

## Repowering de Parques Eólicos: Uma Abordagem sobre os Reforço Estrutural em Elementos de Concreto

Evandro Medeiros Braz<sup>1</sup>, Rui Carneiro de Barros<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) – Portugal / [up202204076@up.pt](mailto:up202204076@up.pt)

<sup>2</sup> Prof. Jubilado Eng<sup>a</sup> Estrutural, Dept<sup>o</sup> Eng<sup>a</sup> Civil, (FEUP); CONSTRUCT Porto - Portugal / [rcb@fe.up.pt](mailto:rcb@fe.up.pt)

### Resumo

O Brasil observou nos últimos 20 anos um crescimento exponencial na geração de energia a partir do aproveitamento do vento. Esse fenômeno deu-se principalmente pelo PROINFA, programa de incentivos as fontes alternativas de energia elétrica, instituído pela Lei 10432/2002. Essa lei proporcionou um grande avanço industrial e internacionalização de avançadas tecnologias de aerogeradores. Neste contexto, onde por um lado temos um grande avanço tecnológico dos aerogeradores, e de outro a constatação que os primeiros projetos que foram implantados em grande volume a partir de 2005 e que hoje estão prestes a completar 20 anos de operação, período indicado como vida útil do equipamento, deve-se avaliar a continuidade da operação. Nesta etapa, busca-se identificar o potencial de repotenciação dos aerogeradores, “repowering”, ou seja, avalia-se ao final da vida útil a possibilidade de desmontar o equipamento, fazer algumas modificações ou a substituição, estas duas últimas opções aderentes a continuidade da geração. Uma das alternativas apontada com a mais atrativa em diversos estudos é a substituição do aerogerador existente por um mais moderno, onde somente no incremento de potência, passaria a gerar em alguns casos quase 3 vezes mais devido ao avanço tecnológico. Nesta nova condição, além dos custos de aquisição do novo equipamento (aerogerador e torre), tem-se o reuso da fundação existente, que passará a receber um reforço estrutural para atender as novas cargas e requisitos impostos pelo novo equipamento. Deve-se entender que a concepção de uma construção durável implica a adoção de um conjunto de decisões e procedimentos que garantam a estrutura e aos materiais que as compõe um desempenho satisfatório ao longo da sua vida útil (Souza; Ripper, 1998). Esse estudo visa apresentar algumas alternativas conceituais de reforço estrutural de fundações onshore, a partir da necessidade de substituição de um aerogerador em final de vida útil, por um mais moderno. Na figura 01, tem-se a ilustração de uma fundação de aerogerador com reforço estrutural.

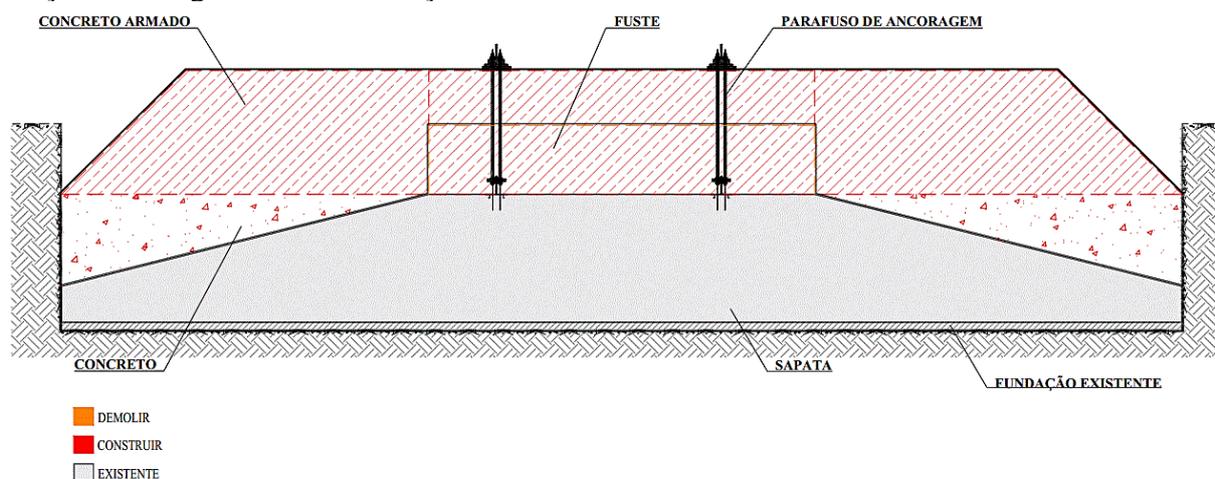


Figura 1 – Desenho esquemático de uma fundação de aerogerador reforçada

### Palavras-chave

Fundação; Aerogerador; Repowering; Repotenciação; Concreto.

## Introdução

A energia eólica tem passado por um processo de inovação diferenciado nas últimas duas décadas. Aerogeradores simplesmente passaram a gerar 6000 kW de potência nominal, frente aos 1000 kW, disponíveis no início dos anos 2000. A maior parte dos estudos envolvendo inovação na geração de energia de fonte renovável, traz uma perspectiva de desenvolvimento sustentável. Na figura 02, tem-se a ilustração do crescimento do diâmetro do rotor, e consequentemente das respectivas potências ao longo dos anos.

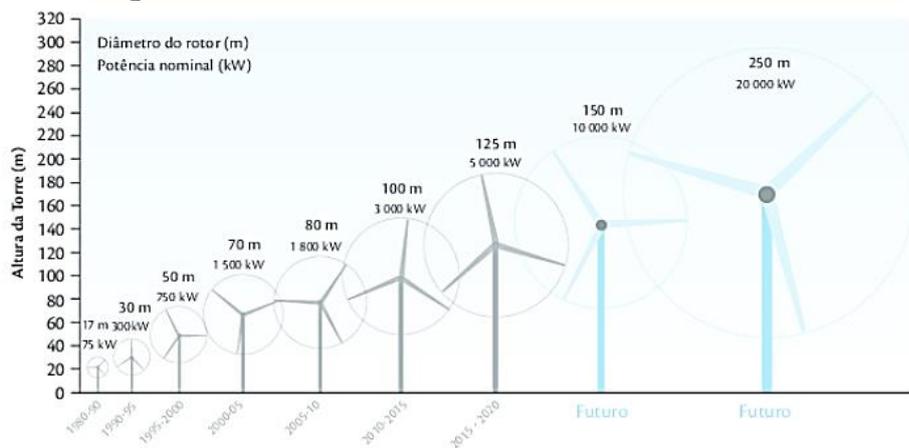


Figura 02 – Evolução das características dos aerogeradores

O grande crescimento, ou o gatilho propriamente dito, veio através do PROINFA, programa de incentivos as fontes renováveis, regido pela Lei 10432/2002. Essa lei trouxe ao mercado eólico, a possibilidade de investidores ou geradores, obterem junto ao governo um contrato de fornecimento de 20 anos, com tarifas diferenciadas. E por consequência esses contratos abriram a portas do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social - BNDES, ativando linhas de crédito para aquisição de aerogeradores eólicos. Essa lei completou 20 anos, que casualmente é a média de tempo de vida útil da maioria dos aerogeradores. Neste contexto nos próximos anos, observar-se-á muitos parques eólicos completando essa jornada.

Uma das decisões a serem tomadas quando esta etapa se aproxima, é a possibilidade de repotencializar parques eólicos existentes para criar sistemas que gerem mais energia por unidade de área e velocidade do vento. Esse incremento de potência ou até mesmo a substituição do equipamento por um de maior potência, traz a toda estrutura de suporte (torre e fundação), maiores esforços. A necessidade de reforçar a fundação é uma das avaliações que temos que ter em conta nesta etapa. Na figura 03, observa-se uma fundação de aerogerador e ao fundo um empreendimento eólico em operação comercial. E na figura 04, tem-se um aerogerador com denominação das partes.



Figura 03 – Ilustração de uma fundação de aerogerador e ao fundo um empreendimento eólico.

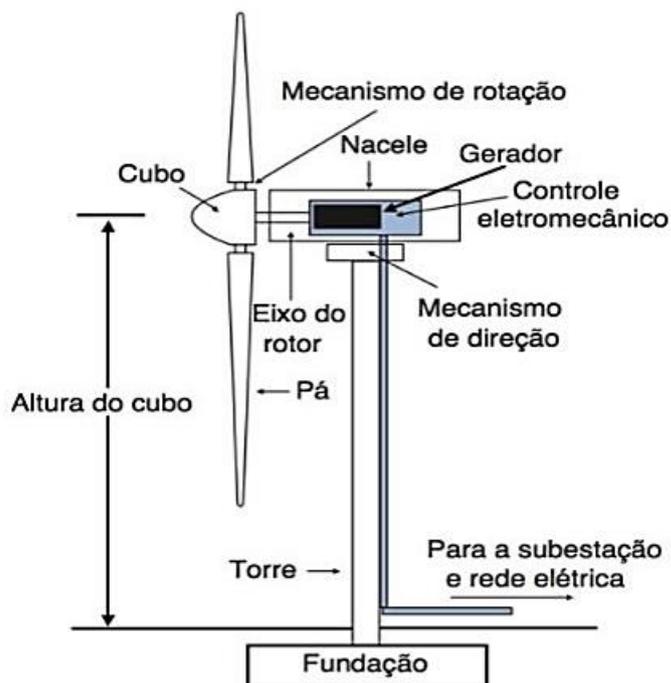


Figura 04 – Aerogerador com as partes denominadas

### Repowering ou repotenciação de aerogeradores

Podemos descrever a “repotenciação” como medidas destinadas a prolongar a vida útil de componentes e turbinas em empreendimentos eólicos, ou até mesmo a substituição de aerogeradores existentes por outro de tecnologia mais avançada. Na figura 05, tem-se um fluxograma simplificado de como funciona o repowering de aerogeradores com abordagem para as fundações. E abaixo listam-se alguns conceitos para melhor entendimento do processo.

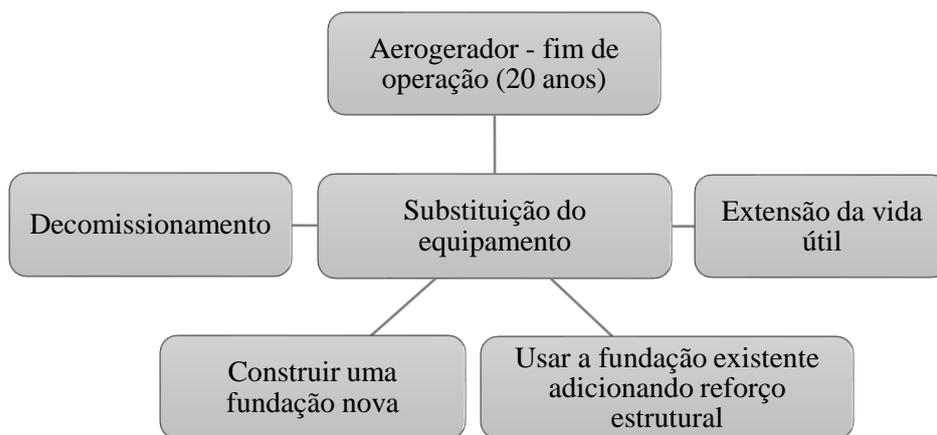


Figura 05 – Fluxograma simplificado do repowering

Descomissionamento significa, desinstalar o aerogerador, significa fim de operação comercial, devendo ainda verificar como ficará a fundação, onde temos as seguintes opções: deixar no local, retirar parte que fica acima do solo, ou efetuar a demolição completa propriamente dita.

Substituição do equipamento, é a substituição propriamente dita do equipamento, troca de componentes ou peças por mais modernos, isso pode ser desde a troca de um controlador, até a troca do aerogerador inteiro (nacele, rotor e torre).

Extensão da vida útil é a manutenção do gerador de turbina eólica existente além do consentimento de planejamento aprovado sem reengenharia de fundações e, portanto, com o mesmo layout de parque eólico e turbina.

O incremento de energia, traz um acréscimo de cargas a fundação dos aerogeradores, e neste estudo versará sobre conceitos de recuperação estrutural para atender a nova demanda de cargas. Nas figuras 06 e 07, pode-se observar a evolução dos aerogeradores da fabricante dinamarquesa VESTAS, onde tem-se os incrementos de altura do equipamento e diâmetro do rotor respectivamente. Estes comparam um aerogerador com modelo utilizado comercialmente no início dos anos 2000, o V52, com o V150, modelo atual da Vestas no ano de 2023.

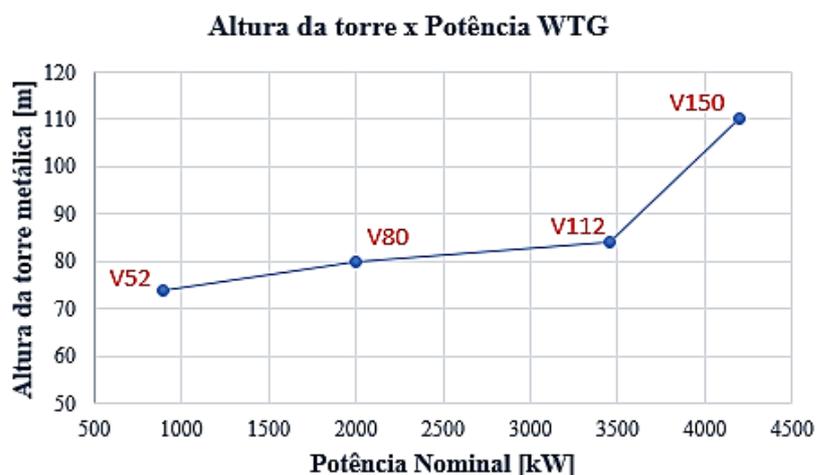


Figura 06 – Evolução dos modelos dos aerogeradores (altura da torre x potência)

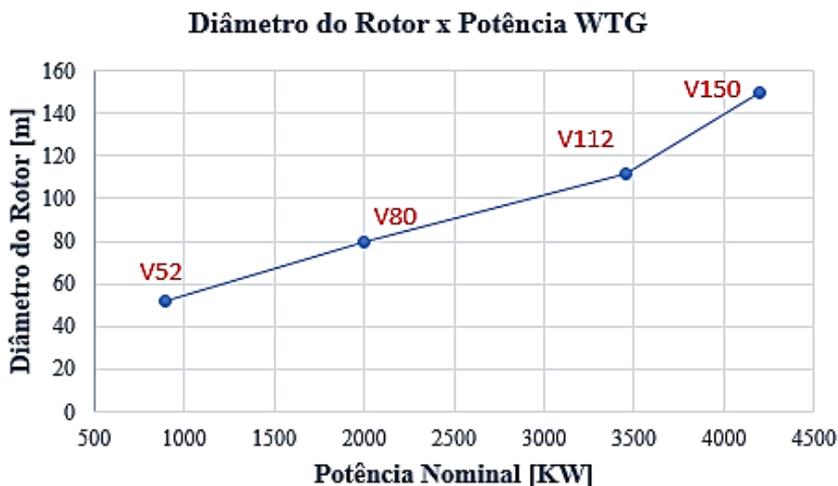


Figura 07 – Evolução dos modelos dos aerogeradores (diâmetro do rotor x potência)

## Fundação de Aerogeradores

Fundação de aerogeradores são blocos ou sapatas de concreto armado, que tem como função transmitir todos os esforços dos aerogeradores ao solo. Os volumes envolvidos são de grande magnitude, onde podemos observar para as fundações modernas, algo entorno de 600 m<sup>3</sup> na tipologia direta, no qual assentasse diretamente no solo, sem o uso de fundações profundas (estacas).

Na figura 08, tem-se uma fundação típica com suas devidas nomenclaturas. A fundação do aerogerador é a estrutura de suporte para transferir as cargas da turbina e da torre para o solo (DNV/RISO, 2002).

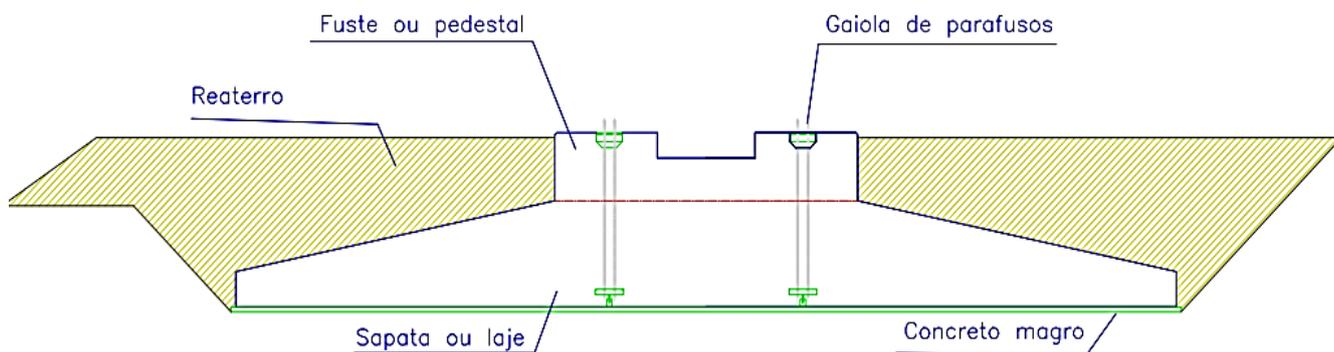


Figura 08 – Fundação de aerogerador com as devidas denominações

As cargas na fundação são estáticas e dinâmicas decorrentes de solicitações do vento, ações do rotor, peso próprio, ações sísmicas e considerações de fadiga, sendo extremamente elevadas e com grandes momentos instabilizantes (MILITITSKY, 2014).

Na figura 09, tem-se o ponto de aplicação dos esforços verticais, horizontais e momentos na fundação do aerogerador. Nas figuras 10 e 11, observa-se o incremento de esforços frente a modernização dos aerogeradores, devido ao aumento de potência (alturas maiores e rotores maiores).

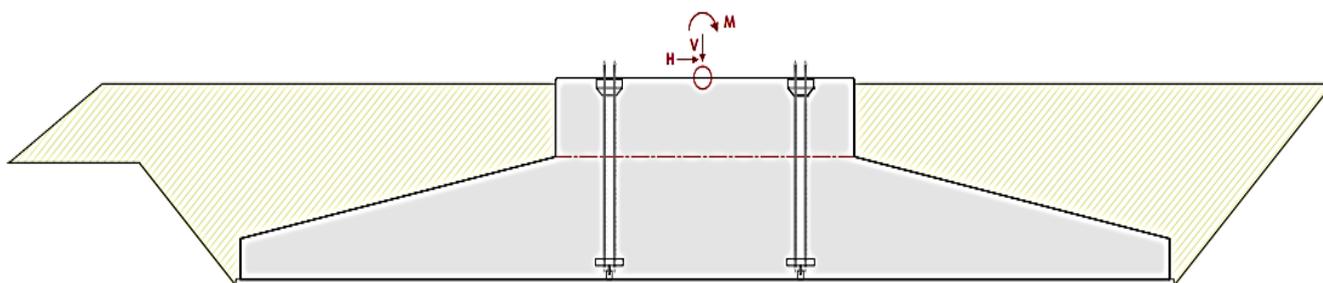


Figura 09– Ponto de aplicação dos esforços na fundação do aerogerador

### Momento C/LF X Potência WTG

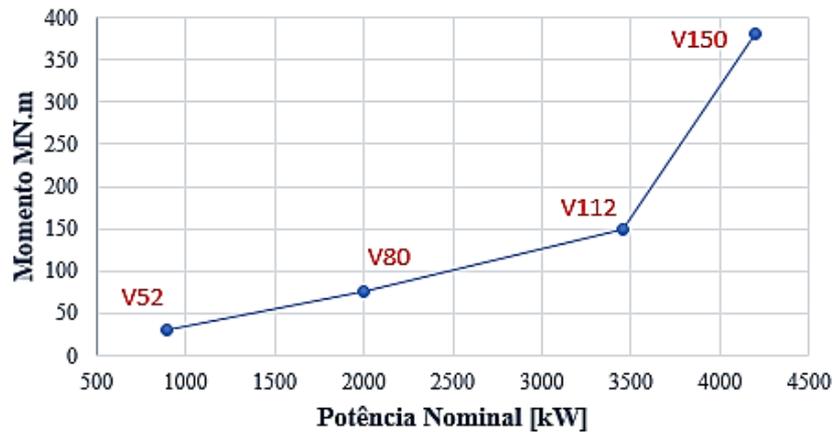


Figura 10 – Esforços de momento x aumento de potência

### Rigidez Rotacional x Potência WTG

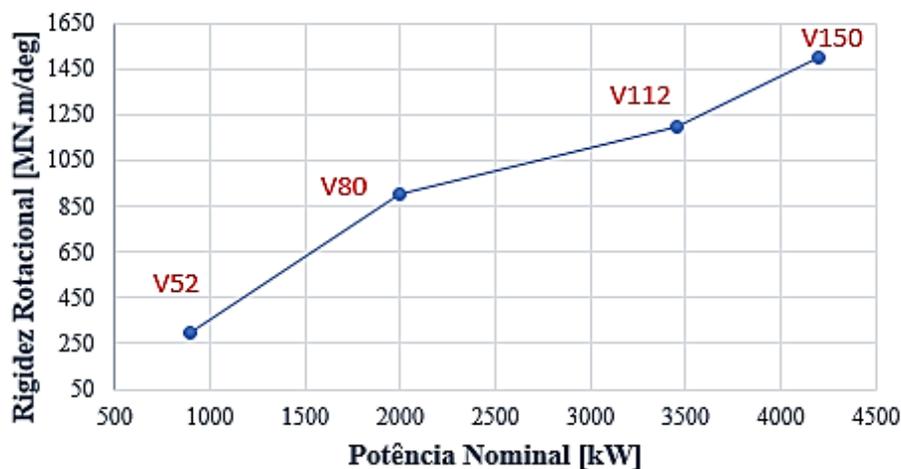


Figura 11 – Rigidez rotacional x aumento de potência

## Reforço nas fundações

Os sistemas de reforço de fundações são compostos pela substituição ou pelo reforço de fundações existentes, que apresentem mau desempenho ou aumento do carregamento por ampliação de áreas ou mudança do tipo de uso. Trata-se de um processo de renovação ou aumento na segurança da fundação original. Neste caso de estudo trata-se ao já referido aumento de cargas.

As propostas conceituais, todavia, já praticadas no mercado eólico para tal finalidade, serão dispostas em três situações: a) pequeno incremento de carga em uma fundação direta, assente em substrato rochoso b) pequeno incremento de carga para uma fundação indireta (estaqueada) e c) um grande incremento de carga, inclusive com a substituição da ancoragem (gaiola de parafuso).

Na figura 12, tem-se o indicado na alínea “a”, e nas figuras 13 e 14, as indicadas nas respectivas alíneas “b” e “c”.

Na alínea “a” foi proposta uma atirantamento da fundação direta para combater os pequenos incrementos de esforços (ELS e ELU). Essa atirantamento é um complemento a fundação, que passa

pela remoção do aterro da fundação, marcação dos pontos de atirantamento, perfuração do bloco de fundação e do solo, instalação do tirante e posteriormente a protensão.

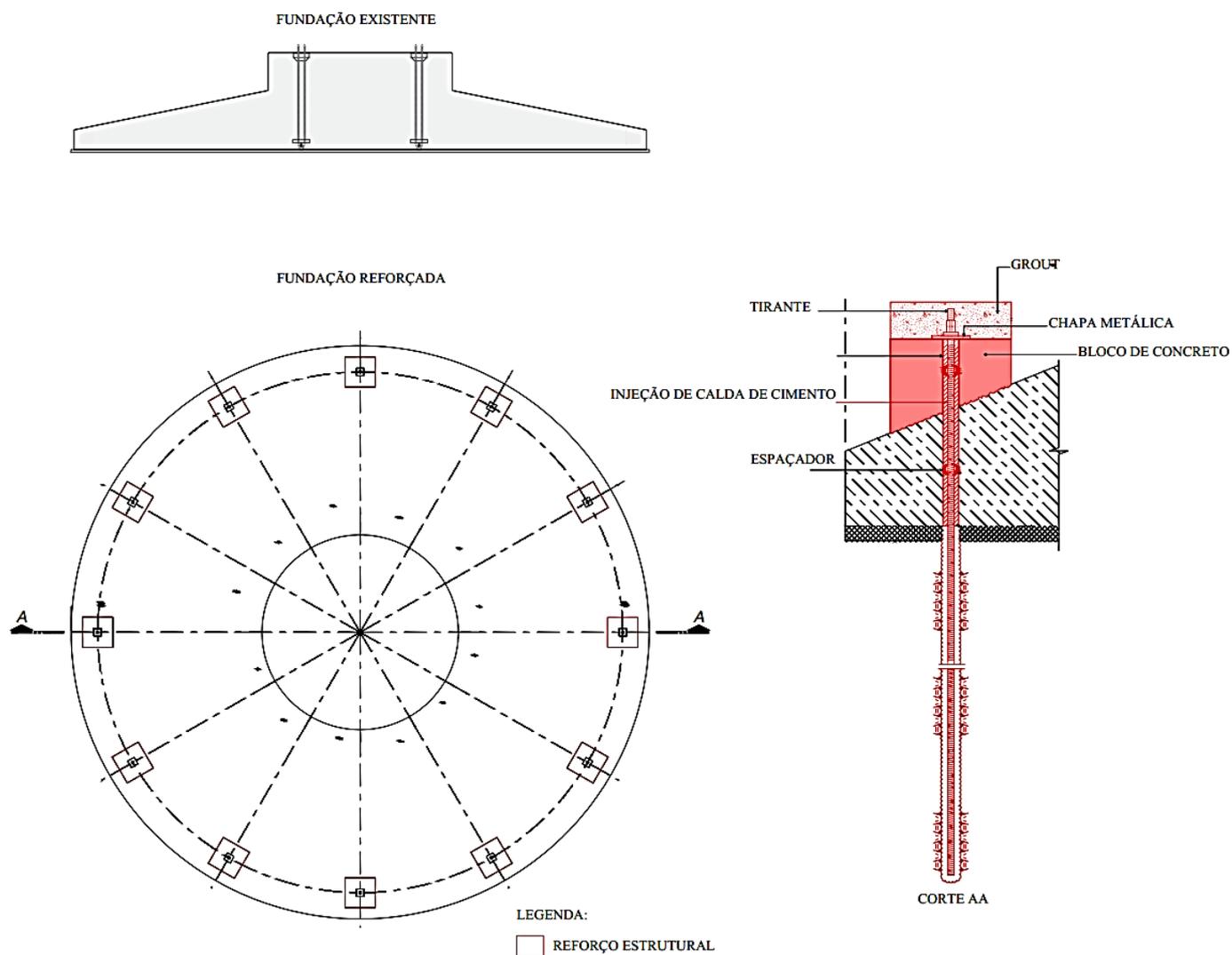


Figura 12 – Fundação direta com reforço (tirantes ancorados)

Na alínea “b” foi proposto a fundação indireta reforço para combater os pequenos incrementos de esforços (ELS e ELU). A solução é a incorporação de um bloco de coroamentos e uma fundação profunda (estaca). Esse bloco dever ser devidamente ancorado ao bloco de fundação existente através de grampeamento e ponte de aderência. A quantidade de blocos e características da estaca, bem como sua profundidade, depende de caso a caso.

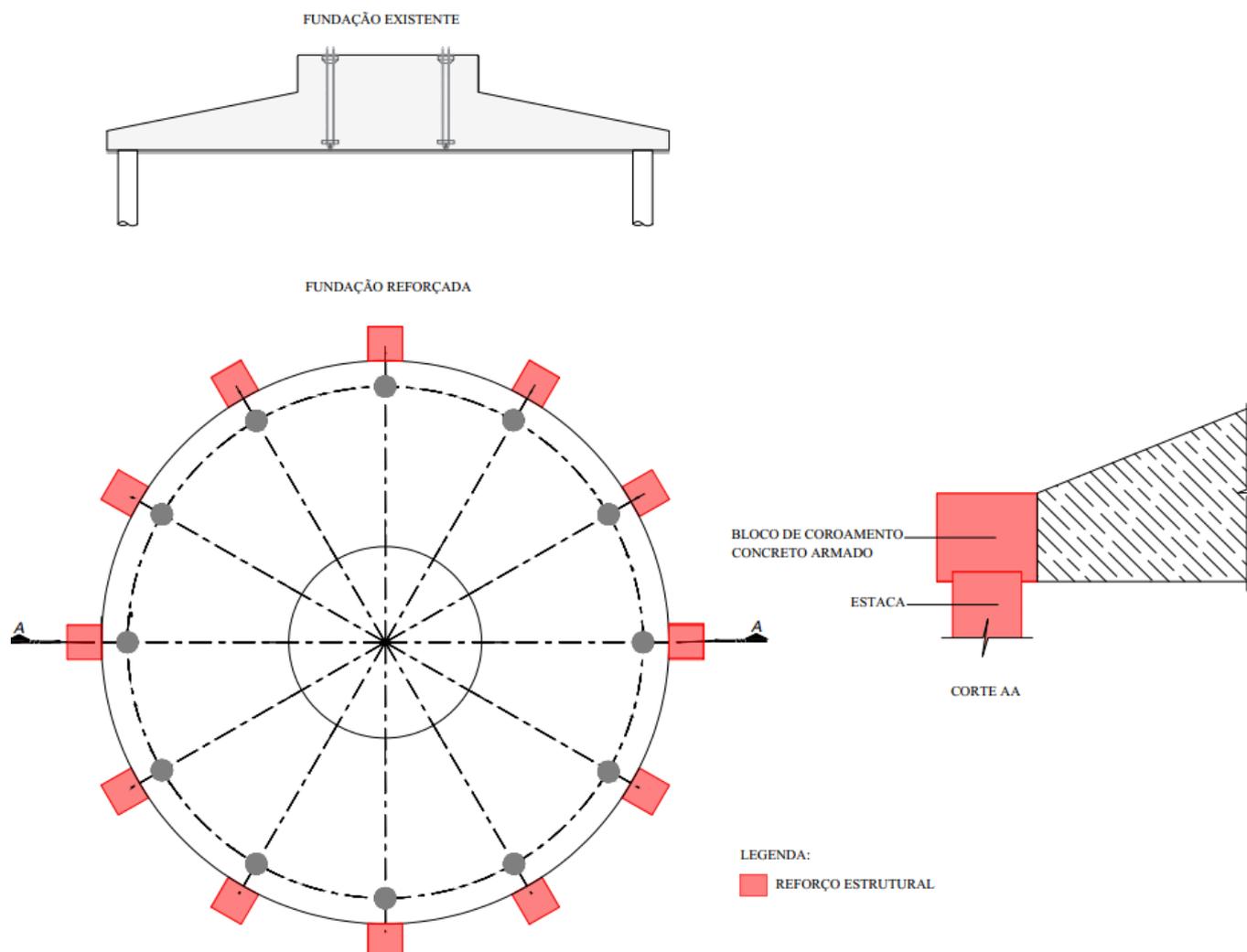


Figura 13 – Fundação indireta com reforço (bloco estaqueado).

Na alínea “c”, devido ao grande incremento de cargas, realiza-se uma fundação com reforço (figura 14), que traz com consequência até a substituição da gaiola de parafusos, devido ao novo esforço, ser propôs a retirada do fuste original, e a adição de um novo fuste para colocação da referida gaiola (conexão entre a fundação e a torre metálica). Na figura 15 e 16, tem-se o detalhe da gaiola de parafusos padrão.

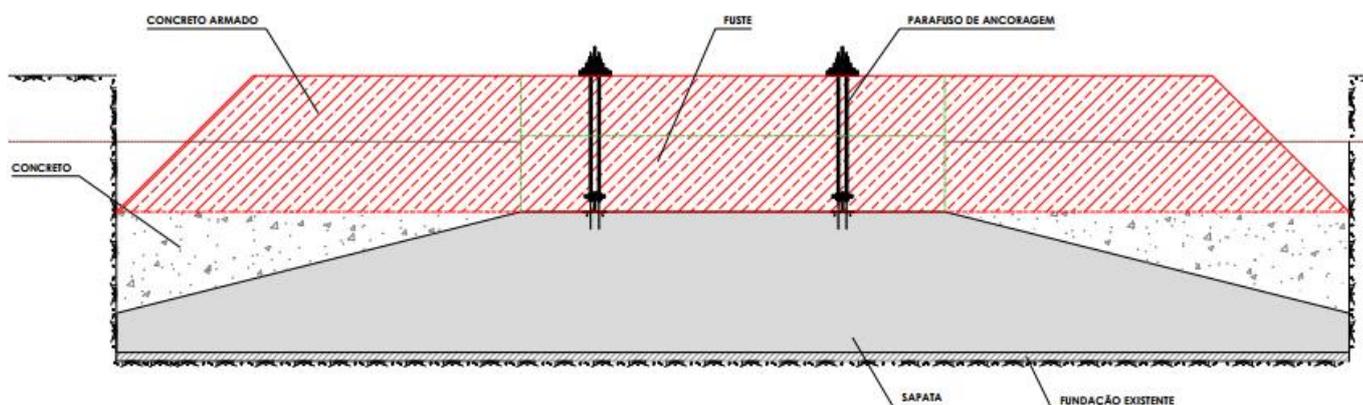


Figura 14 – Fundação com reforço estrutural

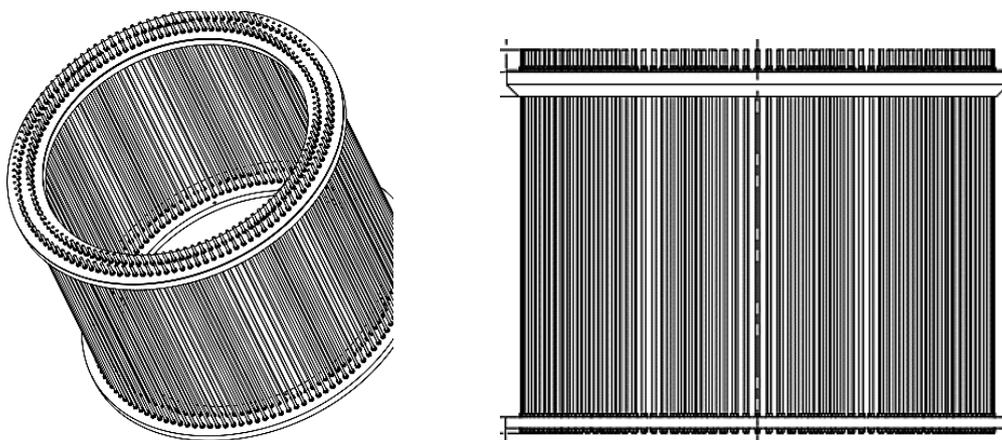


Figura 15 e 16 – Gaiola de parafusos (conexão entre fundação e a torre metálica)

### Considerações finais

Os empreendimentos eólicos normalmente têm uma vida útil de aproximadamente 20 anos, no entanto, o rápido desenvolvimento da tecnologia nos últimos anos tornou economicamente e justificável a substituição do antigo aerogerador de baixa capacidade de geração por um mais eficiente e maior, as vezes mesmo antes do fim da vida útil.

A repotenciação é a substituição de aerogeradores de pequena capacidade, por outro mais moderno e mais sofisticado tecnologicamente, podendo chegar nos dias de hoje até uma geração de 6000 kW, frente aos de 1000 kW do início dos anos 2000. Isso resulta na utilização eficiente do potencial eólico locais produzindo alta geração de energia. Além disso, os aerogeradores modernos vêm com muito maior eficiência, o que melhora significativamente o Fator de Capacidade (FC) total para o parque eólico. O FC para a aerogeradores antigos está em torno de 20-25%, onde no repowering dobra-se, principalmente devido ao design aprimorado, torre mais alta e maior diâmetro do rotor.

Fundações de aerogeradores são geralmente reforçadas para receber tais aerogeradores mais modernos, com maiores esforços transmitidos. Este estudo abordou conceitos de reforço estrutural desde pequenos incrementos até de grandes magnitudes. O aproveitamento da fundação antiga é interessante por já haver uma base sólida, bem como por utilizar o mesmo posicionamento anteriormente estudado para o ponto de melhor rendimento, e o aproveitamento da fundação antiga, evita sua destruição, gerando um trabalho árduo e oneroso no descarte em depósitos autorizados.

A energia eólica cresce exponencialmente no Brasil, e o estudo de fundação é um dos itens de grande relevância, pois apresenta um grande custo envolvido e a segurança da operação. Deve-se entender que o projeto e a execução de uma fundação de um aerogerador implicam na adoção de um conjunto de decisões e procedimentos que garantam a estrutura e aos materiais que as compõe um desempenho satisfatório ao longo da sua vida útil.

## **Bibliografia**

ABNT NBR 6118:2014 – Projeto de estruturas de concreto - Procedimento;

ABNT NBR 6122:2010 – Projeto e execução de fundações – Procedimento;

BRAZ, E. Identificação e caracterização de solos colapsíveis em fundações de aerogeradores de grande porte. Dissertação (mestrado) -- UDESC, CCT, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2022

CARRILLO-HERMOSILLA, J.; GONZALEZ, P. D. R.; KONNOLA, T. Eco-innovation: when sustainability and competitiveness shake hands. New York: Palgrave Macmillan, 2009;

[en.wind-turbine-models.com/turbines/1841-vestas-v150-4.2](http://en.wind-turbine-models.com/turbines/1841-vestas-v150-4.2), dados dos aerogeradores Vestas (modelos v52, v80, v112 e v150). Acesso ao site 23/02/23;

Germanischer Lloyd Rules and Guidelines. IV Industrial Services. 1. Guideline for the Certification of Wind Turbines (2010);

Guidelines for Design of Wind Turbines, DNV/Riso – 2002;

IEC 61400-1 Design Requirements – 2005;

MILITITSKY, Jarbas; CONSOLI, Nilo Cesar; SCHNAID, Fernando. Patologia das fundações. 2. ed. Ed. Oficina de Textos: 2014;

Programa demonstrativo para inovação em cadeia produtiva selecionada: Energia eólica – Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2015; il.; 24 cm ISBN: 978-85-5569-050-1 (impresso);

SOUZA, V. C.; RIPPER, T. Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto. São Paulo: Pini, 1998;