

# Qualidade do concreto do Parque Eólico de Casa Nova

MARLON DE BARROS CAVALCANTI – MESTRE

CLAUDIO LUIZ DE CARVALHO – ENGENHEIRO

ALLAN DE OLIVEIRA BORBA – ENGENHEIRO

ALBERTO JORGE COELHO TAVARES CAVALCANTI – ENGENHEIRO

CHESF – COMPANHIA HIDRO ELÉTRICA DO SÃO FRANCISCO

TIBÉRIO WANDERLEY CORREIA DE OLIVEIRA ANDRADE – MESTRE

TECOMAT – TECNOLOGIA DA CONSTRUÇÃO E MATERIAIS

PAULO HELENE – PROFESSOR TITULAR

USP, PhD ENGENHARIA

## 1. INTRODUÇÃO

**D**iversificando seu parque gerador, a Chesf está construindo o Parque Eólico de Casa Nova, que terá uma potência instalada de 180MW com 120 unidades de 1,5MW, localizado no Município de Casa Nova, Estado da Bahia, na borda do reservatório da barragem de Sobradinho.

O fornecimento, construção e montagem estão a cargo do Consorcio Ventos de Casa Nova, constituído pelas Empresas Wind Power Energia S. A., Dois A Engenharia e Tecnologia Ltda. e I M Comercio e Terraplenagem Ltda.

Os aerogeradores têm bases de fundação direta de concreto armado convencional e torres pré-fabricadas de concreto protendido autoadensável curado a vapor, com 50MPa, considerado concreto de alto desempenho. As torres são compostas por cinco tramos de 20m cada, totalizando 100m de altura, sendo, na seqüência de elevação, dois tramos com quatro aduelas, um tramo com três aduelas e dois tramos com duas aduelas, isto é, 15 aduelas por torre. As aduelas e os tramos são unidos por armaduras passivas grauteadas in loco. As torres têm forma tronco cônica com diâmetro externo variando de 7,04m na base a 2,65m na parte superior e espessura de parede entre 16cm e 20cm.

A Engenharia do Proprietário foi executada diretamente pela Chesf e inclui a certificação do projeto executivo das

bases de fundação e o controle de qualidade da construção das bases e torres pré-fabricadas. No controle tecnológico do concreto, além dos ensaios de resistência à compressão, fluidez, coesão e segregação, foram ensaiados os agregados graúdo e miúdo para verificação da potencialidade de reação álcali-agregado, assim como foram adotadas medidas preventivas. Para gerenciar a durabilidade das torres foram realizados ensaios acelerados de carbonatação e cloretos.

## 2. ANÁLISE DO PROJETO DAS BASES

A análise dos projetos das bases dos aerogeradores tem como objetivo assegurar a aderência do projeto executivo às especificações técnicas contratuais e sua compatibilidade com as características geotécnicas do terreno de fundação. O projeto executivo das bases foi elaborado pela empresa Esteyco Energia, da Espanha, baseado em normas espanholas e internacionais e compatibilizado com as normas da ABNT durante o processo de análise do projeto.

### 2.1 CARACTERÍSTICAS DAS BASES

As sapatas de fundação dos aerogeradores estão assentes diretamente no terreno, sendo que cerca de 50% estão assentes em rocha e as restantes em solo arenoso de consistência média a dura com espessura máxima de



Figura 1 – Vista do início da concretagem de uma base

8m. A tensão admissível do solo, considerada no projeto, foi de 0,25MPa.

As bases resumem-se a dois tipos em função da presença do lençol freático. A sapata tipo 1 é utilizada quando o nível do lençol freático está abaixo do nível de apoio da sapata no terreno de fundação. No caso do lençol freático ficar acima desse nível é utilizada a sapata tipo 2:

- **Sapata tipo 1:** Um quadrado inferior com 8,50m de lado, com espessura constante de 1,80m e um quadrado superior com 14,50m de lado com espessura variável de 1,80m a 0,50m;
- **Sapata tipo 2:** Um quadrado inferior com 10,0m de lado, com espessura constante de 1,90m e um quadrado superior com 17,0m de lado com espessura variável de 1,90m a 0,60m.

Sobre as sapatas de concreto armado foi ainda executado um aterro de solo compactado com 40cm de espessura, cujo peso colabora com a estabilidade global da estrutura. O concreto de fundação tem resistência característica de 25MPa aos 28 dias e atende à ABNT NBR 12655:2006, sendo

classificado como de classe II de agressividade ( $a/c < 0,60$ , consumo de cimento  $> 280\text{kg/m}^3$  e cobrimento  $> 30\text{mm}$ ).

## 2.2 NORMAS UTILIZADAS NO CÁLCULO ESTRUTURAL

Foram utilizadas as seguintes Normas para cálculo:

- EHE-08- Instrucción de Hormigón Estructural;
- Eurocode 2 EN 1992-1-1 Design of concrete structures;
- fib (CEB-FIP) Model Code 1990 e 2010;
- ABNT NBR 6118 -Projeto de Estruturas de Concreto;
- ABNT NBR 6122 - Projeto e Execução de Fundações.

Foram consideradas as cargas gravitacionais e aquelas transmitidas pela torre segundo a IEC-6400-1 da "International Electrotechnical Commission", que regula o projeto de turbinas eólicas. A fundação foi calculada por dois métodos complementares: numericamente por um modelo matemático e analiticamente considerando uma distribuição linear de tensões no solo. A estabilidade global da estrutura foi verificada quanto ao tombamento, deslizamento e a rigidez rotacional dinâmica do solo de fundação.

## 2.3 MODELO MATEMÁTICO

O modelo utilizado foi o MEF (método dos elementos finitos). A laje foi modelada por elementos de placa, com espessura constante. Na base da torre foi introduzida uma junta tipo master, que é rigidamente conectada com as placas na posição da parede da torre, e no nível inferior da fundação, foi utilizada a junta tipo slave. O modelo consiste de 754 nós, 756 placas e elementos de vigas e 713 apoios do tipo mola somente em compressão. As cargas transmitidas pela torre foram aplicadas nas juntas tipo master-slave. O peso próprio da sapata e do aterro foram considerados automaticamente pelo programa.

Tabela 1 – Composição e propriedades potenciais do concreto

Material/propriedade	Natureza	Quantidade por $\text{m}^3$	Observação
Cimento Portland (kg)	CP-IV-32	305	Poty-Sobral
Areia (A) (kg)	-	840	Dim. máx. 4,8mm
Brita 0 (kg)	-	1036	-
Aditivo plastificante (ml)	Polifuncional	3054	Muraplast FK 101
Água total (litros)	-	183	$a/c = 0,60$
Abatimento (mm)	-	-	120 +/- 20mm
Tipo de concreto	-	-	Bombeável
$f_{ck,28\text{dias}}$ (MPa)	-	-	25MPa

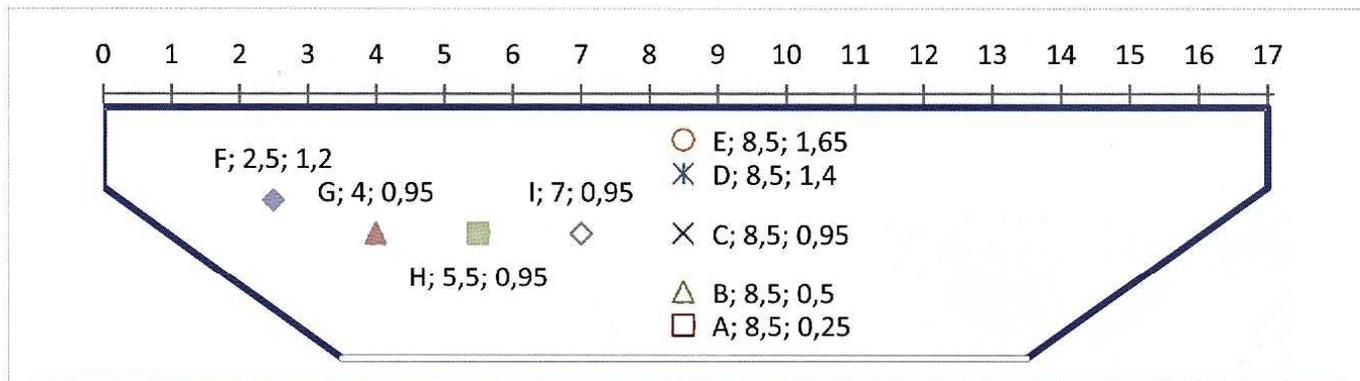


Figura 2 – Localização dos termômetros/termopares (cotas em metros)

### 3. CONTROLE TÉRMICO DA CONCRETAGEM DAS BASES

De acordo com o projeto, foi empregado concreto classe C25 com resistência característica à compressão de 25MPa, utilizando aditivo plastificante. O consumo médio de cimento das bases do Parque Eólico de Casa Nova foi de 305kg/m<sup>3</sup>. O concreto tem a composição e as propriedades potenciais apresentadas na Tabela 1.

Foram adotados vários procedimentos durante a execução e lançamento do concreto, bem como monitoramento após concretagem. Dentre eles, destacam-se:

- Pré-refrigeração, que consiste no uso de água gelada e gelo na fabricação do concreto. Foi adotada a substituição de, no mínimo, 27% da água de amassamento por gelo. De modo geral, quanto mais baixa a temperatura do concreto ao passar da fase plástica para a fase elástica, menor a tendência de fissuração;
- Lançamento do concreto foi realizado a uma temperatura máxima de 29°C, para que as temperaturas no interior da estrutura não ultrapassassem 65°C nos pontos críticos. Acima dessa temperatura, há risco de formação de etringita secundária diferida (DEF), que pode induzir expansões deletérias;
- O adensamento do concreto foi executado por vibradores de imersão, incluindo a correta vibração de “costura” na área de contato entre duas camadas sobrepostas, fato que assegura melhor qualidade do concreto;
- O lançamento foi executado em subcamadas, com espessura entre 20 a 25 cm, de forma contínua, até sua cota final;
- Durante a concretagem e adensamento, aplicação de manta de tipo “Bidin” logo após o término do acabamento, combinado com a necessária e permanente aspersão de água tipo spray, devido a elevadas temperaturas am-

bientes, que alcançaram 46°C, ao mesmo tempo que a umidade relativa chegou a ser de apenas 26%;

- Uma vez endurecida a superfície ao toque, cuidados rigorosos com a cura, cumprindo exatamente o especificado em projeto, com aplicação de mantas geotêxtil umedecidas imediatamente após o acabamento do concreto e permanecendo por um período mínimo de 72 horas. Após a cura com manta geotêxtil, a cura foi feita através de inundação da superfície por lâmina d’água, durante um período de, no mínimo, 7 dias;
- Monitoramento da temperatura do concreto em varios pontos críticos.

A Fig. 2 apresenta os locais de instalação dos termômetros embutidos no concreto, para acompanhamento da elevação de temperatura no interior da estrutura.

Para avaliar a elevação de temperatura no interior da estrutura de concreto, foram realizadas leituras iniciais de hora em hora, nas primeiras 24h, e durante os seis dias seguintes, de 3h em 3h, cujos resultados estão apresentados na Fig. 3.

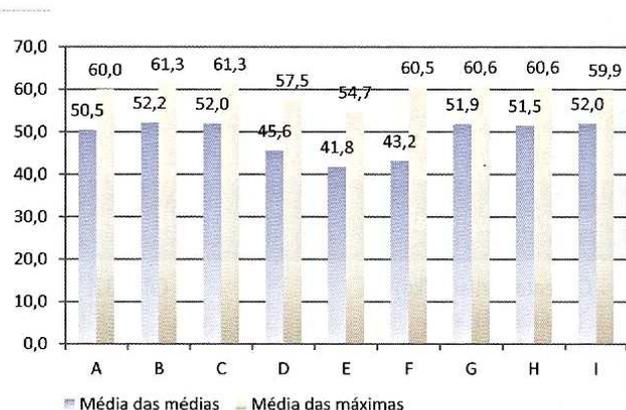


Figura 3 – Temperaturas máximas e médias de 12 bases concretadas

Tabela 2 – Síntese das características gerais da areia

Amostra	Areia natural do porto São Francisco
Cor (seca)	Creme amarronzado
Mineralogia Principal	Quartzo
Mineralogia Subordinada	Fragmentos de rocha (granítica)
Mineralogia Deletéria	< 5% quartzo microcristalino e calcedônia
Grau de arredondamento	Arredondado e subarredondado
Grau de esfericidade	Alta
Alteração	Ausente
Reatividade potencial com os álcalis	Potencialmente inócua
Superfície dos grãos	Polido e fosco

A temperatura máxima registrada foi 61,3°C nas posições B e C no centro da base.

#### 4. PREVENÇÃO DA REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO

Os agregados utilizados nos concretos das bases de fundação e das torres do Parque Eólico Casa Nova são provenientes de fornecedores instalados na região de Petrolina.

Amostras dos agregados, areia natural e brita foram enviadas para a ABCP para realização de exame petrográfico e ensaio de reatividade acelerada, de acordo com as recomendações da norma ABNT NBR 15577.

As Tabelas 2 e 3 apresentam a síntese das características petrográficas das amostras de areia e brita examinadas. Tanto a areia quartzosa como a brita gnaissica foram classificadas como potencialmente inócuas.

Os resultados do ensaio de reatividade acelerada em barras de argamassa, mostrados na Fig.4, também classificaram os agregados como potencialmente inócuos, segundo o critério da ABNT NBR 15577 (expansão inferior a 0,19% aos 30 dias de idade).

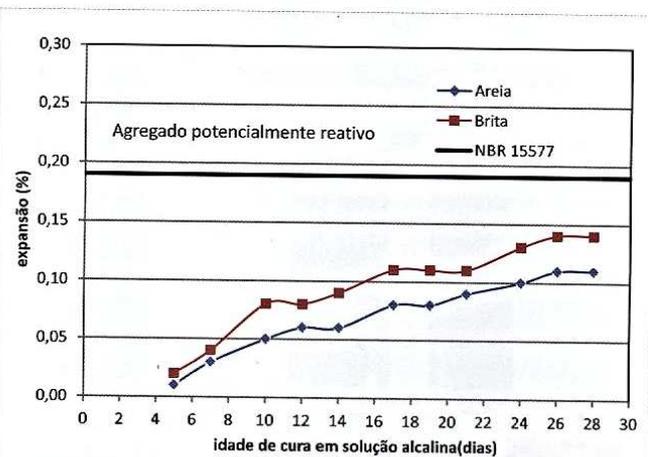


Figura 4 – Gráfico da evolução da expansão com o tempo de cura em solução alcalina

Tabela 3 – Síntese das características petrográficas (Brita 12,5mm - Pedreira Petrolina)

Mineralogia Principal	Quartzo, feldspatos (plagioclásio e microclínio) e biotita
Mineralogia Subordinada	Sericita, anfibólio, titanita, clorita e opacos
Mineralogia Reativa/Deletéria	Quartzo com extinção ondulante (25°): <5%; quartzo microcristalino: <5% e feldspato alterado: >5%
Cor	Cinza clara com faixas claras e escuras
Estrutura	Levemente foliada
Textura	Granulepdoblástica
Granulação	Inequigranular – Média a fina
Deformação do agregado	Quartzo deformado (ângulo de extinção ondulante de 25°)
Feldspatos (texturas potencialmente reativas)	Mirmequitas e pertitas: <1%
Quartzo deformado (< extinção ondulante)	<5%
Quartzo microgranular (%)	<5%
Microfissuração	Fraca
Tipo	Brita
Grau de alteração	Rocha pouco alterada
Propriedades físico-mecânicas	Rocha muito coerente
Tipo de rocha	Metamórfica
Classificação petrográfica	Gnaisse
Reatividade potencial	Potencialmente inócua

Todavia, tendo em vista a nota 1 do item 5.3 da referida Norma – “Verificou-se que alguns granitos-gnaisses e metabasaltos são deletérios em serviço embora tenham apresentado, pelo método preconizado pela norma ASTM 1260, valor de expansão abaixo do especificado por aquela Norma (falso negativo)” – e, principalmente, o desempenho em serviço de agregados gnaissicos, apresentados por Silveira et al, foram tomadas ações preventivas preconizadas na seção 7 da ABNT NBR 15577, para uso de agregados potencialmente reativos em concreto.

De acordo com a classificação de medidas preventivas em função do tipo de estrutura, constante da Tabela 1 da ABNT NBR 15577 para estruturas especiais, para a torre (não maciça e seca), pode-se desprezar o risco de problemas, enquanto que para a base de fundação (maciça em contato com água), houve ação preventiva forte, entre as listadas na Tabela 2 da ABNT NBR 15577.

Para as torres de concreto, foi limitado o teor de álcalis no concreto abaixo de 3kg/m<sup>3</sup> de Na<sub>2</sub>O equivalente e, para as bases de fundação, foi utilizado cimento Portland tipo CPIV.

O cimento usado na superestrutura das torres é do tipo CP V ARI RS, de fornecimento da empresa Mizu (razão social Maré Cimento Ltda), processado em Baraúna/RN, com teor alcalino equivalente em Na<sub>2</sub>O de 0,48% (ver Tabela 4).

Tabela 4 – Caracterização química do cimento CP-V ARI RS da Maré Cimento Ltda, Baraúna/RN

Ensaio	Métodos de ensaio	Resultados % em massa
Perda ao Fogo - PF	ABNT NBR NM 18/12	4,68
Dióxido de silício total - SiO <sub>2</sub>	ABNT NBR 14656/01	18,30
Óxido de alumínio - Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ABNT NBR 14656/02	5,46
Óxido de ferro - Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ABNT NBR 14656/03	3,14
Óxido de cálcio total - CaO	ABNT NBR 14656/04	62,53
Óxido de magnésio - MgO	ABNT NBR 14656/05	1,10
Anidrido sulfúrico - SO <sub>3</sub>	ABNT NBR NM 16/12	3,37
Óxido de sódio - Na <sub>2</sub> O	ABNT NBR 14656/05	0,02
Óxido de potássio - K <sub>2</sub> O	ABNT NBR 14656/05	0,70
Óxido de titânio - TiO <sub>2</sub>	ABNT NBR 14656/05	0,25
Óxido de estrôncio - SrO	ABNT NBR 14656/05	0,02
Pentóxido de fósforo - P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	ABNT NBR 14656/05	0,08
Óxido de manganês - Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ABNT NBR 14656/05	0,05
Óxido de cálcio livre - CaO(livre)	ABNT NBR NM 13/12	1,69
Resíduo insolúvel - RI	ABNT NBR NM 15/12	3,32
Anidrido carbônico - CO <sub>2</sub>	ABNT NBR NM 20/12	3,41
Equivalente alcalino em Na <sub>2</sub> O	-	0,48

## 5. CONTROLE DE QUALIDADE DAS TORRES

### 5.1 APRESENTAÇÃO DAS TORRES

As torres de concreto são compostas por aduelas pré-fabricadas de concreto auto adensável com fck de 50MPa, armadura passiva em aço CA-50 com Ø6,3mm a 25mm e armadura ativa em cordoalha de 7 fios, engraxada e plastificada correspondente a CP RB 190 de Ø15,2mm.

Um conjunto de 15 aduelas compõe uma torre, que se divide em 5 tramos distintos de 20m, numa estrutura tronco cônica. O 1º e 2º tramos se formam com 4 aduelas em forma de setor com ângulo interno de 90 graus cada, o 3º tramo tem 3 aduelas com ângulo interno de 120 graus e o 4º e 5º tramos têm 2 aduelas cada com angulo interno de 180 graus.

A Fig.5 ilustra o esquema de composição da torre com 100m de altura, onde cada aduela se liga lateralmente por armadura passiva grauteada e na base e topo por armadura passiva, parafusos protendidos e graute. As protensões aplicadas são de 390bars (39MPa) nas cordoalhas e 900bars (90MPa) nos parafusos do tramo 5, com anel metálico de fixação do aerogerador.

A sequência produtiva das aduelas para a formação das torres segue uma linha cronológica na fábrica, desde o recebimento dos materiais até a ordem de entrega das aduelas, constando sua localização no parque edílico (ver Fig. 6).

### 5.2 QUALIDADE DAS TORRES

O plano de inspeção das torres de concreto baseia-se na norma ABNT NBR 5426, onde para um tamanho



Figura 5 – Esquema de composição da torre

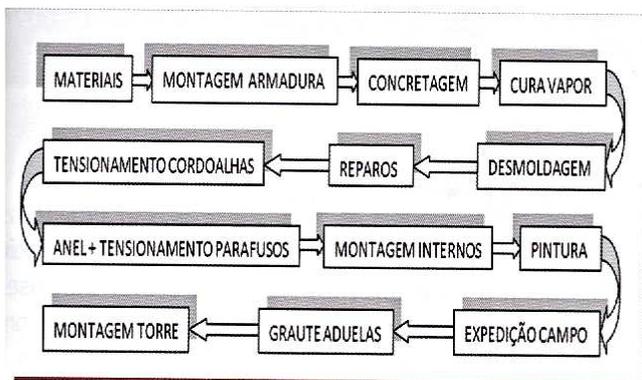


Figura 6 – Fluxograma da produção de aduelas e torres

de lote de 15 aduelas (cada torre tem 15 aduelas), nível geral de inspeção II e um NQA (Nível de Qualidade Aceitável) de 6,5 (i.e. uma probabilidade de 93,5% de um lote bom ser aprovado ou 6,5% de um lote ruim ser aprovado - risco adotado), com plano de amostragem simples - normal, indica que o tamanho da amostra a ser retirada é 2 unidades.

Os itens constantes da inspeção das aduelas do lote são:

- 1) Certificados dos aços e cordoalhas;
- 2) Certificado do cimento, incluindo teor de álcalis;
- 3) Controle de fabricação prévia à concretagem, para verificação das armaduras;
- 4) Controle de concretagem, através dos ensaios do concreto fresco na central antes do lançamento, como: fluidez (*slumpflowtest*, *slumpflow T600 test* e *V-funneltest*), habilidade passante e coesão (*L-box test*), além de massa unitária e ar incorporado;
- 5) Controle de desmoldagem, através de ensaios de resistência do concreto para transporte;
- 6) Controle de reparação de aduelas após desmoldagem, através de inspeção visual das aduelas para detecção de falhas e fissuras;

Aduelas (%) x Tipo de Defeito

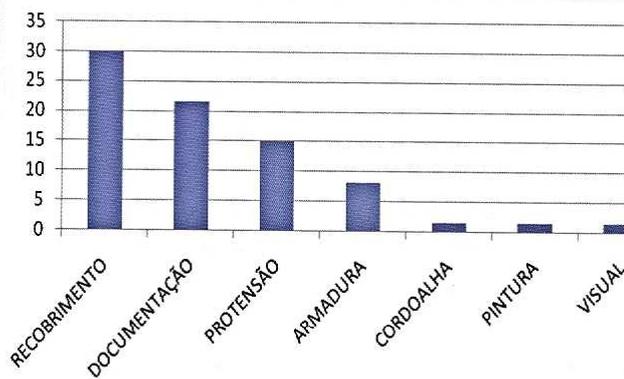


Figura 7 – Histórico cumulativo de não conformidades

- 7) Controle de resistências do concreto, através de ensaios de ruptura de corpos de prova;
- 8) Controle dimensional do recobrimento da armadura do concreto;
- 9) Controle de colocação do anel metálico, aplicável às aduelas do último tramo para fixação do aerogerador;
- 10) Controle de tensionamento das cordoalhas;
- 11) Controle de tensionamento dos parafusos, aplicável às aduelas do último tramo para fixação do aerogerador;
- 12) Controle de aduela prévia à expedição, através de registros relacionados com o processo de montagem das torres;
- 13) Controle de pintura, através de ensaios da medição de camada e aderência;
- 14) Controle de expedição, através da rastreabilidade das aduelas.

Dentro de um universo de 60 aduelas produzidas até este momento, num total de 1800, tem-se o histórico cumulativo de não conformidades representado na Fig. 7, onde alguns pontos são de fácil correção, como

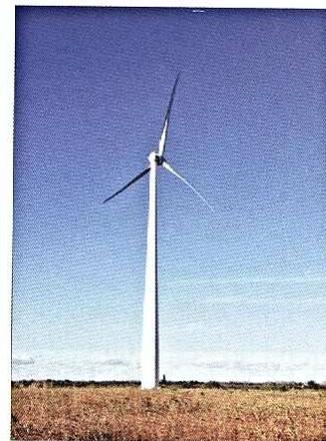
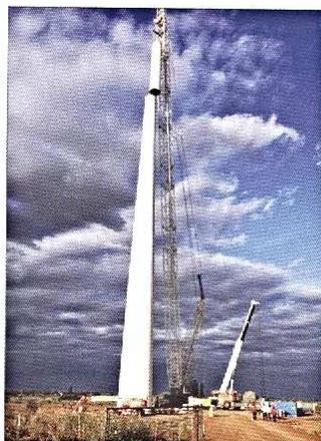


Figura 8 – Visão geral da sequência de montagem do aerogerador

documentação, pintura, visual, armadura e cordoalha; já outros estão em análise sobre as medidas corretivas a serem adotadas, tais como: recobrimento, através de estudos de durabilidade, e protensão, através da análise do projeto para os limites aceitáveis de alongamento das cordoalhas.

No sentido de minimizar a adoção de medidas corretivas, a fábrica de torres tem procurado melhorar seu processo produtivo, seguindo as sugestões das equipes de qualidade em campo, que identificaram pontos frágeis no processo e os melhoraram.

### 6. VIDA ÚTIL

Internacionalmente, as torres eólicas são projetadas para uma vida útil de apenas 20 anos. A CHESF, com apoio de consultores, está realizando ensaios de campo e análises teóricas para determinar se esse requisito é compatível com a ABNT NBR 8681 e será objeto de futuro artigo científico.

### 7. CONCLUSÃO

Este trabalho mostrou sucintamente a complexidade dos estudos e da correta implantação de torres eólicas com fuste de concreto protendido e fundações de concreto armado tipo massivo.

## Referências Bibliográficas

- [01] Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR 5426. Planos de amostragem e procedimentos na inspeção por atributos. ABNT, Rio de Janeiro, 1985.
- [02] Mehta, K. P & Monteiro, Paulo J.M. Concreto Microestrutura, Propriedades e Materiais. Revisores e Coordenadores: Nicole Pagan Hasparyk, Paulo Helene & Vladimir Antonio Paulon. IBRACON, 2008. ISBN 978-85-98576-12-1
- [03] Silveira, J. F. A., Cavalcanti, A. J. T., Hasparyk, N. P., Lopes, A. N. M. Investigação da reatividade álcali-agregado e a confiabilidade dos métodos de ensaio acelerados. IBRACON - 44º Congresso Brasileiro, Belo Horizonte, 2002. ●



### A experiência de quem saber fazer.

A Mega Concreto chega com uma equipe motivada e liderada por profissionais experientes que gostam de desafios. Não é a toa que muitas das histórias do concreto no Brasil foram escritas por eles e pelo visto escreverão muitas mais.

#### Nossa estrutura

- 120 m<sup>3</sup>/h de produção de concreto de qualidade.
- Produção e entregas informatizadas.
- Precisão e rapidez no atendimento.
- Estrutura eficiente de pós-venda.
- Soluções para obras de pequeno, médio e grande porte.
- Usinas de canteiro.

11 3616.2244 [www.megaconcreto.com.br](http://www.megaconcreto.com.br)