esquerda da aba 208 mostra que o efeito global corresponde a um binário de flexão 211, aplicado virtualmente na extremidade esquerda do anel 201.

Na metade direita da aba 208, o efeito global dos binários localizados de torção é simétrico ao efeito anterior. A resultante 212 dos binários de torção também corresponde a um binário virtual de flexão 213 aplicado na extremidade direita do anel 211. O conjunto desses binários de flexão simulam, para cada par de segmentos 205 simetricamente dispostos ao longo da aba rígida 208, barras de flexão 214 e 215 na direção definida por cada par de segmentos considerado.

**[045]** O efeito conjunto dos binários de torção 206 e 207 que agem em sentidos opostos tende a provocar uma abertura de rotação entre as seções transversais dos anéis rígidos 202 e 201, obrigando a que haja uma rotação igual entre as seções transversais das paredes de concreto a eles respectivamente solidarizadas. Desse modo, uma parte dos binários de torção 206 e 207, que deveriam equilibrar-se entre si, são transferidos como momentos fletores para as paredes de concreto ligados aos anéis do nó duplo de união dos segmentos-de-torre. Quanto maior é a rigidez dos anéis 201 e 202, menor é a rotação relativa por torção dos anéis metálicos entre si, e menor é a flexão que solicita as paredes de concreto dos segmentos-de-torre. Um fenômeno da mesma natureza, mas em sentidos contrários aos anteriores, ocorre com as forças aplicadas aos anéis 201 e 202 pelos cabos de protensão longitudinal dos segmentos-de-torre.

**[046]** Na tentativa de apropriação de conhecimentos existentes a respeito da movimentação telescópica de elementos de uma construção, embora empregando apenas técnicas já conhecidas da Engenharia Civil, foram requeridos privilégios de invenção para

tais conhecimentos através do pedido de patente US2012/0159875A1 "TELESCOPIC TOWER ASSEMBLY AND METHOD" de 28/06/2012, que descreve o método construtivo telescópico como se fosse uma novidade na indústria da construção civil.

**[047]** Os desenhos apresentados no documento citado não apresentam qualquer detalhe referente às dimensões das abas salientes, que são mostradas apenas em desenhos esquemáticos com dimensões muito pequenas, que não mostram se podem ter dimensões adequadas à formação de nós rígidos necessários às funções a serem por eles exercidas. Em particular, os detalhes das abas mostrados em desenhos com dimensões um pouco maiores, em suas figuras 3 e 4, que também são esquemáticos e da mesma natureza que os detalhes mostrados nas figuras 1, 2, 9, e 10, revelam-se inadequados à união de peças de concreto estrutural, por não terem arranjo estrutural que possa resistir aos esforços de flexão que agem nessas uniões, nem rigidez suficiente para garantir o monolitismo do comportamento estrutural. Em resumo, a ausência de anéis rígidos, como os anéis formados pelas caixas metálicas analisadas nos parágrafos anteriores, inviabiliza este método construtivo tanto para estruturas de aço quanto para as de concreto.

### **Objetivos da Invenção**

**[048]** Em vista do exposto, tem a presente invenção o objetivo de resolver o problema de como realizar esses anéis rígidos de concreto, com diâmetros diferentes que permitem o içamento telescópico dos segmentos de torre.

[049] Outro objetivo é o desenvolvimento de um método construtivo para montagem de torres de concreto estrutural formadas por uma pluralidade de segmentos-de-torre cilíndricos.

### **Descrição Geral da Invenção**

[050] De acordo com a presente invenção, foi desenvolvido um "nó estrutural duplo" de concreto estrutural, de comportamento reverso, que possibilita a construção de torres com alturas de até mais de uma centena de metros, mediante o içamento telescópico de segmentos-de-torre cilíndricos, com comprimentos individuais da ordem de 15 a 30 metros, com diâmetros constantes, da ordem de 10 a 3 metros, que diminuem progressivamente à medida que são colocados em posições mais altas ao longo da torre.

[051] A construção dos elementos-de-torre é feita com o acoplamento de módulos cilíndricos de parede delgada, montados no canteiro de obra com elementos de concreto estrutural fabricados industrialmente que são consolidados por protensão longitudinal. Alternativamente, as peças pré-fabricadas industrialmente são construídas com o formato de setores cilíndricos alongados, com comprimentos da ordem de 10 a 20 metros e larguras da ordem de 3 metros, que no canteiro de obra são consolidados por protensão transversal, construindo-se assim os segmentos-de-torre desejados.

[052] Os segmentos-de-torre são construídos com a forma de tubos de grandes diâmetros, mas com paredes delgadas, de espessuras da ordem de 20 a 30 centímetros. Para a construção dos "nós duplos"

de comportamento reverso das uniões dos segmentos-de-torre, em suas extremidades são construídas "faixas anulares espessas de concreto protendido" que, ligadas e solidarizadas entre si, também por protensão, formam um sistema estrutural especial que confere à estrutura da torre um comportamento monolítico.

**[053]** A presente invenção, mediante o provimento de anéis de grande rigidez, com diâmetros diferentes nas extremidades dos segmentos-de-torre, atende a todos os requisitos necessários à construção telescópica de torres de concreto estrutural destinadas à geração eólica de energia elétrica, coisa que não pode ser feita no estado da técnica.

**[054]** Para que os nós duplos de ligação dos segmentos-de-torre tenham rigidez adequada, as faixas anulares espessas que compõem cada elemento do nó duplo, devem ter comprimentos da ordem de seis a oito vezes a espessura da parede do segmento-de-torre, e espessuras de até três vezes a espessura da parede do segmento-de-torre. Em torres com parede de 20 centímetros, cada faixa anular terá comprimentos da ordem de um metro e meio e espessuras da ordem de meio metro, constituindo, em conjunto, elementos de ligação que conferem aos nós duplos comprimentos da ordem de até 3 metros.

### **Descrição das Figuras**

**[055]** As demais características e vantagens da invenção serão melhor compreendidas através da descrição de uma concretização exemplificativa e não limitativa, e das figuras que a ela se referem, nas quais:

**[056]** A figura 1, que se refere ao Estado da Técnica, mostra esquematicamente os sucessivos procedimentos empregados na construção de torres de concreto destinadas à geração eólica de energia elétrica. Esses procedimentos incluem o indispensável emprego de guindastes metálicos auxiliares, com alturas superiores à altura da própria torre a ser construída, condição essa que não existe com a presente invenção.

**[057]** A figura 2-A demonstra a impossibilidade da ligação dos segmentos-de-torre com paredes delgadas, por simples flanges também delgadas, em virtude da flexão dessas paredes delgadas, decorrente da transmissão dos esforços a que tais flanges são submetidas.

**[058]** A figura 2-B mostra que para os segmentos-de-torre de parede delgada, de qualquer material estrutural, seja aço ou concreto, serem unidos solidariamente entre si, mesmo por métodos construtivos não telescópicos, é indispensável a existência de anéis de grande rigidez nas extremidades dos segmentos-de-torre que se unem, não sendo possível empregar apenas simples flanges delgadas.

**[059]** A figura 3 mostra esquematicamente, em perspectiva, o aspecto de uma torre com todos os segmentos-de-torre já montados e prontos para erguimento, bem como as posições desses segmento-de-torre após terem sido erguidos e colocados em suas posições finais na torre.

**[060]** A figura 4 apresenta esquematicamente, em corte diametral vertical, a configuração geométrica de um dos segmentos-de-torre empregados nesta invenção, mostrando que atende a todos os requisitos necessários para a construção telescópica de torres de concreto estrutural.

**[061]** A figura 5 mostra esquematicamente o processo geral de içamento e posterior solidarização dos segmentos-de-torre permitido pela presença de anéis rígidos de concreto estrutural formados pelas abas espessas existentes nos anéis modulares cilíndricos de suas extremidades, considerando o arranjo de uma sequência de três segmentos-de-torre vizinhos, segmento inferior 501, segmento intermediário 502 e segmento superior 503, concêntricos com o eixo 311 da torre.

**[062]** A figura 6-A mostra esquematicamente o arranjo básico dos cabos da armadura de protensão circunferencial 610 da região inferior aba 403 da extremidade superior do segmento-de-torre inferior 603, e o arranjo básico dos cabos de protensão da armadura circunferencial 611 da região inferior aba 401 da extremidade inferior do segmento-de-torre superior 602. Essas armaduras são responsáveis pela resistência do nó de ligação dos segmentos-de-torre vizinhos às cargas verticais atuantes, inclusive as forças de peso próprio.

**[063]** A figura 6-B mostra o arranjo das tensões de compressão do concreto que, em conjunto com os cabos circulares de equilíbrios das bielas comprimidas descritas na figura 6-A, formam a

estrutura interna dos anéis rígidos que formam o nó de ligação dos segmentos-de-torre.

**[064]** Observe-se que os dois cabos circulares de protensão da região superior dos anéis rígidos têm uma finalidade assegurar a resistência da faixa superior desses anéis diante dos esforços de cisalhamento, flexão e torção que atuam na estrutura da torre.

**[065]** A figura 7 mostra o arranjo de todas as armaduras, protendidas e passivas, dentro do nó duplo de comportamento reverso construído com as faixas espessas em contato de dois segmentos-de-torre vizinhos ligados entre si.

**[066]** A figura 8 mostra as diversas fases do processo de montagem da torre.

### **Descrição Detalhada da Invenção**

**[067]** A presente invenção mantém alguns procedimentos básicos do Estado da Técnica referentes a atividades preliminares, algumas das quais estão ilustradas na Fig. 1. Esses procedimentos básicos que levam à construção de segmentos-de-torre podem ser de dois tipos diferentes, que são escolhidos em função das disponibilidades industriais existentes nas proximidades do local da construção das tores. Em um dos tipos de procedimentos básicos, os elementos construtivos pré-fabricados têm por objetivo construir os segmentos-de-torre como conjuntos de anéis cilíndricos superpostos e, no outro tipo, como conjuntos de setores alongados de superfícies cilíndricas protendidas



longitudinalmente que são unidos por protensão circular transversal.

**[068]** Para a descrição detalhada dos procedimentos construtivos preliminares que levam à construção de segmentos-de-torre, por ser o mais comum, escolheu-se o primeiro dos tipos citados, que é constituído pelas seguintes fases, todas elas realizadas com conhecimentos do estado da técnica:

**[069]** - execução da fundação 103 no local da obra;

**[070]** - recebimento dos elementos estruturais de concreto 102, fabricados industrialmente e transportados para a obra por veículos rodoviários 104;

**[071]** - montagem dos anéis modulares que serão superpostos para formar os segmentos-de-torre, com as dimensões especificadas para cada um destes.

**[072]** - superposição dos anéis modulares intermediários 308, todos de mesmo diâmetro para cada um dos segmentos-de-torre, bem como dos anéis das extremidades inferior 306 e superior 307, cujas características são descritas a seguir:

- segundo mostra a Fig. 4, o anel modular cilíndrico 306 da extremidade inferior dos segmentos-de-torre têm um comprimento total 406, na qual existe uma faixa de extremidade 402 mais espessa, de comprimento 407 e diâmetro interno 412 igual ao diâmetro interno 410 dos anéis 308 do corpo médio paralelo, e com diâmetro

externo 413 maior que o diâmetro externo 411 dos anéis do corpo médio, formando uma aba saliente projetada para o exterior do segmento-de-torre;

- o anel modular cilíndrico 307 da extremidade superior dos segmentos-de-torre têm um comprimento total 408, na qual existe uma faixa de extremidade mais espessa, com comprimento 409 e diâmetro interno 414 menor que o diâmetro interno 410 dos anéis do corpo médio, com diâmetro externo 415 igual ao diâmetro externo 411 dos anéis do corpo médio, formando uma aba saliente projetada para o interior do segmento-de-torre.

**[073]** - realização da protensão longitudinal final dos tirantes 604 (ilustrados na Fig. 6-A) dos segmentos de torre comprimindo mutuamente os anéis intermediários 308 e os anéis das extremidades inferior 306 e superior 307 de modo a formar um segmento-de-torre.

**[074]** A partir deste ponto, terminam os procedimentos conhecidos no estado da técnica e passa-se à execução dos passos específicos da invenção, conforme segue:

**[075]** A Fig. 4 mostra esquematicamente, em corte diametral vertical, que os anéis cilíndricos modulares 306 e 307 das extremidades dos segmentos-de-torre são feitos com duas faixas de espessuras diferentes 418 e 417 em suas respectivas extremidades. As outras faixas desses anéis, que são ligadas aos respectivos anéis modulares 308, vizinhos do mesmo segmento, têm a mesma espessura 416 que esses 308 do corpo médio do segmento-

de-torre. A faixa espessa 401 (fig. 4) da extremidade inferior dos segmentos-de-torre e a faixa espessa 403 da extremidade superior dos segmentos-de-torre que fazem contato entre segmentos-de-torre vizinhos, têm espessuras maiores, constituindo-se em anéis 601 (fig. 6-A) de grande rigidez, que formam as abas salientes 402 nas extremidades inferiores e 404 nas extremidades superiores dos segmentos-de-torre, mantendo uma área comum nessa face de contato e permitindo a ligação por compressão recíproca das extremidades dos segmentos-de-torre vizinhos, embora eles tenham diâmetros diferentes.

**[076]** Na extremidade superior dos segmentos-de-torre (fig. 4), a aba saliente (404) é dirigida para o interior da torre, e na extremidade inferior da aba saliente (402) é dirigida para o exterior da torre.

**[077]** Segundo mostra a Fig. 5, a ligação das abas salientes 402 da extremidade inferior dos segmentos-de-torre com as abas salientes 404 da extremidade superior dos segmentos-de-torre é feita por meio de cabos ou de barras protendidas de aço 506, que permitem a solidarização de segmentos-de-torre adjacentes já em suas posições finais, 501 inferior e 502 intermediárias, com diâmetros diferentes, e possibilitam o içamento telescópico dos segmento-de-torre em posição superior 503, sem o emprego de guindastes externos à própria torre em construção.

**[078]** As abas salientes dos segmentos-de-torre vizinhos são ligadas entre si por armaduras longitudinais protendidas 506, distribuídas ao longo da periferia dos segmentos-de-torre, em

orifícios adequadamente localizados para essa união, abas essas que dispõem de armaduras protendidas e de armaduras passivas transversais, destinadas a resistir aos esforços transversais internos, decorrentes das mudanças de direção dos esforços longitudinais internos ao longo dessas abas.

**[079]** Em resumo, este novo método construtivo telescópico é essencialmente baseado na união de segmentos-de-torre vizinhos, por meio de um nó duplo de comportamento reverso, composto por anéis espessos de concreto estrutural que formam abas salientes nas extremidades desses segmentos, sem necessidade de emprego de abas metálicas, nem de guindastes auxiliares empregados no estado da técnica.

**[080]** Numa realização exemplificativa, apresentada apenas para fixar as ideias, admite-se que o método construtivo se refira a uma torre 301 (fig. 3-A) com altura "H" 312 de cerca de 100m, formada com segmentos-de-torre 302, 303, 304, (base, intermediários, de topo), com comprimentos "h" 309 variáveis, tendo diâmetros externos constantes "D", mas que diminuam à medida que os segmentos ficam situados em posições mais altas, admitindo-se também que o segmento-de-torre de base 302 tenha um diâmetro de 10m, chegando ao segmento-de-torre de topo 304 com o diâmetro de 3m.

**[081]** As espessuras das abas 402 (inferior) e (404) superior que formam os anéis de rigidez 601 (Fig. 6-A) das extremidades dos segmentos-de-torre são da ordem de duas a três vezes a espessura dos anéis modulares cilíndricos 308 (Fig. 4) que formam o corpo

médio dos segmentos-de-torre, chegando a espessuras de 0,5m a 1,0m e o comprimento desses anéis é da ordem seis a oito vezes a espessura dos anéis 308, chegando até comprimentos da ordem de 1,5m. Esses anéis de rigidez são solidarizados entre si e às paredes dos corpos dos dois segmentos-de-torre por protensão longitudinal e por protensão transversal circular. Desse modo, o conjunto dos dois anéis de união das extremidades dos segmentos-de-torre vizinhos forma um nó rígido, com dois anéis de alturas individuais de 1m a 1,5m e espessuras da ordem de 70cm a 1m, formando em conjunto um nó estrutural de comportamento reverso, com comprimento longitudinal da ordem de até 3m, garantindo um significativo aumento da rigidez transversal dos segmentos-de-torre. De acordo com as modernas teorias das estruturas de concreto, as espessuras desses anéis de extremidades são suficientemente grandes para que o conjunto dos nós de ligação 601 funcionem como se fossem uma estrutura maciça, permitindo que o funcionamento estrutural da torre simule o comportamento de uma viga de seção maciça, engastada na fundação da base.

**[082]** Segundo mostra a figura 3-A, o presente método prevê que os segmentos-de-torre de base 302, intermediários 303 e de topo 304 sejam construídos, sobrepondo-se os módulos cilíndricos 306, 307, 308 (fig. 3-B) uns em volta dos outros, diretamente sobre a fundação 310, formando um conjunto de segmentos segmentos-de-torre 305, que permite elevar esses segmentos-de-torre que compõem a torre 301, por dentro da própria torre a ser construída sem o uso de guindastes de grandes alturas e capacidades de carga como exigido nos métodos convencionais.

**[083]** Ao fim da construção dos segmentos-de-torre 302, 303, 304, com módulos cilíndricos 306, 307, 308 adequados, forma-se, diretamente, sobre a fundação 310, um conjunto 305 de segmentos-de-torre, formado por: segmento-de-torre base externo de maior diâmetro 302; segmentos-de-torre intermediários 303, de diâmetros menores que aquele e sucessivamente menores uns em relação aos outros; e segmento-de-torre de topo 304 de menor diâmetro, todos apoiados diretamente na fundação 310, dispostos uns dentro dos outros, concêntricos entre si e em relação ao eixo 311 da torre, conforme ilustrado na figura 3-B.

**[084]** O segmento-de-torre externo no conjunto segmento-de-torre de base 302, fica solidarizado à fundação 310 desde a sua construção. Ao longo do içamento, os demais segmentos, intermediários 303 e de topo 304 serão solidarizados sucessivamente entre si, à medida que são içados e ligados ao segmento que lhes dá apoio.

**[085]** No método construtivo telescópico ora proposto, como se mostra na figura 3-B, uma torre 301 é construída com segmentos-de-torre 302, 303, 304 cilíndricos, de comprimentos (altura) "h" variáveis, formando um conjunto 305 de segmentos-de-torre que são içados individualmente, como se mostra na figura 8, e superpostos uns sobre os outros, com diâmetros externos que diminuam à medida que os segmentos-de-torre ficam em níveis mais elevados.

**[086]** Como é mostrado em (b) na figura 8, este processo de içamento dos segmentos-de-torre é iniciado pelo segmento

intermediário 303 que no conjunto 305 de segmentos é adjacente ao segmento exterior, segmento-de-torre de base 302, e termina com o segmento de topo 304 que está no centro do conjunto de segmentos 305 e que é colocado no topo da torre 301.

**[087]** O içamento dos segmentos de torre é feito por meio de quatro a oito cabos flexíveis 504 (Fig. 5) de içamento, com ancoragens passivas na face inferior da aba saliente 402 externa localizada na extremidade inferior do segmento de torre 503 (fig. 5) que vai ser suspenso. As forças de içamento são aplicadas por meio de macacos de içamento (505) instalados na face superior da aba saliente 404 interna localizada na extremidade superior do segmento de torre 502 que dá sustentação ao levantamento e que, após o içamento, ficará posicionado na posição abaixo do segmento que foi içado.

**[088]** O processo de montagem dos segmentos-de-torre, 302, 303, 304 é realizado, simultaneamente, com todos os segmentos do conjunto de segmentos 305. Para cada segmento-de-torre 302 ou 303 ou 304 (figura 3-B), a construção é necessariamente iniciada pelo anel cilíndrico da extremidade inferior dotado da aba externa inferior 402, que ficará dirigida para o exterior da torre. A seguir são colocados os anéis cilíndricos intermediários 308 que formam o corpo médio e, ao final, é instalado o anel da extremidade superior 307', no qual existe a aba interna superior 404, que ficará dirigida para o interior da torre.

**[089]** Os segmentos-de-torre 302, 303, 304, construídos uns dentro dos outros, para serem içados individualmente, um de cada vez, ficam afastados diametralmente entre si por folgas 709 (fig. 7) da ordem de cinco centímetros (5cm), que são suficientes para que, no içamento dos segmentos de torre, não haja interferência entre eles. Como medida suplementar de garantia da liberdade de içamento independente dos segmentos de torre, em suas extremidades são colocados afastadores metálicos flexíveis (não ilustrados) com a espessura de cinco centímetros (5cm), posicionados na referida folga. Para o nivelamento perfeito dos segmentos-de-torre, na operação de içamento são colocados calços de concreto 711 dentro de uma folga horizontal 710 da ordem de 10 centímetros que é grouteada rigidamente na conclusão da operação.

**[090]** A figura 5 mostra esquematicamente o processo de içamento dos segmentos-de-torre, considerando o arranjo de uma sequência de três segmentos. O segmento-de-torre superior 503 está em processo de içamento por meio de cabos flexíveis de içamento 504, que são tracionados por equipamentos hidráulicos de içamento (*Strand Jack*) 505 instalados no topo da aba 404 da extremidade superior do segmento-de-torre intermediário 502, que permanecerá em posição inferior à posição final do segmento-de-torre superior 503. Na extremidade oposta, os cabos flexíveis estão ancorados na face inferior da aba saliente 402 da extremidade inferior do segmento superior 503 que está sendo içado.



**[091]** O segmento-de-torre intermediário 502, que dá apoio para o içamento do segmento superior 503, está em sua posição final, suspenso por barras de emenda 506, ancoradas, de um lado, na face inferior da aba inferior externa 402 da extremidade inferior do segmento-de-torre intermediário 502, e do outro lado, na face superior da aba superior interna 403 da extremidade superior do segmento-de-torre inferior 501, que dá apoio a todos os segmentos de torre situados em posição mais alta que a sua própria posição.

**[092]** O processo de içamento, realizado isoladamente com cada segmento de torre, é controlado eletronicamente, em tempo real, sendo controlados as forças aplicadas por cada macaco 505 de içamento e os deslocamentos verticais de cada cabo de içamento 504, controlando-se assim a verticalidade do segmento em elevação.

**[093]** A união de dois segmentos de torre superpostos é feita por meio do contato da face superior da faixa espessa 401 que forma a aba saliente externa 402 da extremidade inferior de um segmento de torre 503, que na torre, ficará em posição mais alta, com a face inferior da faixa espessa 403 que forma a aba saliente interna 404 da extremidade superior do segmento de torre que na torre ficará em posição mais baixa.

**[094]** A figura 7 mostra o arranjo completo dos cabos de protensão responsáveis pela composição do nó duplo de união de dois segmentos-de-torre, formado pela união da aba saliente 401

do segmento superior 602 com a aba saliente 403 do segmento inferior 603.

**[095]** A figura 6-A mostra que a protensão longitudinal do segmento-de-torre superior 602 é dada pelos cabos de protensão 604, embutidos em orifícios existentes ao longo de sua parede cilíndrica, com ancoragens 605 situadas na face inferior da aba 401. A protensão longitudinal do segmento-de-torre inferior 603 é dada pelos cabos de protensão 606, embutidos em orifícios existentes ao longo de sua parede cilíndrica, com ancoragens 607 situadas na face superior da aba 403. A armadura de solidarização das abas 401 e 403, dos segmentos-de-torre que se ligam por um nó duplo de comportamento reverso, pois esses segmentos-de-torre tem diâmetros diferentes, é feita por barras protendidas 506, com ancoragem inferior 608 na face inferior da aba 401 da extremidade inferior do segmento superior 602, e ancoragem superior 609 na face superior da aba 403 da extremidade superior do segmento inferior 603.

**[096]** As forças de protensão longitudinal são ancoradas nas extremidades de cada segmento-de-torre, produzindo um campo uniforme de tensões de compressão verticais, que vai se superpor às tensões verticais de compressão das cargas externas de compressão aplicadas à torre, nelas se incluindo as próprias forças peso.

**[097]** Como o diâmetro do segmento-de-torre suportado é menor que o diâmetro do segmento-de-torre de suporte, as tensões de compressão verticais existentes no segmento suportado, ao longo

do nó duplo de comportamento reverso transformam-se em tensões de compressão inclinadas para poder passar de um segmento de diâmetro menor para um segmento de diâmetro maior.

**[098]** A figura 6-A também mostra os cabos da armadura de protensão circunferencial 610 da região inferior aba 403 da extremidade superior do segmento-de-torre inferior 603 e o arranjo dos cabos de protensão da armadura circunferencial 611 da região inferior aba 401 da extremidade inferior do segmento-de-torre superior 602, que são necessários para o equilíbrio dos campos inclinados de tensões de compressão 623 e 624 mostrados na figura 6-B.

**[099]** A figura 6-B mostra o arranjo das tensões de compressão 616 e 617 do concreto que, em conjunto com os cabos de protensão circulares 610 e 611 constituem a estrutura interna básica dos anéis rígidos que formam o nó de ligação dos segmentos-de-torre. Observe-se que os dois cabos circulares de protensão das regiões superiores dos anéis rígidos têm por finalidade completar a resistência da estrutura sob a ação de esforços de flexão, de esforços de cisalhamento e de esforços de torção que atuam na região de ligação dos anéis vizinhos. A estrutura completa do nó de ligação dos segmentos-de-torre vizinhos está mostrada na figura 7.

**[0100]** A figura 6-B mostra as tensões de compressão 620 na parede do corpo médio do segmento-de-torre sustentado, e 621 na parede do segmento de sustentação, bem como as respectivas bielas inclinadas 623 e 624 que conduzem essas tensões de compressão às

correspondentes ancoragens 608 e 609 da armadura de ligação dos dois segmentos-de-torre vizinhos.

**[0101]** A figura 7 mostra todas as armaduras, passivas e protendidas, e seu arranjo estrutural dentro do nó duplo de comportamento reverso construído com as faixas espessas em contato de dois segmentos-de-torre vizinhos. A parede 603 do segmento que dá suporte envolve a parede 602 do segmento-de-torre suportado. Entre elas existe uma folga 709 da ordem de cinco centímetros (5cm) para garantir que durante a operação de içamento não haja interferência entre os dois segmentos-de-torre. Posteriormente, ao final da ligação, essa folga 709 é preenchida com graute de alta resistência consolidando a ligação dos dois segmentos. Para o nivelamento perfeito dos segmentos-de-torre, na operação de içamento são colocados calços de concreto 711 dentro de uma folga horizontal 710 da ordem de 10 centímetros que é grouteada rigidamente na conclusão da operação.

**[0102]** A figura mostra também a laje de concreto transversal 701, unida à face da extremidade inferior do segmento-de-torre suportado, que consolida transversalmente todas as peças estruturais dessa região de ligação. A laje 701 é suportada pela peça de ancoragem 702 situada entre a ancoragem 605 da armadura de protensão longitudinal desse segmento-de-torre e a ancoragem 608 da armadura de ligação dos anéis rígidos dos dois segmentos-de-torre. Nessa mesma figura são mostrados os cabos de protensão circular 703 da região superior da faixa espessa 401 do segmento-de-torre suportado, e os cabos de protensão circular

704 da região superior da faixa espessa 403 do segmento-de-torre de suporte. Essas armaduras garantem a compressão tangencial dos anéis de rigidez das extremidades dos segmentos-de-torre, impedindo que, durante a vida útil da torre, neles apareçam tensões de tração decorrentes dos estados múltiplos de tensões devidos à ação dos esforços de cisalhamento e de torção decorrentes da ação do vento nos equipamentos de geração de energia elétrica e na própria superfície lateral da torre.

**[0103]** De maneira análoga, com a mesma finalidade de segurança, de que não apareçam tensões de tração nas paredes 612 e 613 dos corpos médios dos dois segmentos-de-torre vizinhos, a figura 7 mostra as armaduras de protensão circular 706 e 705 que devem ser respectivamente colocadas ao longo do corpo médio dos dois segmentos-de-torre unidos pelo nó duplo de comportamento reverso.

**[0104]** A figura 7 mostra os estribos das armaduras passivas 708, de reforço da região de ancoragem diametral dos cabos de protensão circular 611, colocados na região inferior da faixa espessa da extremidade inferior do segmento-de-torre suportado, os quais dão apoio horizontal às faixas comprimidas de concreto 623, já consideradas na análise da figura 6-B, que a partir do nó estrutural 622, passam a suportar, de modo inclinado, as tensões verticais de compressão 620 provenientes das cargas 618 aplicadas externamente à torre, faixas inclinadas essas que se apoiam em sua base na ancoragem 608 da armadura de ligação dos anéis rígidos que formam o nó duplo de comportamento reverso e, em seu topo, apoiam-se horizontalmente na região superior do

anel rígido da extremidade inferior do segmento-de-torre suportado, que estruturalmente simula uma faixa virtual diametral de compressão 617 (indicada na Fig. 6-B).

**[0105]** De modo análogo, a figura 7 também mostra os estribos das armaduras passivas 707 de reforço da região de ancoragem diametral dos cabos de protensão circular 610, colocados na região inferior da faixa espessa da extremidade superior do segmento-de-torre de suporte, os quais dão apoio horizontal à extremidade inferior das faixas de concreto 624 que em sua extremidade superior, na região da ancoragem 609 da extremidade superior das barras 506 da armadura de ligação dos anéis rígidos do nó duplo da torre, de modo inclinado passam a suportar a componente vertical da força aplicada por essas barras 506, faixas inclinadas essas que em seu topo se apoiam horizontalmente na região superior do anel rígido da extremidade superior do segmento-de-torre de suporte, que estruturalmente simula uma faixa virtual diametral de compressão 616 (indicada na Fig. 6-B).

**[0106]** A figura 8 resume esquematicamente o novo método construtivo apresentado por esta invenção, mostrando, em (a) o conjunto 305 de segmentos-de-torre, formado por: segmento-de-torre de base de maior diâmetro externo 302; intermediários 303 de diâmetros menores que aquele e sucessivamente menores uns em relação aos outros, e central de topo 304 de menor diâmetro, construídos com diferentes alturas "h" 309, no interior do segmento de base externo 302, que é o de maior diâmetro, diretamente sobre a fundação 310 e concêntricos entre si e em

relação ao eixo 311 da torre. Os passos (b) até (e) mostram que o levantamento dos segmentos-de-torre é iniciado com o segmento intermediário 303, vizinho ao segmento de base 302 exterior do conjunto 305, e termina com a elevação do segmento de topo central 304, com o qual fica completada a construção da torre 301, com a altura 312.

**[0107]** A construção dos elementos-de-torre é feita com o acoplamento de módulos cilíndricos de parede delgada, montados no canteiro de obra com elementos de concreto estrutural fabricados industrialmente que são consolidados por protensão longitudinal. Alternativamente, as peças pré-fabricadas industrialmente são construídas com o formato de setores cilíndricos alongados, com comprimentos da ordem de 10 a 20 metros e larguras da ordem de 3 metros, que no canteiro de obra são consolidados por protensão transversal, construindo-se assim os segmentos-de-torre desejados.

**[0108]** Mais detalhadamente, a figura 5 mostra, de modo genérico, o içamento, segundo a presente invenção. Considerando um conjunto de 3 segmentos-de-torre sucessivos 501, 502 e 503, admita-se que o segmento 501 já tivesse sido anteriormente solidarizado à base da torre, e que também já tivesse sido usado para a operação de içamento do segmento-de-torre 502. A operação genérica de içamento é mostrada pelo içamento do segmento-de-torre 503, que, inicialmente compunha o conjunto concêntrico de 3 segmentos-de-torre, dispostos uns dentro dos outros, concêntricos entre si e em relação ao eixo "X" 310 da torre e apoiados sobre a fundação 310.

**[0109]** A partir dessa posição inicial, os equipamentos hidráulicos de içamento (Strand Jack) 505 são apoiados na borda superior do segmento de base externo 502, os cabos de aço de içamento 504 são atravessados nas respectivas aberturas da aba superior interna 404 do segmento de base 502 e nas aberturas da aba externa inferior 402 do segmento 503 vizinho e ancorados na face inferior da aba externa inferior 402 do segmento 503 a ser içado. A partir dessa posição é feito o içamento até que o segmento-de-torre 503 alcance a altura que deve ocupar na torre, condição em que a sua aba externa inferior 402 dispõe-se sob a aba interna superior 404 do segmento 502, guardando, como indicado na Fig. 7, a folga 710 entre ambas, pela presença dos calços de concreto 711 que permitem o posterior grauteamento da folga. Nessa posição, os cabos de ligação 504 são atravessados nas aberturas da aba interna superior 404 do segmento 504, e nas aberturas da aba externa inferior 402 do segmento 503, e, após o endurecimento adequado do graute, é feito o procedimento de protensão usual na técnica solidarizando os dois segmentos-de-torre. Os equipamentos hidráulicos de içamento (Strand Jack) 505 e cabos 504 são desmontados e transferidos para a borda superior do segmento-de-torre intermediário 503 recém erguido e os cabos são montados nas aberturas da aba externa inferior 402 do próximo segmento-de-torre a ser erguido.

**[0110]** Após a elevação de todos os segmentos-de-torre, a face inferior da aba saliente da extremidade inferior dos segmentos-de-torre é solidarizada ao longo de seu perímetro pela colocação de uma laje maciça 701 pré-moldada de concreto armado (ver Fig. 7), com abertura central, que é fixada por protensão vertical



702 a essa aba saliente, e que assim enrijece transversalmente essa seção transversal da torre.

**[0111]** Com este novo método de construção, todas as cargas que agem em um dado segmento-de-torre, inclusive as ações devidas ao peso do próprio segmento, são transmitidas para o segmento de torre que lhe está imediatamente abaixo, através da seção transversal formada pela face comum das duas abas salientes dos anéis em contato, que são solidarizadas por protensão após o endurecimento do groute de enchimento da folga existente entre elas.

**[0112]** Em suma, o método de construção segundo a presente invenção compreende as etapas seguintes:

**[0113]** - Construção da fundação 310 no local da torre com recursos usuais da técnica.

**[0114]** - Na alternativa de construção da torre por meio de segmentos modulares cilíndricos, construção de módulos anelares 306, 307, 308, e estes formadores dos segmentos-de-torre de base 302, intermediários 303 e de topo 304 que constituem a torre 301; dita pré-fabricação com equipamentos usuais do estado da técnica convenientemente arranjados para obtenção de conjunto de elementos pré-moldados em formas de setor de cilindro 102, que compõem módulos anelares 306, 307, 308 que compõem segmentos-de-torre 302, 303, 304 diferentes e novos em relação aos do estado da técnica; ditos segmentos-de-torre 302, 303, 304 constituindo corpos tubulares cilíndricos de concreto estrutural dotados de aba extrema inferior voltada para fora 402 e aba extrema

superior voltada para dentro 404 que têm incorporados dispositivos para ancoragem de cabo de içamento 504 e cabos (tirantes) 506 de ligação dos segmentos-de-torre 302, 303, 304. Nesta alternativa, os elementos estruturais pré-fabricados são solidarizados entre si por protensão longitudinal ao longo do comprimento dos diferentes segmentos-de-torre.

**[0115]** - Na alternativa de empregar elementos estruturais pré-fabricados com formato alongado, os segmentos-de-torre são montados com setores de superfícies cilíndricas que são acoplados e enrijecidos por meio de protensão transversal desses elementos industrializados.

**[0116]** - Em qualquer alternativa, todas as peças industrializadas são pré-fabricadas com todos as armaduras que irão compor as armaduras de protensão, longitudinal ou transversal, dos diferentes segmento-de-torre.

**[0117]** - Montagem dos segmentos-de-torre de base 302,, intermediários 303 e de topo 304, a partir da sobreposição dos módulos anelares 306, 307, 308, que formam o segmentos-de-torre 302, 303, 304, diretamente sobre a fundação 310, uns dentro dos outros concêntricos entre si e em relação ao eixo "X" 311 da torre, com o uso de equipamentos de movimentação de cargas, de pequeno porte, e de modo que se formem simultânea e progressivamente os anéis inferior, intermediárias e de topo dos segmentos-de-torre, que são ligadas por protensão e que ao fim da montagem forme-se diretamente sobre a fundação 310 um conjunto de segmentos-de-torre 305 que contém todos os

segmentos-de-torre que formam a torre 301; dito conjunto 305 formado: por segmento-de-torre base externo de maior diâmetro 302 ; segmentos-de-torre intermediários 303 de diâmetros menor que aquele e consecutivamente de diâmetros menores uns em relação aos outros; e segmento-de-torre central de menor diâmetro 304 todos dentro uns dos outros, concêntricos entre si e em relação ao eixo "x" 311 da torre e apoiados diretamente na fundação 310.

**[0118]** - Içamento dos segmentos-de-torre intermediários 303 e de topo 304 diretamente de sobre a fundação 310 com o uso de equipamentos hidráulicos de içamento (Strand Jack) 505 e cabos de içamento 504 sem a necessidade de uso de guindastes externos, içamento esse inteiramente diferente e novo em relação ao estado da técnica. Dito içamento compreendendo substancialmente o apoio dos equipamentos hidráulicos de içamento (Strand Jack) 505 na aba superior interna 404 de um segmento-de-torre de apoio que já ocupa seu lugar definitivo na composição da torre, e montagem de uma das extremidades dos cabos de içamento 504 nos respectivos equipamentos de içamento 505 e ancoragem das extremidades opostas na face inferior da aba extrema inferior externa 402 do segmento-de-torre a ser içado, situado imediatamente dentro e adjacente ao segmento-de-torre de apoio e realizar o içamento até que o segmento-de-torre içado alcance sua posição no conjunto da torre, na qual sua aba extrema inferior externa 402 fique em contato verticalmente sob a aba extrema superior interna 404 do segmento-de-torre de apoio, por meio dos calços de apoio, e grouteamento da folga existente nesse local, e realização da ligação entre ditas abas.

**[0119]** - Após o endurecimento adequado do groute injetado na folga existente entre as faces dos segmentos-de-torre que vão ser unidos, é feita a protensão dos tirantes 403 que solidarizam o nó duplo rígido e que conferem ao conjunto um comportamento estrutural monolítico.

**[0120]** - Ao final de todas essas etapas são instaladas as lajes transversais 701, fixadas por elementos de protensão 702 à face inferior das abas salientes 402 dos diferentes segmentos-de-torre, e a torre 301 fica composta por um segmento-de-torre de base de maior diâmetro 302 solidarizado na fundação 310; segmentos-de-torre intermediários 303 de diâmetros menores que aquele e uns em relação aos outros apoiados em referido segmento-de-base 302 e uns nos outros; e segmento-de-torre de topo 304 de menor diâmetro que os demais, apoiado no segmento-de-torre intermediário 303 imediatamente inferior e disposto no topo da torre 301; ditos segmentos-de-torre intermediários 303 ligados ao segmento-de-base 302 e uns aos outros e o segmento-de-topo 304 ligado ao segmento-de-torre intermediário 303 inferior através de ligações compreendendo as extremidades inferiores dos segmentos-de-torre acopladas nas extremidades superiores dos segmentos-de-torre imediatamente inferior e fixadas através de tirantes 506 ancorados nas abas extremas 302 e 304 de ditos segmentos-de-torre.

**[0121]** Embora a presente invenção tenha sido descrita em conexão com modalidades preferenciais de realização, deve ser entendido que não se pretende limitar a invenção àquelas modalidades particulares. Ao contrário, pretende-se cobrir todas as

alternativas, modificações e equivalentes possíveis dentro do espírito e do escopo da invenção, definidas de acordo com as reivindicações que seguem.

## REIVINDICAÇÕES

1. **TORRE DE CONCRETO ESTRUTURAL**, fabricada em concreto e constituída pelo empilhamento de uma pluralidade de segmentos-de-torre modulares telescópicos, compreendendo um segmento-de-torre inferior (302), um segmento-de-torre superior (304) e pelo menos um segmento-de-torre intermediário (303) caracterizada pelo fato da união dos segmentos-de-torre sobrepostos ser provida por nós estruturais duplos de comportamento reverso (601), ditos nós compreendendo faixas anulares (401, 403) espessas de concreto protendido situadas nas extremidades de cada segmento-de-torre (302, 303, 304, 501, 502, 503) ligadas e solidarizadas entre si.

2. **TORRE** de acordo com a reivindicação 1, caracterizada pelo fato de os segmentos-de-torre serem constituídos por anéis cilíndricos sobrepostos unidos por protensão longitudinal.

3. **TORRE** de acordo com a reivindicação 1, caracterizada pelo fato de os segmentos-de-torre serem constituídos por setores alongados de superfícies cilíndricas unidos por protensão circular transversal.

4. **TORRE** de acordo com a reivindicação 1, caracterizada pelo fato de ditas faixas anulares (401, 403) terem, cada uma, comprimento (407, 409) entre seis e oito vezes a espessura (416) da parede do segmento-de-torre e espessura (418, 417) de até três vezes a espessura de dita parede.

5. **TORRE** de acordo com a reivindicação 1, caracterizada pelo fato de, num dado segmento-de-torre considerado (502), ser provida uma primeira faixa anular espessa (404) que se projeta para dentro na extremidade superior e uma segunda faixa anular espessa (402) que se projeta para fora na extremidade inferior de dito segmento, o diâmetro interno de dita primeira faixa correspondendo ao diâmetro externo do segmento-de-torre (503) situado acima de dito segmento-de-torre considerado (502) e o diâmetro externo de dita segunda faixa (402) correspondendo ao diâmetro interno do segmento-de-torre (501) situado abaixo do segmento-de-torre considerado (502).

6. **TORRE** de acordo com a reivindicação 5, caracterizada pelo fato de serem providas uma folga entre a face interna de dita primeira faixa (404) e a face externa do segmento-de-torre (503) situado acima, e outra folga entre a face externa de dita segunda faixa (402) e a face interna do segmento-de-torre (501) situado abaixo do segmento-de-torre considerado (502).

7. **MÉTODO DE MONTAGEM DE TORRE DE CONCRETO ESTRUTURAL** constituída pelo empilhamento de uma pluralidade de segmentos-de-torre modulares telescópicos, compreendendo a execução da fundação (310) no local da obra, recebimento dos elementos estruturais modulares de concreto (102), fabricados industrialmente, formação de segmentos-de-torre (302, 303, 304) a partir da montagem de ditos elementos estruturais, montados in loco formando um conjunto (305) que compreende um primeiro segmento-de-torre base externo de maior diâmetro (302), segmentos-de-torre intermediários (303) de diâmetros menores que aquele e sucessivamente menores uns em relação aos outros e um último segmento-de-torre de topo 304 de menor diâmetro , todos

apoiados diretamente na fundação 310, dispostos uns dentro dos outros, concêntricos entre si, caracterizado pelo fato de compreender ainda os seguintes passos:

- a. içamento do segmento-de-torre intermediário (303) adjacente ao dito primeiro segmento-de-torre (302) por meio de cabos (504) ancorados na face inferior da aba (402) situada na extremidade inferior de dito segmento-de-torre intermediário (303) tracionados a partir de macacos (505) apoiados sobre a borda superior da faixa saliente (404) localizada na extremidade superior de dito primeiro segmento-de-torre (302);
- b. instalação de barras de emenda (506) ancoradas na face inferior da aba inferior externa (402) da extremidade inferior do segmento-de-torre intermediário (303), e do outro lado, na face superior da aba superior interna (404) da extremidade superior de dito primeiro segmento-de-torre (302);
- c. repetição dos passos (a) e (b) para os demais segmentos-de-torre intermediários bem como para o segmento-de-torre superior;
- d. preenchimento, com graute de alta resistência, da folga (709) entre a face superior da aba inferior externa (401) e a face superior da aba superior interna (403) bem como da folga horizontal (710) entre as faces internas das abas (401, 403), além da folga entre a face externa da faixa (401) e a face interna do corpo cilíndrico 613.



8. **MÉTODO** de acordo com a reivindicação 7, caracterizado pelo fato de que, após o empilhamento de todos os segmentos-de-torre, é provida uma laje maciça (701) na face inferior da aba inferior (401) dos segmentos-de-torre (303 e 304).

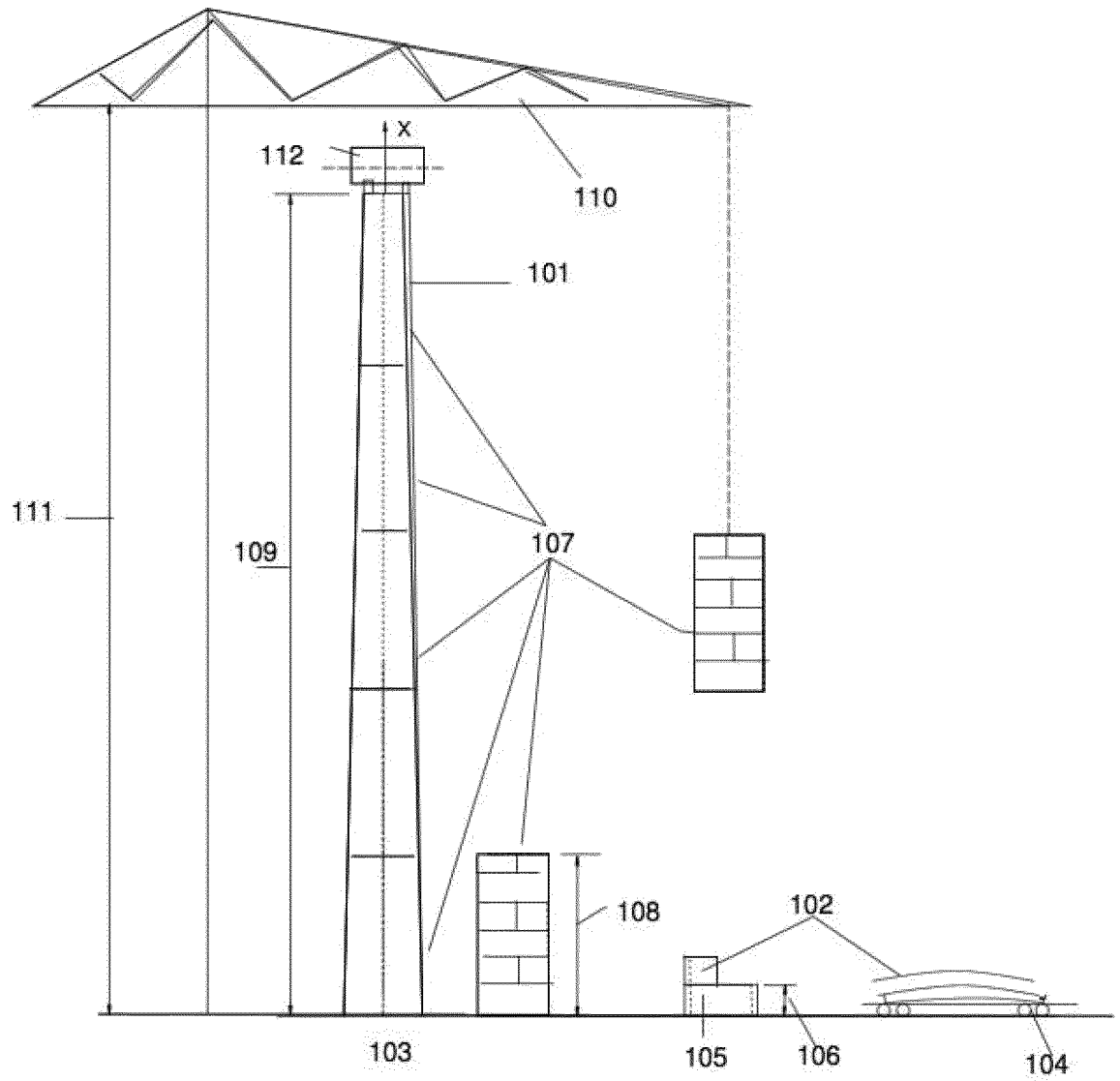


Figura 1

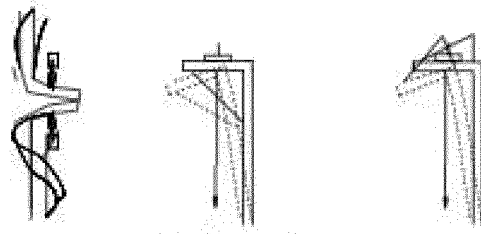


FIG. 2 A

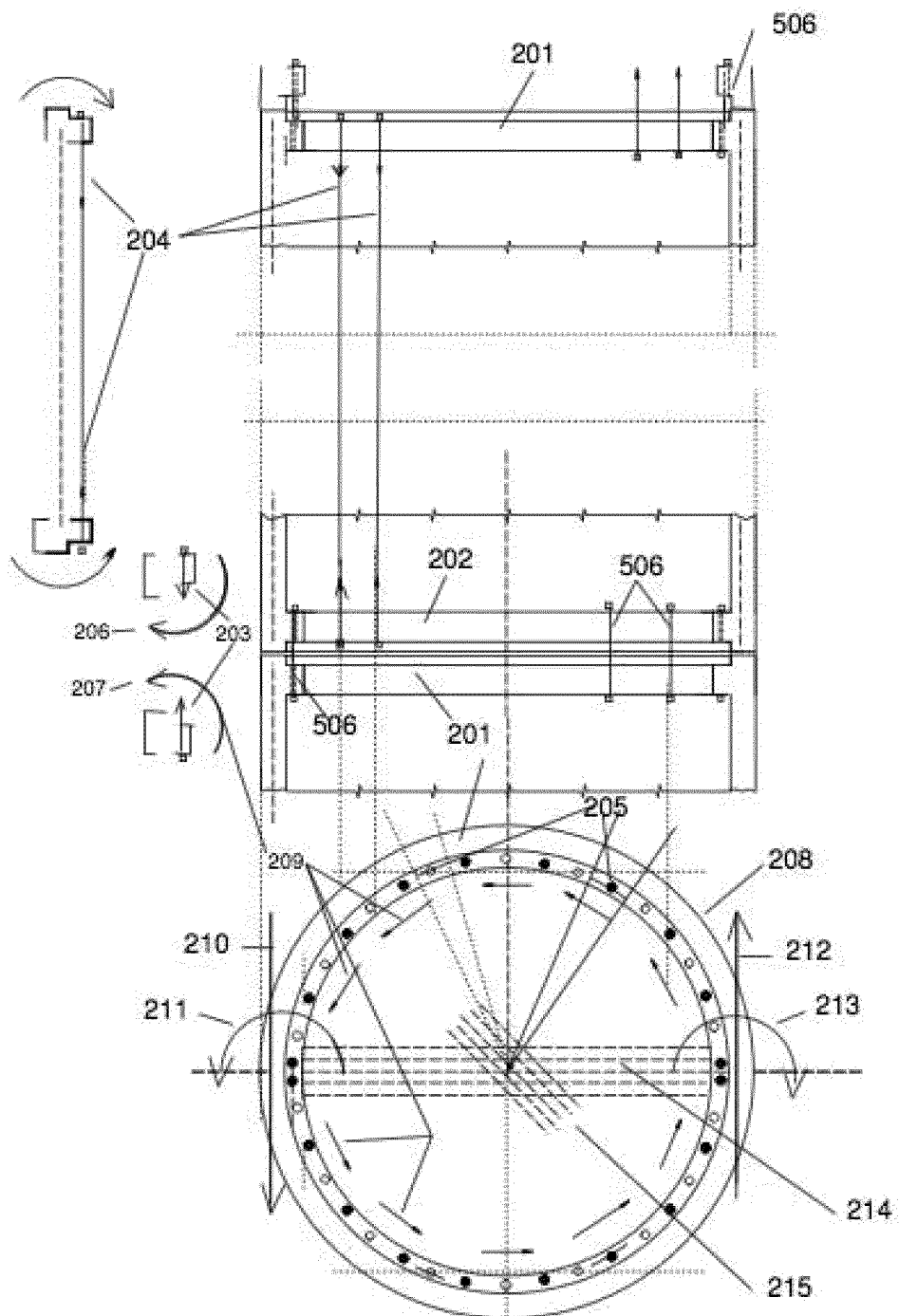
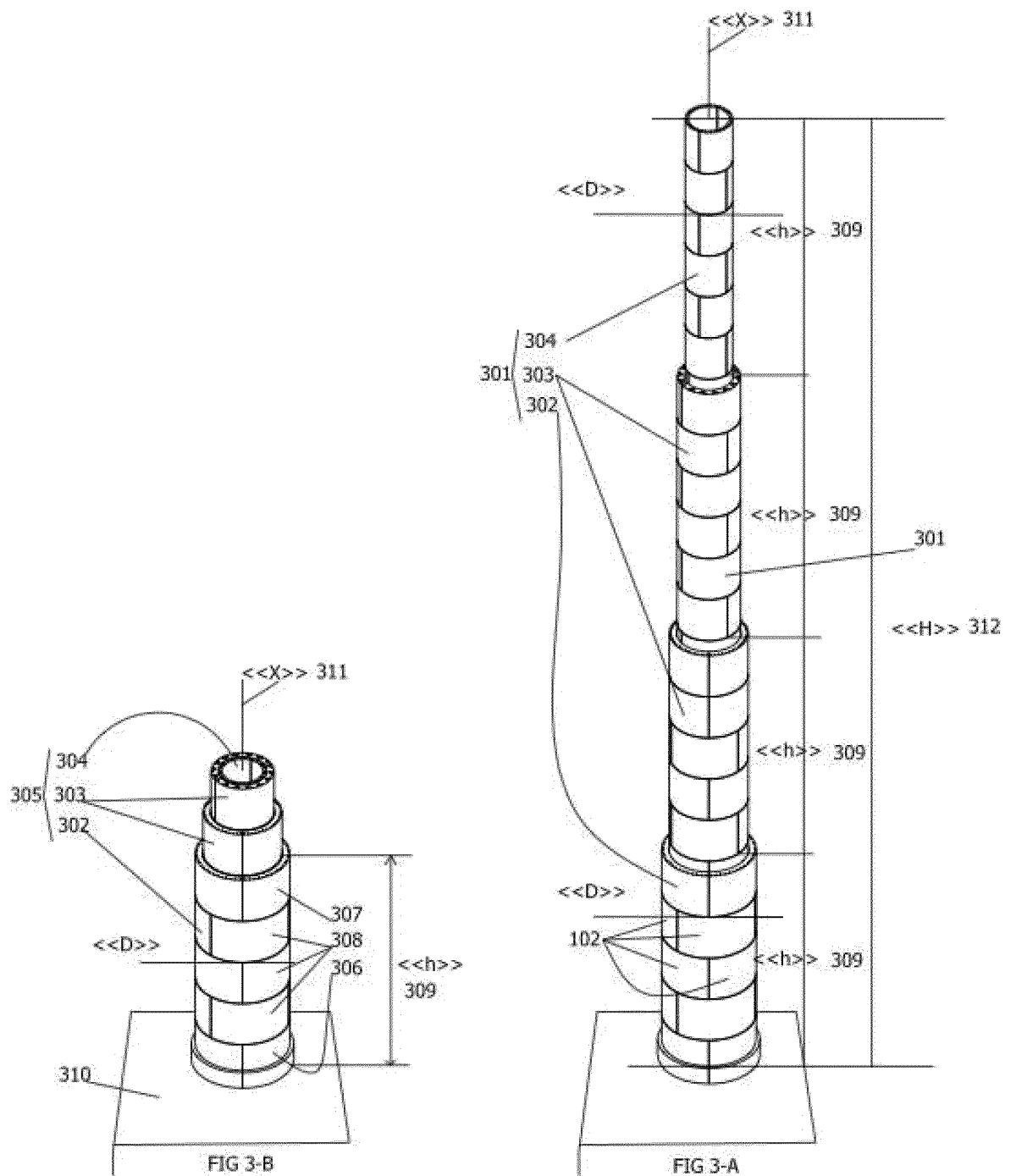


FIG. 2 B



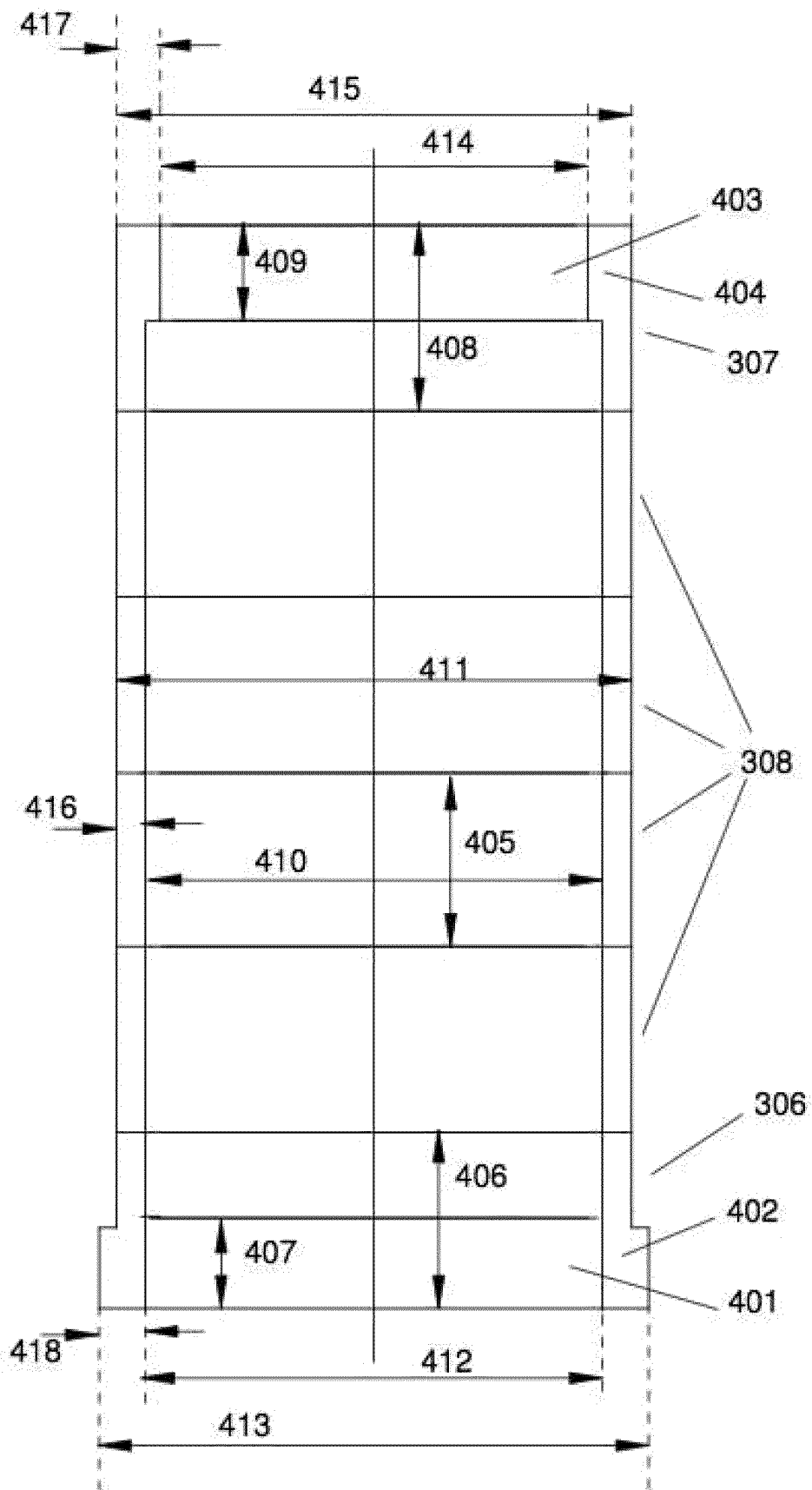


Figura 4

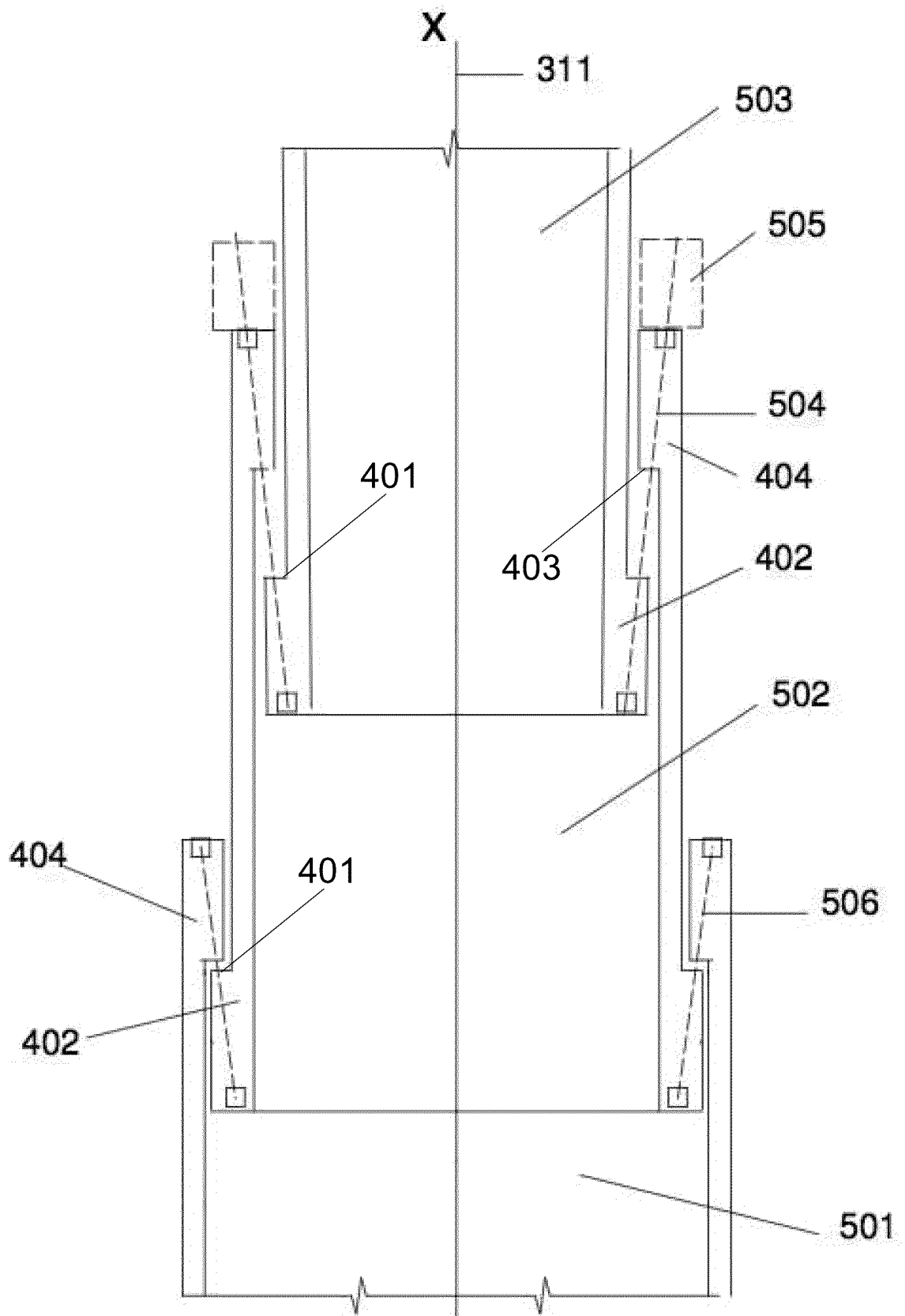


Figura 5

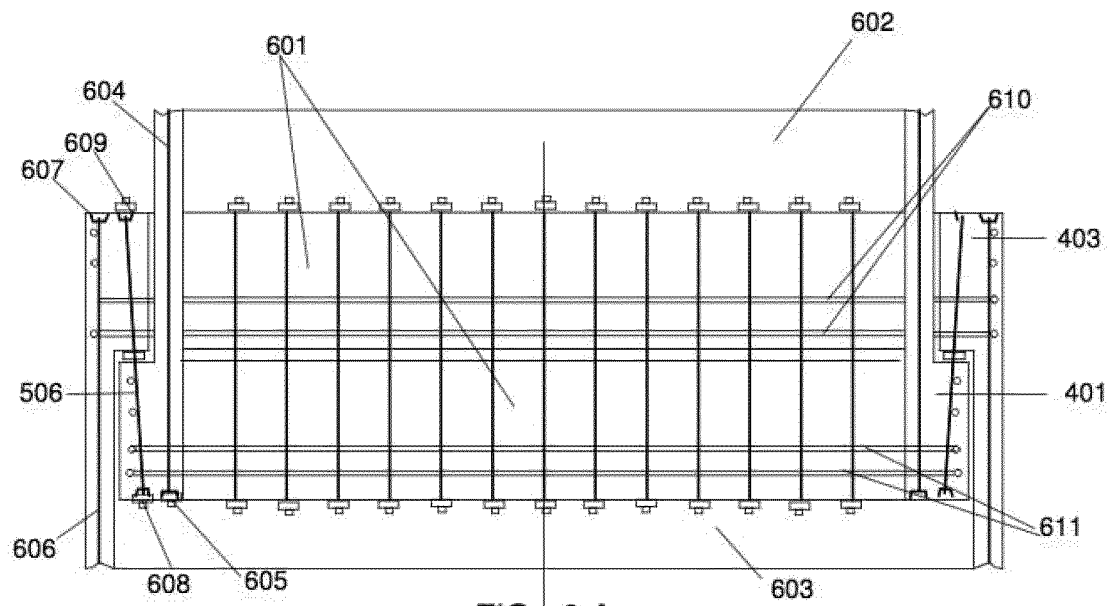


FIG. 6 A

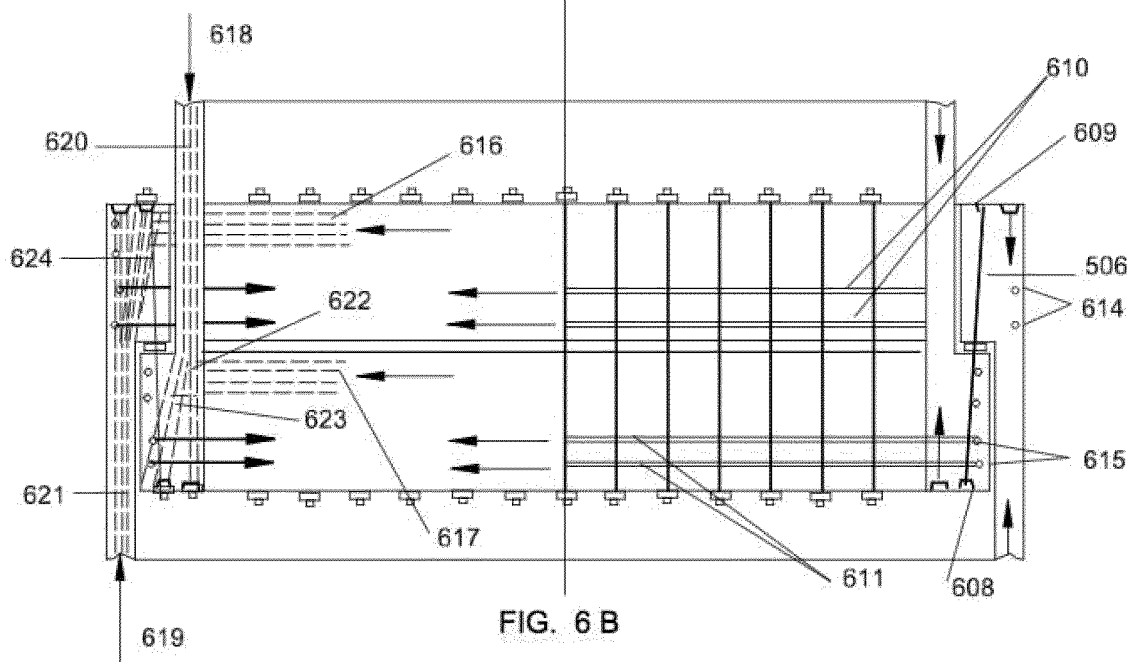


FIG. 6 B

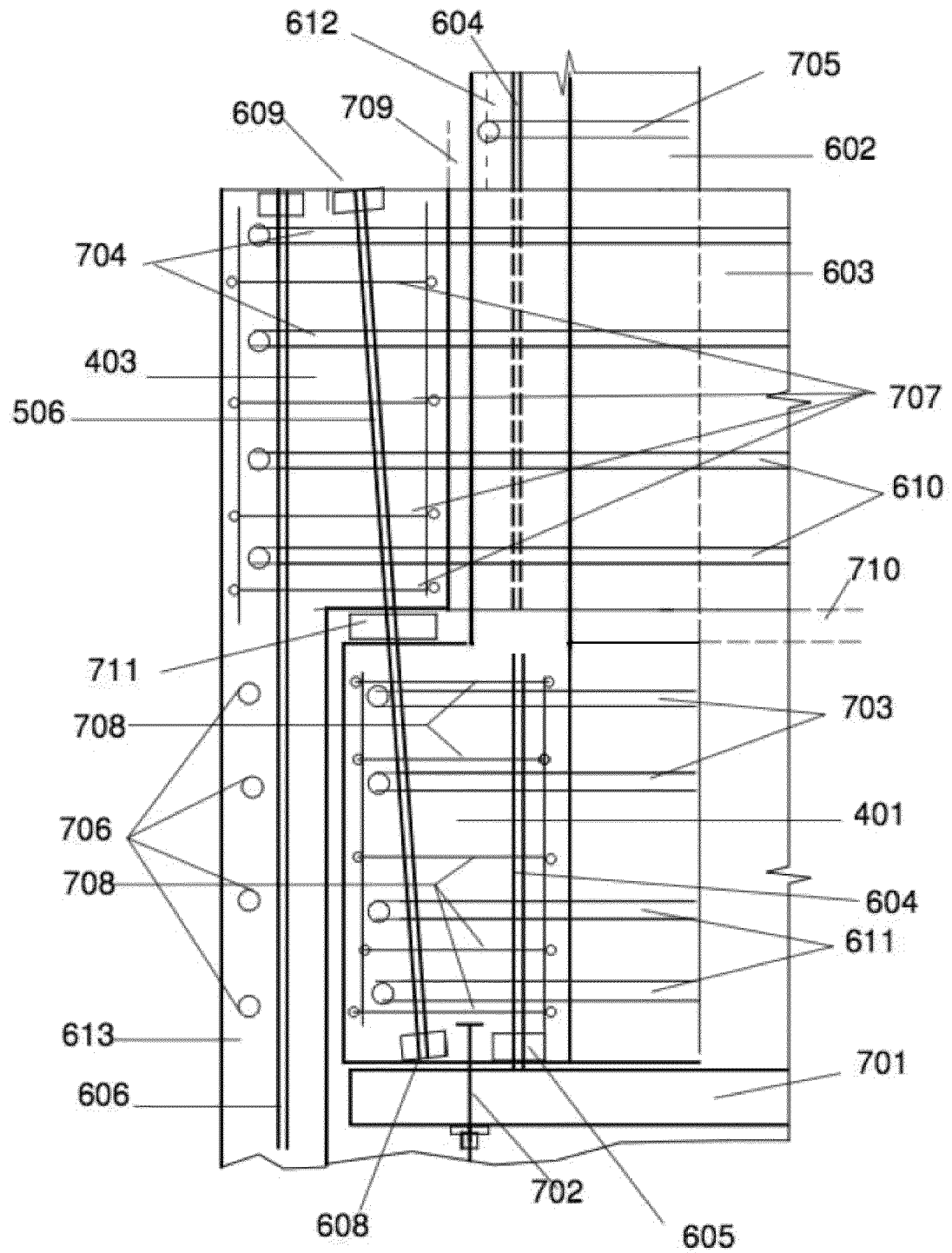


Figura 7



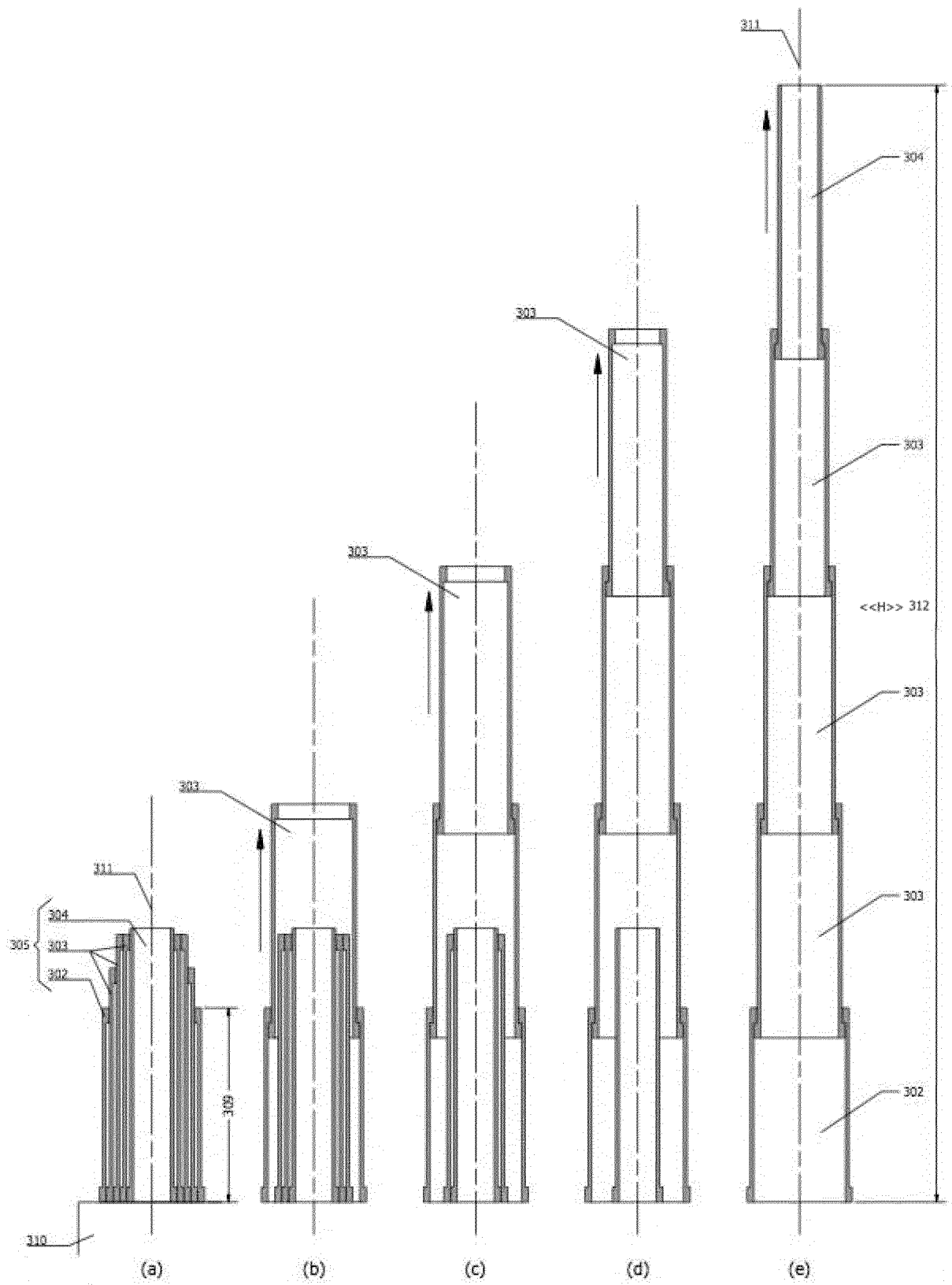


Figura 8

## RESUMO

### **TORRE DE CONCRETO ESTRUTURAL E MÉTODO DE MONTAGEM**

fabricada em concreto estrutural de acordo com técnicas de construção civil, compreendendo uma pluralidade de segmentos-de-torre cilíndricos numa construção telescópica, a união de ditos segmentos sendo realizada por meio de nós duplos de comportamento reverso. O método compreende a construção de um conjunto de segmentos-de-torre compreendendo um segmento-de-torre base externo de maior diâmetro, segmentos-de-torre intermediários de diâmetros sucessivamente menores uns em relação aos outros e segmento-de-torre de topo de menor diâmetro, todos apoiados diretamente na fundação 310, dispostos uns dentro dos outros, concêntricos entre si. Os segmentos-de-torre intermediários e de topo são içados com o uso de equipamentos hidráulicos de içamento e cabos de içamento sem a necessidade de uso de guindastes externos, içamento esse inteiramente diferente e novo em relação ao estado da técnica. Ao final da operação de içamento são instaladas, em cada um dos nós, as lajes transversais que consolidam transversalmente todas as peças estruturais das regiões de ligação.