

## DEFORMAÇÃO DE FLANGE SOLDADO EM TORRE EOLICA

Leandro Messias Santos Oliveira<sup>1</sup>

Charles Chemale Yurgel<sup>2</sup>

### RESUMO

Deformações de flanges soldados é uma descontinuidade causada pelo processo de fabricação de torres eólicas, em função dos rigorosos critérios de projeto ligado a torre. A distorção destes componentes de fixação obriga uma padronização e um maior controle do processo produtivo. Este trabalho apresenta resultados das deformações dos flanges soldados com o processo de soldagem de arco submerso (SAW) tandem, com arames de classificação F7A8-EM12K com diâmetro de 4,0 mm. Foi praticada uma metodologia para monitoramento da deformação através de um medidor de planicidade e conicidade a laser que estabelece um plano de referência entre a torre e o flange. Os resultados encontrados serviram de base para fabricação de torres futuras, compreensão das deformações e busca de métodos competitivos para o mercado eólico.

**Palavras-chave:** Arco Submerso; Deformação; Controle Dimensional;

### 1 INTRODUÇÃO

A geração de energia elétrica é uma preocupação mundial devido ao consumo crescente de energia e a falta de água nas hidrelétricas. Então a aplicação da torre eólica pode ser uma possibilidade em curto prazo de atender a demanda de energia elétrica, além de reduzir o impacto ambiental e o recurso de fabricação menores comparados aos métodos, como: Turbinas a gás e hidrelétricas.

---

<sup>1</sup> Tecnólogo em Soldagem - Senai Cimatec. E-mail: [leandro.oliveira@ten.ind.br](mailto:leandro.oliveira@ten.ind.br)

<sup>2</sup> Doutor em Engenharia com ênfase em Processos de Fabricação E-mail: [chemale@fieb.org.br](mailto:chemale@fieb.org.br)

A torre tem um formato tubular dividida em 3 ou 4 partes, com o costado de chapas e flanges de aço laminados a quente e normalizado com a nomenclatura de S355 J2+N (EN ISO, EN ISO 10025-2, 2004). O projeto de fabricação do mesmo tem como referência a norma europeia EN 1993 parte 3 (2006) e a norma americana AWS D1.1 (2008). Estas normas serviram de orientação para estabelecer o critério de soldagem e dimensional em condição de esforços cíclicos para estruturas tubulares. O critério relaciona medida de acabamento de soldagem, deformação, alinhamento entre chapa e deslocamento de solda longitudinais do costado. No processo de produção a garantia da qualidade após soldagem de chapas e flanges é de suma importância, pois o projeto é voltado a condições extrema de fadiga, logo o acompanhamento da cadeia de fornecedores até a fabricação da torre é extremamente rigoroso no requisito estabelecido por norma. O flange é a parte da torre com critérios mais rigorosos por fazer a conexão entre as secções e o posicionamento das partes. A estrutura do flange, tendência a provocar variações dimensionais inevitáveis, que podem resultar em defeitos no acoplamento influenciando diretamente na conicidade e planicidade. (LOUREIRO,2014)

A deformação do flange ocorre em duas condições: ovalização pelo peso (por causa do formato da torre cilíndrica) e na soldagem. Logo, a principal causadora de mudança dimensional permanente é o aporte térmico aplicado na soldagem (pré-aquecimento e heat input), devendo ser controlado na fabricação. Este artigo, apresenta os resultados das variações de planicidade e conicidade do flange após a soldagem pelo processo de arco submerso (SAW) tandem em aço S355 J2+N. Comparando as condições medidas com os critérios de projeto.

O objetivo é compreender a influência da soldagem por arco submerso tandem sobre a deformação do flange de aço S355 J2+N, através do planejamento de medições a laser da planicidade e conicidade buscando contribuir para novos projetos de fabricação de torres eólicas.

- a) Entender o mecanismo de deformação do flange
- b) Desenvolver base de comparação para novos projetos e implementação em fabricações seriadas

## **2 MATERIAIS E METODOS**

### **2.1 Torres Eólicas**

Atualmente as torres tem uma forma geométrica tubular, tipo casca, confeccionadas a partir de chapa de aço, depois evoluindo para a configuração em tronco cone. O uso de aerogeradores de grande porte são montadas em torres tubulares de aço com mais de 100 metros de altura. As torres tubulares fabricadas em aço são habitualmente, divididas em segmentos (cilíndricos ou cônicos) com 20 a 30 metros de comprimento cada, soldados ou aparafusados internamente. As limitações de comprimento são impostas normalmente devido à dificuldade de transporte do local de fabricação ao local de instalação, como também a dificuldade de montagem. (BRUNO, et all.2010)

O projeto da torre facilita ao um processo fabril seriado, onde a margem de ganho empresarial é pequena e o lucro está atrelado a quantidade produzida. Na construção orçamentaria da fabricação de torre os índices de reparo de solda e níveis de qualidade são considerados marcos que garantem um aumento de caixa. Então a procura por um processo de soldagem confiável deve o principal processo na fabricação. A soldagem deve atender os índices estabelecidos e garantir a velocidade de produção. Portanto dentro de tantas necessidades o arco submerso é o processo que atende aos requisitos perfeitamente, além de ser aplicado a reservatórios de grandes dimensões e espessuras de chapas variadas.

A soldagem por arco submerso é um método no qual o calor requerido para fundir o metal é gerado por um arco formado pela corrente elétrica passando entre os arames de soldagem (eletrodos nus) e a peça de trabalho (metal de base). A ponta do arame de soldagem, o arco elétrico e a peça de trabalho são cobertos por uma camada de um material mineral granulado, conhecido por fluxo, o qual protege a poça de fusão do ambiente. Não há arco visível nem faíscas, respingos ou fumos. A taxa de deposição alcançada com esse processo é cerca de duas vezes a da

soldagem com um arame, pensando no processo seriado é interessante a aplicação deste tipo de variação do arco submerso, conforme figura 1. (FORTES, 2004)

Na soldagem com arcos múltiplos — conhecida como processo tandem — cada arame é ligado à sua própria fonte e é alimentado simultaneamente por seu próprio alimentador. O 1º arame, que é operado a altas correntes (normalmente CC+) e a baixas tensões, produz alta penetração, enquanto que o 2º arame aplica correntes mais baixas (normalmente CA) para deixar o perfil do cordão de solda mais suave. A corrente alternada é empregada normalmente no 2º arame para evitar os efeitos indesejáveis de sopro magnético resultante da atração magnética de arcos muito próximos. O 1º arame tem normalmente o ângulo de ataque puxando e o 2º arame empurrando. Os arames usados nesse processo são normalmente de grande diâmetro (3,0-6,0 mm). (FORTES, 2004)



Figura 1 Processo de Arco Submerso (SAW) Tandem

A energia de soldagem é o somatório de ambos os arames, alcançando resultados entre 7 á 10 Kj/mm de aporte de calor, que aumenta a probabilidade de redução de propriedades mecânicas e a tenacidade. Além de maximizar a possibilidade de deformação da junta soldada.

### 3 METODOLOGIA

A metodologia para análise deste artigo, foi a separação de 10 torres para acompanhamento, compreensão do comportamento dos flanges após a soldagem e a complementação das secções das torres.

#### 3.1 Material

As amostras separadas são de aço S355 J2+N, conforme composição química e propriedades mecânicas mostradas na Tabela 1 e 2. Este material é comumente aplicado na fabricação de torre, pelo custo baixo de fabricação e atende aos requisitos de propriedades mecânicas e tenacidade em serviços de moderada a baixa temperatura, onde o limite de escoamento do material é de 355 MPa correspondendo a sua especificação ISO 10025-2 (EN ISO, EN ISO 10025-2, 2004).

**Tabela 1** – Composição Química (medida nominal) do S355

Elemento Químico	Percentual
Carbono	0,22%
Silício	0,55%
Niquel	0,3%
Manganês	1,6%
Cromo	0,3%
Molibdenio	0,08%
Alumínio	0,02%
Enxofre e Fosforo	0,035

Fonte: EN ISO 10025-2, 2004

Obs.: Somatório de Cr+Mo+Ni deve ser menor que 0,048% e carbono equivalente < 0,45%, conforme a AWS D1.1.

**Tabela 2** – Propriedades do Mecânica (medida nominal) do S355

Propriedades Mecânica	Critérios
Limite de Escoamento	355 MPa
Limite de Resistência	450 - 600 MPa
Alogamento Mínimo	22%
Energia de ensaio de Impacto com temperatura á – 20°C	27 J

Fonte: ISO 10025-2, 2004

Os flanges apresentam dimensões conforme figura 2, a junta a ser soldada na torre (flange na chapa) é uma junta de topo com chanfro em X, com comprimento de 25,4 mm, largura da espessura do flange de 135 mm, ângulo do chanfro de 80°, abertura de raiz de 2 mm e nariz de 4 mm, segundo a figura 3.

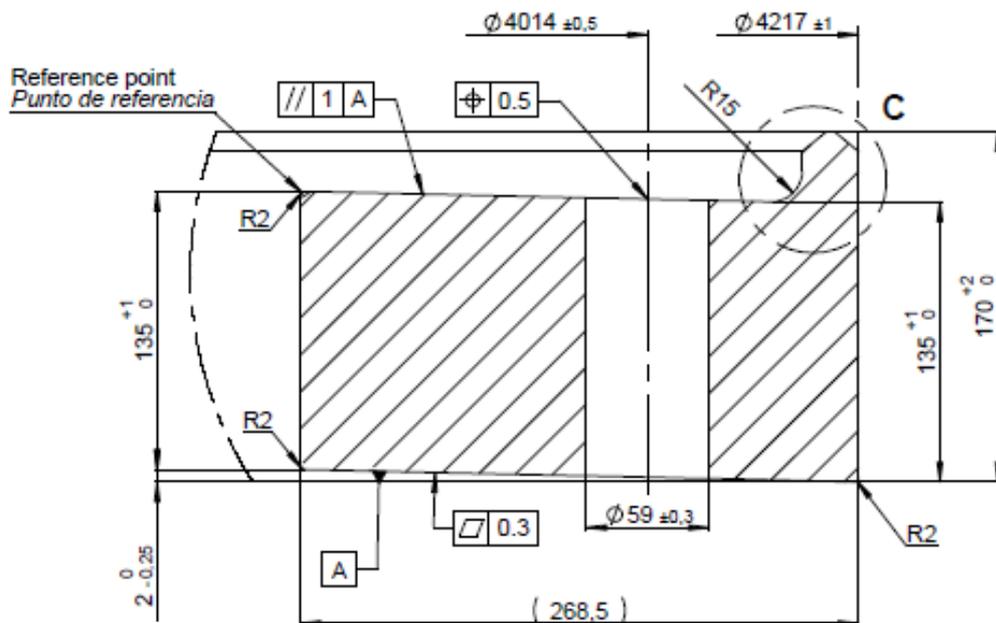


Figura 2 Dimensões do flange.

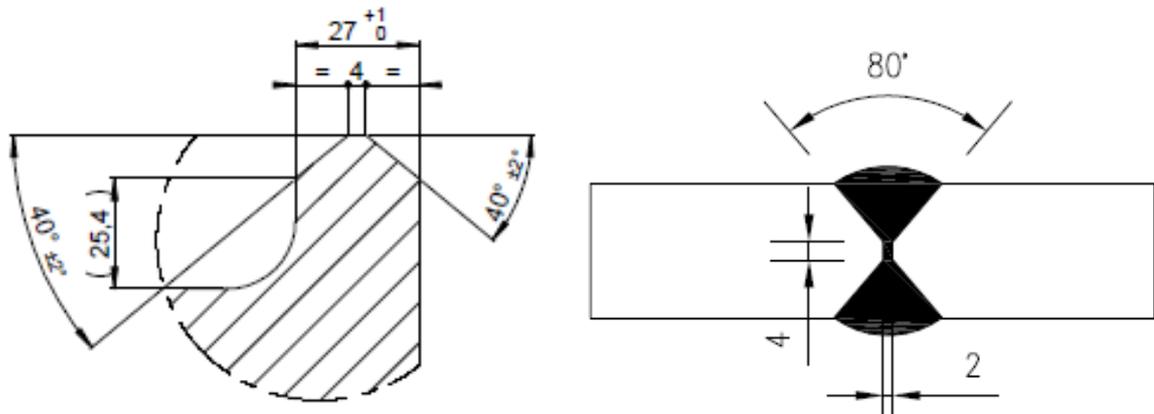


Figura 3 Dimensões do Chanfro

### 3.2 Consumível

Os dois arames de soldagem utilizados foi o EM12K de  $\varnothing$  4,0 mm. Esta nomenclatura é padrão da norma AWS A5.17, 2005. Os números estão relacionados com o percentual dos elementos químicos. Na tabela 3 apresenta as composições químicas.

**Tabela 3** – Composição Química (medida nominal) do EM 12K

Elemento Químico	Percentual
Carbono	0,05 / 0,15
Silício	0,1 / 0,35
Níquel	Obs.
Manganês	0,8 / 1,25
Cobre	0,35
Molibdenio	Obs.
Vanádio	Obs.
Enxofre e Fosforo	0,03

Fonte: AWS

Obs.: Outros elementos podem ser adicionados como: Cr, Al, Ni e Mo; com menos que 0,5% são aceitáveis.

O fluxo utilizado foi o F7A8 EM12K, tipo aglomerado, neutro e básico. O fluxo também tem a nomenclatura padrão da norma AWS A5.17, e relacionado com os valores máximos da composição química do arame.

Os parâmetros de soldagem empregados estão indicados na tabela 4. A parametrização da soldagem é estabelecida através do padrão desenvolvido pela empresa para alcançar os resultados de produção esperados ao longo dos projetos adquiridos.

**Tabela 4 – Parâmetros de Soldagem**

	Processo	Arame	Corrente (A)	Tensão (V)	Velocidade (mm/min)	Aporte Termico
Externa	SAW	1	715	32	510	2,69
		2	580	40		2,73
Interna	SAW	1	960	33	480	3,96
		2	650	42		3,41

### 3.3 Equipamento para monitoramento a laser

Para realizar as medições do dimensional e deformação do flange foi utilizado o Easy laser E-915, que é aplicado para medições de precisão de centésimos de milímetro (figura 4). Este equipamento auxiliou para desenvolver o método de diferença entre pontos a partir dos valores da medição do plano a laser para planicidade e conicidade do flange.



Figura 4 Easy laser e medição com o equipamento no flange

### 3.4 Procedimento de Experimental

Para realizar está análise foi desenvolvido um procedimento de execução para medição com o aparelho e um comparativo dos valores obtidos. Inicialmente foi definida o ponto zero de referência para medição posicionando os pontos a partir de 30° seguindo o sentido horário a partir do flange e da solda longitudinal na torre, conforme indicado na figura 5.

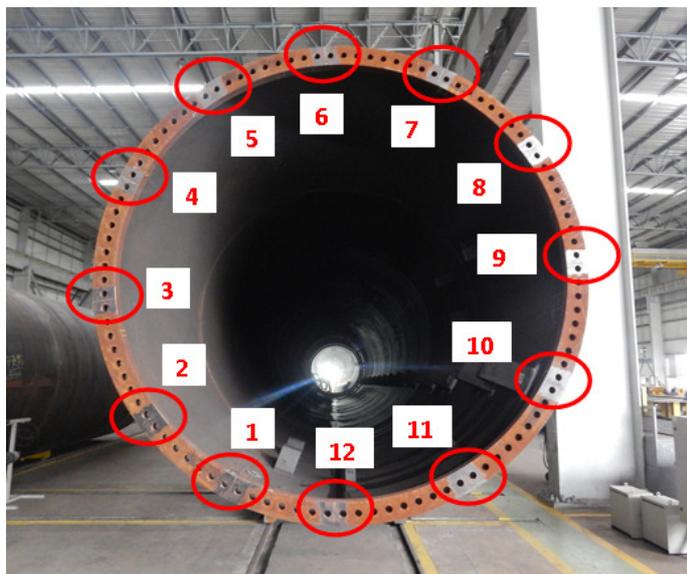


Figura 5 Localização dos pontos de medição no Flange

O passo seguinte foi nivelamento do equipamento para medição da planicidade, colocado em 3 pontos perpendiculares conforme a sequência definida na figura abaixo.

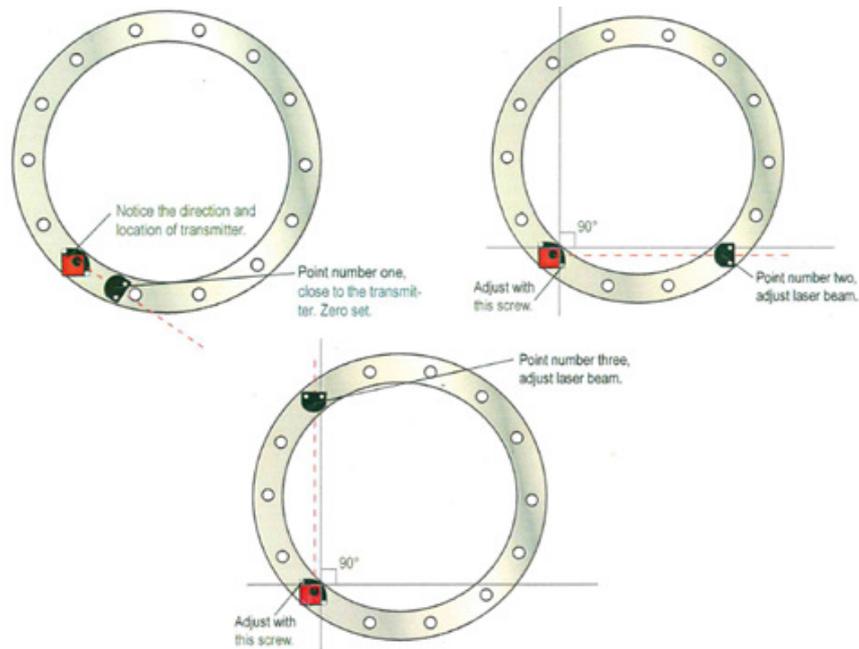


Figura 6 Pontos para nível o equipamento para medir a planicidade.

A última medida a ser executada é a medição de 2 pontos (ponto A e B) nos 12 eixos e o critério permitido de conicidade e planicidade é entre 1 e 2 mm conforme figura 7 a) e b).

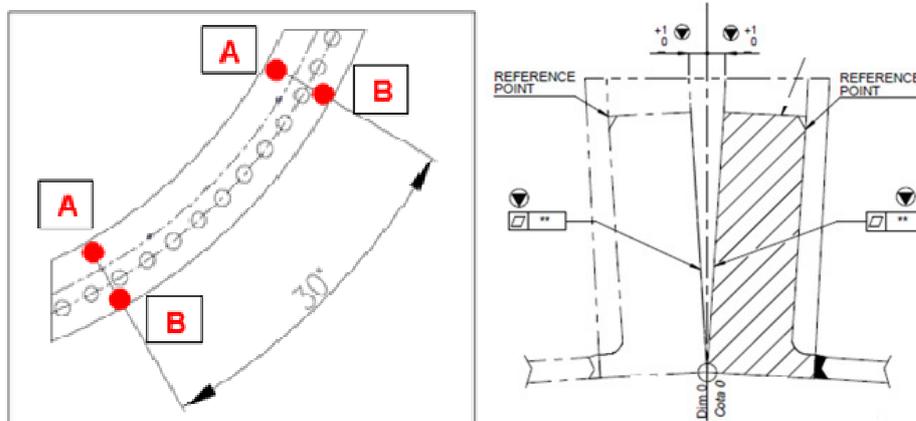


Figura 7 a) Medição dos pontos A e B. b) Variações do Flange (Conicidade e Planicidade)

#### 4 RESULTADO E DISCURSSÕES

Os resultados da tabela 5 mostra a inspeção de conicidade das 10 torres soldadas no processo, dividida em acumulados de media, mediana e números que se repetem mais vezes (moda), esta analise está de acordo com a ISO 1993 parte 3.1. A conicidade é calculada a partir da diferença entre os pontos A e B analisado eixo a eixo, conforme formula abaixo.

$$\text{Conicidade por eixo (mm)} = \text{Ponto A} - \text{Ponto B}$$

**Tabela 5 – Conicidade do Flange após Soldagem**

Eixo	Conicidade	Conicidade	Conicidade
	Media (mm)	Mediana (mm)	Moda (mm)
1	-0,36	-0,30	-0,02
2	-0,43	-0,44	-0,17
3	-0,37	-0,33	-0,87
4	-0,45	-0,40	-0,92
5	-0,36	-0,47	-0,50
6	-0,45	-0,38	-0,94
7	-0,33	-0,18	-0,66
8	-0,20	-0,20	-0,16
9	-0,41	-0,35	-0,69
10	-0,33	-0,23	-0,13
11	-0,29	-0,19	-0,57
12	-0,31	-0,41	-0,02

O segundo resultado é a planicidade do flange que garante o contato entre as partes da torre no momento da elevação da torre. Na tabela 6 apresenta os valores médios das medidas a 30°, 60° e 90° comparada com os 12 eixos das 10 torres requeridas pelo projeto para planicidade. E a tabela 7 apresenta o resultado de cada torre com relação aos 12 eixos (medição a 360°).

**Tabela 6** – Planicidade do Flange após Soldagem relacionado aos ângulos 30°, 60° e 90°

Eixo	30° (mm)	60° (mm)	90° (mm)
1	0,27	0,47	0,65
2	0,41	0,59	0,70
3	0,24	0,54	0,63
4	0,17	0,33	0,51
5	0,40	0,46	0,68
6	0,40	0,65	0,80
7	0,31	0,65	0,68
8	0,21	0,46	0,67
9	0,42	0,56	0,71
10	0,27	0,60	0,73
11	0,49	0,57	0,73
12	0,33	0,68	0,72

Os resultados apresentados na tabela 6 de planicidade entre os ângulos do flange indica a variação de decimo de milímetro do flange após soldagem, quando o critério requerido pelo projeto deve ser entre 1 a 2 milímetros dependendo do ângulo de avaliação.

Este tipo de avaliação indica a localização no flange que no acoplamento entre as secções apresentará maior resistência ao estorço que o responsável pela

fixação e elevação da torre. Pensando no projeto, este tipo de variação não é aceitável pois os esforços na torre estão relacionados a fadiga que reduzem e muito a resistência mecânica destes elementos fixadores.

Os resultados da tabela 7 apresentam a tendência de média de 1,01 mm de variação no flange medido a 360° (relacionando os 12 eixos do flange). Com estes dados positivos aumentam a confiabilidade do processo dimensional da empresa e do processo de fabricação da torre.

**Tabela 7** – Planicidade do Flange pôs Soldagem

Eixo	360° (mm)
1	0,27
2	0,41
3	0,24
4	0,17
5	0,40
6	0,40
7	0,31
8	0,21
9	0,42
10	0,27
11	0,49
12	0,33

## **5 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

A soldagem do flange a partir dos resultados descrito acima apresentou uma conicidade com deformação de 0,5 mm para parte externa da torre (chamada de deformação positiva para fora) e planicidade média de 1,01 mm em todas as medidas comparadas com 360° do flange e o valor máximo de 0,8 mm para variações entre graus de 30°, 60° e 90°.

Estes valores atendem perfeitamente as condições definidas no projeto de torres eólicas e das normas europeia e americana. Além de atenderem, servirão de orientação para melhorias na compra, no processo fabril de torres, na correção em resultados dimensionais negativos através de usinagem ou calibração por calor, eliminação de etapas improdutivas e que não agregam valor.

Conclui-se que o processo de fabricação (caldeiraria e soldagem) atende a condição requerida e a compreensão do comportamento do flange pode ser estudada para projetos futuros de torres eólicas, buscando melhorias para novos projetos e modificações de processos produtivos.

## DEFORMATION IN FLANGES WELDED TO WIND TOWER PREPARATION

Leandro Messias Santos Oliveira<sup>3</sup>

Charles Chemale Yurgel<sup>4</sup>

### ABSTRACT

Deformations of welded flanges is a discontinuity caused by the process of manufacturing wind towers, in function of the rigorous design criteria connected to the tower. The distortion of these fastening components requires standardization and greater control of the production process. This work presents results of the deformations of the welded flanges with the tandem submerged arc welding (SAW) process, with F7A8-EM12K classification wires with a diameter of 4.0 mm. A methodology was used to monitor deformation through a flatness and laser taper meter that establishes a reference plane between the tower and the flange. The results obtained served as a basis for the manufacture of future towers, understanding the deformations and searching for competitive methods for the wind market.

**Keywords:** Submerged Arc; Deformation; Dimensional control;

---

<sup>3</sup> Tecnólogo em Soldagem - Senai Cimatec. E-mail: [leandro.oliveira@ten.ind.br](mailto:leandro.oliveira@ten.ind.br)

<sup>4</sup> Doutor em Engenharia com ênfase em Processos de Fabricação E-mail: [chemale@fieb.org.br](mailto:chemale@fieb.org.br)

## REFERÊNCIAS

American Welding Society AWS D1.1. **Structural Welding Code – Steel. American Welding Society.** Miami, FLA, USA, 2008.

American Welding Society. **AWS A5.17/17M-15: Specification for carbon steel electrodes and fluxes for submerged arc welding.** Miami: AWS; 2015.

FEIJÓ, P. B. **Otimização de torres de aço para geradores eólicos.** Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Ceará, 2010.

FEIJÓ, P. B., Lima, J. B. C. A., Melo, A. M. C., Parente, E. **Otimização estrutural de torres de aço tubulares para geradores eólicos;** Mecânica Computacional Vol. XXIX, págs. 781-792 Buenos Aires, Argentina, 15-18 novembro, 2010.

EN 10025 - 2. **Hot rolled products of structural steels. Technical delivery conditions for non-alloy structural steels.** União Europeia: EN; 2004.

EN 1993 3 1. **Eurocode 3 - Design of steel structures - Part 3-1: Towers, masts and chimneys - Towers and masts.** União Europeia: EN; 2006.

FORTES, C. **Arco Submerso.** Ed. ESAB, 2004.

KOU, S. **Welding Metallurgy.** 2nd ed. New York: John Willey & Sons, 2003.

HOULDCROFT, P.T. **Submerged-Arc Welding.** UK: Abington Publishing, 1989.

LINCOLN, J.F. **Procedure Handbook of Arc Welding.** 14th Edition. Cleveland, Ohio: Lincoln Arc Welding Foundation, 2000.

LOUREIRO, M. A. F. **Dimensionamento de torre eólica de 90m.** Coimbra, Portugal, 2014. 8p.

REN 21. **Renewables 2016 global status report.** Paris: REN21, 2016

RIBEIRO, J. C. R. S. **Análise de tensões residuais e deformações em soldadura** Lisboa, Portugal; 2010.