

Tema: Soldagem

## SOLDABILIDADE DO AÇO ESTRUTURAL EN 10025-4 S355M NA FABRICAÇÃO DE TORRES EÓLICAS\*

Leonardo de Oliveira Turani<sup>1</sup>  
Tadeu Messias Donizete Borba<sup>2</sup>  
Ronaldo Cardoso Junior<sup>3</sup>  
Hugo Reis Gama<sup>4</sup>  
Guaracy Damasio de Oliveira Junior<sup>5</sup>

### Resumo

A energia eólica, fonte de energia renovável e de baixo impacto ambiental, vem crescendo rapidamente na última década, em especial no Brasil. A conversão da energia cinética dos ventos em energia elétrica é realizada por aerogeradores, que são acopladas em torres, que na sua maioria são constituídas de anéis sobrepostos de aço, os quais são fabricados e montados com o emprego de várias etapas de soldagem. Em função disso, o conhecimento da soldabilidade dos aços estruturais é um fator importante para indústria eólica, dando subsídios para a elaboração de procedimentos que permitam a redução dos custos de soldagem e a seleção adequada dos aços empregados. Este trabalho objetivou a avaliação da soldabilidade do aço estrutural EN 10025-4 S355M através de ensaios mecânicos e metalográficos de juntas soldadas pelo processo de arco submerso (SAW) em duas diferentes técnicas: *Single Arc* e *Tandem Arc*. Os resultados mostraram que o aço S355M apresentou excelente soldabilidade, com destaque para o processo SAW *Tandem Arc*, o que possibilita a maior exploração desta técnica como uma excelente alternativa para a redução do tempo de soldagem durante a fabricação de torres eólicas.

**Palavras-chave:** Arco submerso; Energia eólica; Zona afetada pelo calor.

### WELDABILITY OF THE STRUCTURAL STEEL EN 10025-4 S355M IN THE MANUFACTURING WIND TOWERS

#### Abstract

Wind energy, as a source of renewable energy and low environmental impact, is growing rapidly, especially in Brazil. The conversion of kinetic energy of wind into electrical energy is carried by wind turbines, which are engaged in steel towers produced by welding process in stages of manufacture. Knowledge of the weldability of steels is important for the wind power industry as reduce welding costs skills and aid the correct specification of steel. The thermal cycles created under certain conditions may cause microstructural deny on the heat affected zone (HAZ). So, this study aimed to evaluate the weldability of structural steel EN 10025-4 S355M through for evaluation of mechanical properties and microstructural characterization of joint welded by SAW welding process in two different techniques: Single arc and Tandem Arc. The results showed that S355M steel present excellent weldability, mainly with Tandem Arc process, which enables further exploration of this process as an excellent alternative for reducing the welding time during the manufacturing of wind towers.

**Keywords:** Submerged-arc Welding; Wind energy; Heat affect zone.

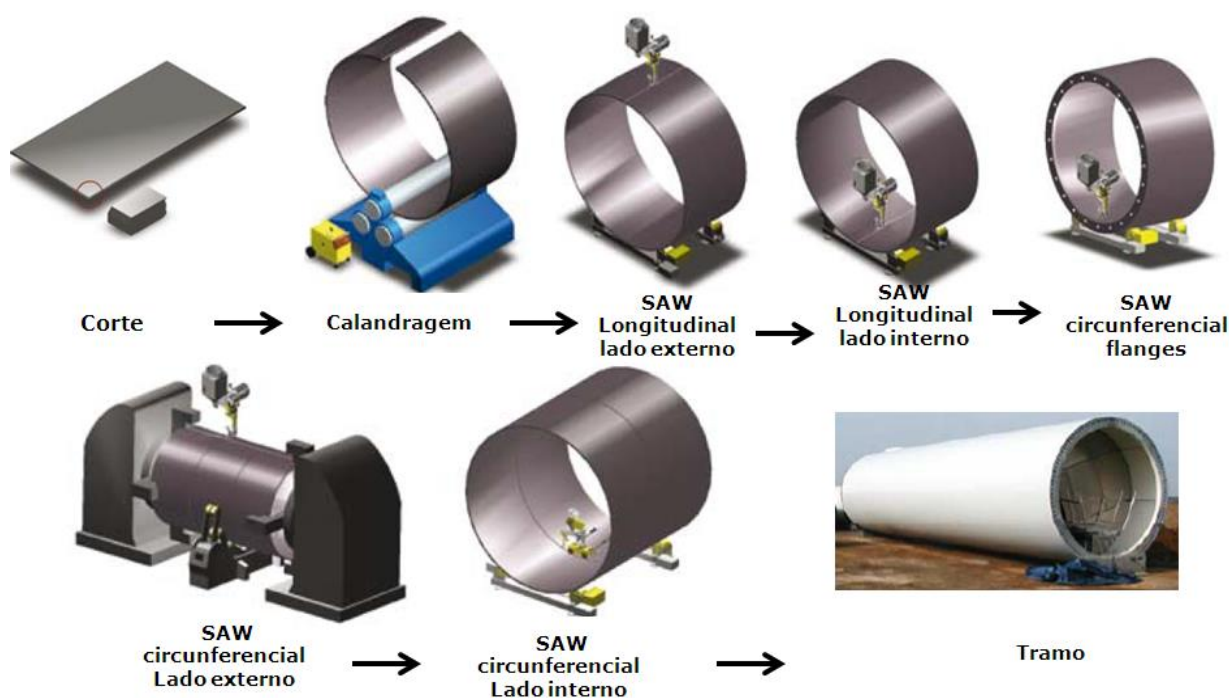
- <sup>1</sup> Engenheiro Metalurgista, MSc. Especialista de Produto da Gerência de Atendimento ao cliente, Garantia da qualidade e Produto, Usiminas, Belo Horizonte, MG, Brasil.
- <sup>2</sup> Engenheiro Metalurgista, Pesquisador da Gerência de Pesquisa e Desenvolvimento de Produtos, Usiminas, Ipatinga, MG, Brasil.
- <sup>3</sup> Engenheiro Químico, Supervisor do Centro de Processos, ESAB, Contagem, MG, Brasil.
- <sup>4</sup> Engenheiro Mecânico, Consultor Técnico, ESAB, Contagem, MG, Brasil.
- <sup>5</sup> Engenheiro Mecânico, Engenheiro de Soldagem, GestampWind, Suape, PE, Brasil.

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

# 1 INTRODUÇÃO

A dependência da economia mundial por combustíveis fósseis, os efeitos adversos no meio ambiente provocados pelos meios convencionais de geração de energia, por exemplo, as termoeletricas, e, em especial no caso do Brasil, os baixos níveis dos reservatórios hídricos impulsionaram o grande interesse global na utilização de fontes de energia renováveis e de menor impacto ambiental. Nesse contexto, a energia eólica, como alternativa limpa de geração de energia, vem crescendo rapidamente em todo mundo na última década e, recentemente, no Brasil. Uma turbina eólica, também denominada aerogerador, é uma máquina que converte a energia cinética de translação dos ventos em energia cinética de rotação para a geração de eletricidade.

A maioria das turbinas eólicas é conectada a grandes torres de aço, cilíndricas ou cônicas, que podem atingir até 100 metros de altura, produzidas pela parafusagem entre flanges de 3 a 4 tubos de aço soldados, comumente chamados de tramo metálico. Cada tramo é produzido pela união de, geralmente, 4 a 6 virolas de aproximadamente 3 metros de comprimento cada, proveniente da calandragem e união por solda de uma chapa grossa de aço carbono. Tanto para a soldagem longitudinal, utilizada na fabricação das virolas, quanto para a soldagem circunferencial, aplicada na união entre virolas, é utilizado o processo de soldagem a arco submerso, conforme ilustra a Figura 1.



**Figura 1.** Desenho esquemático das principais etapas da fabricação de um tramo metálico para torres eólicas. Adaptação ESAB [1].

Os fabricantes nacionais de torres eólicas utilizam soldagem com gás de proteção (MIG/MAG) para os passes de selagem, soldagem a arco submerso (SAW) *Single arc* para os passes de enchimento interno e soldagem a SAW *Tandem arc* para os passes de enchimento externo na confecção dos tramos metálicos.

As recentes modificações adotadas pelo governo brasileiro para o conteúdo nacional de equipamentos eólicos têm exigido a formação de uma cadeia de suprimentos

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

eficiente em um prazo cada vez mais desafiador. Em função disso, os fabricantes de tramos metálicos têm intensificado esforços para otimização de suas operações fabris, atuando nos procedimentos de soldagem como a intensificação do uso de processo SAW *Tandem arc*, possibilitando a redução do número de passes e o aumento da velocidade de soldagem. No entanto, os ciclos térmicos associados a essas condições, de alto aporte térmico podem provocar transformações microestruturais prejudiciais às propriedades mecânicas e à tenacidade na zona afetada pelo calor (ZAC) das juntas soldadas.

Usualmente, os aços especificados para as torres eólicas são regidas pelas normas internacionais EN 10025 [11] ou ASTM A572 [12] com requisitos de propriedades mecânicas de 355 MPa de limite de escoamento e tenacidade a baixas temperaturas. Porém, de acordo com a condição de fabricação especificada, Laminação Convencional, Normalização, Laminação Controlada ou Laminação Controlada seguida de Resfriamento Acelerado, o aço, como metal base, apresenta um desempenho específico no processo de soldagem em função do carbono equivalente e do nível de refinamento microestrutural. Na literatura técnica é possível encontrar diversos trabalhos [2-4] que comprovam a superioridade, principalmente em termos de soldabilidade, dos aços TMCP (*Thermomechanical Control Process*), produzidos por Laminação Controlada seguido de Resfriamento Acelerado, em relação às outras condições de fabricação.

Nessa perspectiva, realizou-se um estudo com objetivo de avaliar a soldabilidade do aço TMCP da EN 10025-4 S355M, produzido na Usiminas por Laminação Controlada seguido de Resfriamento Acelerado, aplicado na fabricação de tramos metálicos de torres eólicas. A soldagem foi realizada utilizando o processo SAW, com as técnicas de *Single arc* e de *Tandem arc*, sendo que para essa última foram empregados parâmetros que permitem a redução do tempo das operações usualmente utilizadas na indústria eólica.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Materiais

O material avaliado foi o aço S355M, na espessura de 25 mm, produzido na Usiminas por Laminação Controlada seguida de Resfriamento Acelerado. A composição química e os valores de propriedades mecânicas em tração do material em questão encontram nas Tabelas 1 e 2.

**Tabela 1.** Composição química obtida do aço (% p/p).

Aço	C	Mn	Si	P	S	Nb	Cr	Ti	Ni	Ceq <sup>(a)</sup>
S355M	0,08	1,54	0,24	0,016	0,001	0,017	0,029	0,016	0,025	0,36

Obs.: a -  $Ceq = C + Mn/6 + (Ni+Cu)15 + (Cr+Mo+V)/5$

**Tabela 2.** Valores de propriedades mecânicas em tração do metal base.

Aço	Limite de Escoamento (MPa)	Limite de Resistência (MPa)	Alongamento <sup>(a)</sup> (%)
S355M	449±20	539±23	27±2
Especificação	≥350	470 - 630	≥20

Obs.: a – Base de medida =  $5,65\sqrt{S_0}$  mm

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

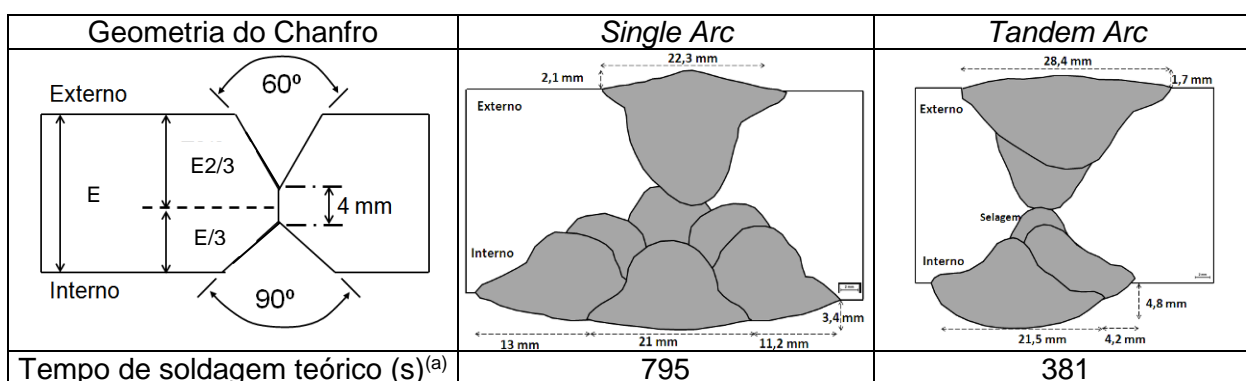
## 2.2 Confeção das Juntas Soldadas

Foi confeccionada uma junta através do processo de soldagem por arco submerso (SAW) *Single arc*, e uma junta empregando o processo SAW *Tandem arc*, procedimento proposto para aperfeiçoar as etapas de soldagem utilizadas na fabricação dos tramos metálicos. Como consumível, foi usada a combinação fluxo e arame AWS - F7A8-EM12K de 4,0 mm de diâmetro. Nas duas juntas, realizou-se um passe de selagem empregando o processo de soldagem GMAW. Não foi utilizado preaquecimento e a temperatura entre passes foi mantida abaixo de 250°C. Detalhes sobre os parâmetros de soldagem e a configuração do chanfro encontram-se na Tabela 3 e Figura 2.

**Tabela 3.** Parâmetros de soldagem (*Single arc* e *Tandem arc*).

Lado da Junta	<i>Single Arc</i>				<i>Tandem Arc</i> <sup>a,b</sup>			
	Interno			Externo	Interno		Externo	
Camada	1°	2°	3°	1°	1°	2°	1°	2°
N° passes	1	2	3	1	1	1	1	1
Corrente (A)	650	630	630	780	650 <sup>c</sup> 500 <sup>d</sup>	650 <sup>c</sup> 500 <sup>d</sup>	750 <sup>c</sup> 650 <sup>d</sup>	750 <sup>c</sup> 650 <sup>d</sup>
Tensão (V)	29	29	29	33	29 <sup>c</sup> 32 <sup>d</sup>	29 <sup>c</sup> 32 <sup>d</sup>	31 <sup>c</sup> 33 <sup>d</sup>	32 <sup>c</sup> 34 <sup>d</sup>
Velocidade (cm/min)	46	46	46	46	80	80	70	70
Aporte (kJ/cm)	25	24	24	34	26	26	38	40

Obs.: a – CC = fonte do tipo corrente contínua; b – CA = fonte do tipo corrente alternada;



Obs.: a – tempo de soldagem estimado na deposição de um passe de 700 mm de comprimento.

**Figura 2.** Representação esquemática da geometria do chanfro e configuração dos passes de soldagem (*Single arc* e *Tandem arc*).

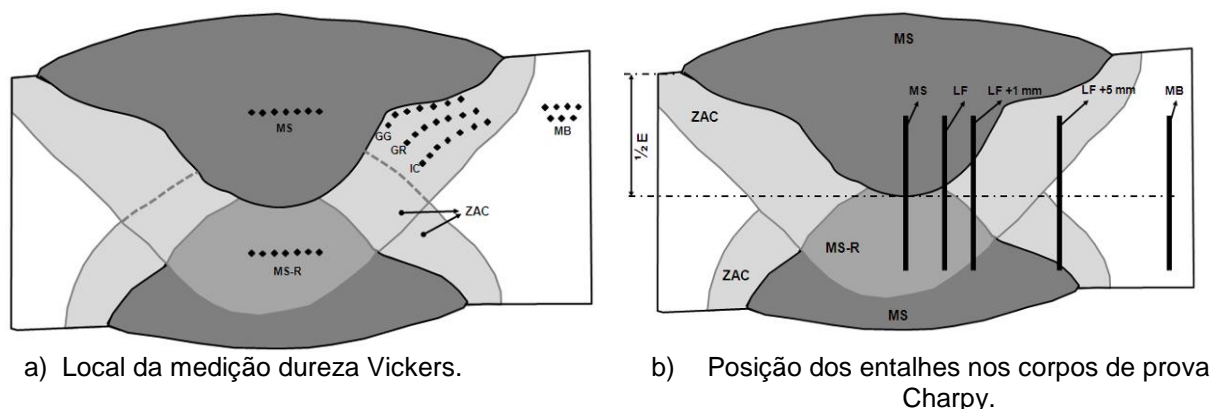
## 2.3 Caracterização das Juntas Soldadas

Após a soldagem, realizou-se análise macrográfica de seção transversal à solda, em amostras retiradas a ¼ do comprimento da junta e atacadas com reativo químico nital 4%. Nesta mesma seção, foi realizado ensaio de dureza Vickers com carga de 1 kgf e distância entre impressões de 0,5 mm nas diferentes regiões ZAC, em posições a 1 mm da face externa. Nestas mesmas posições mediu-se a dureza do metal de solda. A representação esquemática destas medições pode ser vista na Figura 3(a).

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

A análise microestrutural das juntas soldadas também foi realizada a partir da seção utilizada na análise macrográfica. Para isto, selecionou-se uma região do lado externo da junta, em que o metal base foi afetado pelo ciclo térmico de um único passe. Foram avaliadas, ao longo da ZAC, via microscopia ótica e após ataque químico com reativo nital a 4 %, a região de grãos grosseiros (RGG), a região de grãos refinados (RGR) e a região intercrítica (RIC).

Para cada junta soldada foram ensaiados 2 corpos de prova de tração e 2 corpos de prova de dobramento retirados do lado interno e externo do chanfro. A condição de dobramento utilizada foi de  $4E-180^\circ$ , sendo E = espessura da chapa e  $4E$  = raio de dobramento. Os corpos de prova para estes ensaios foram confeccionados segundo o código ASME, seção IX [5], e ensaiados com base na norma ASTM A370 [6]. Os ensaios de impacto Charpy-V foram realizados com três corpos de prova do tipo *full size*, (10 x 10 x 55) mm, retirados a  $\frac{1}{2}$  da espessura, e confeccionados de acordo com a norma ASTM A370 [6]. Os entalhes foram posicionados no metal de solda (MS), linha de fusão (LF), LF + 1 mm, LF + 5 mm e metal base (MB), retirados de um dos lados do chanfro, como indicado na Figura 3(b). Os corpos de prova foram ensaiados nas temperaturas de 0°C, -10°C e -20°C.



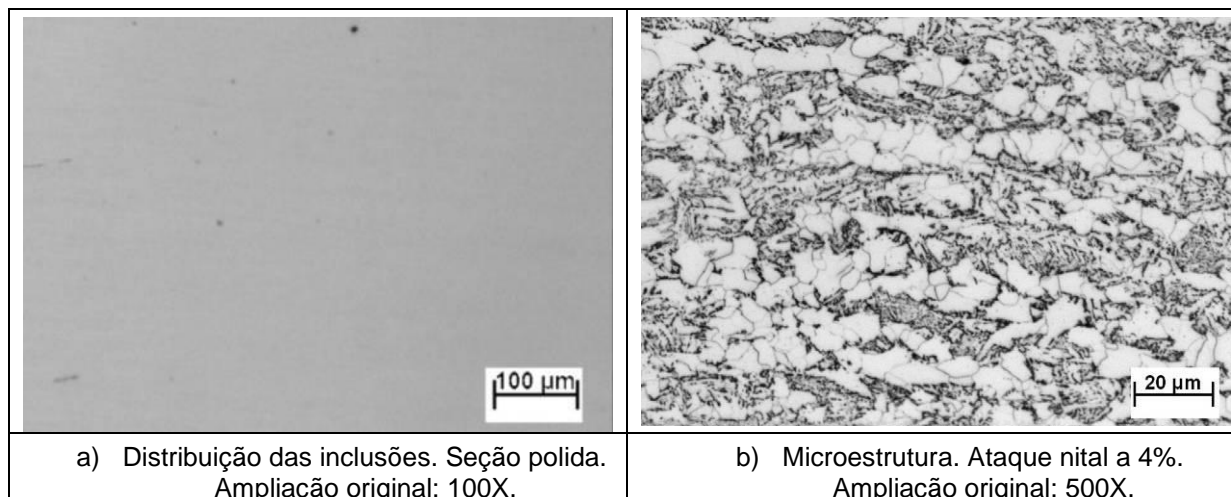
**Figura 3.** Representação esquemática das regiões em que foram realizadas as medições de dureza Vickers e da posição dos entalhes nos corpos de prova para ensaio Charpy. Legenda: metal base (MB); metal de solda (MS); metal de solda reaquecido pelo passe subsequente (MS-R); zona afetada pelo calor (ZAC); região de grãos grosseiros (RGG); região de grãos refinados (RGR); região intercrítica (RIC); linha de fusão (LF).

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Caracterização Metalográfica do Metal de Base

O aspecto típico das inclusões e a microestrutura característica do aço S355M, avaliadas no centro da espessura, pode ser observada na Figura 4. Verificou-se que o aço S355M apresentou inclusões de óxido globular uniformemente distribuída na matriz metálica não sendo identificada a presença de inclusões de sulfeto de manganês na forma alongada. A microestrutura apresenta-se homogênea ao longo da espessura, não sendo observada a presença de segregação central. A microestrutura é constituída principalmente de bainita e, em menor quantidade, de ferrita poligonal e perlita refinadas.

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.



**Figura 4.** Aspecto característico da microestrutura observada a  $\frac{1}{4}$  da espessura do aço S355M.

### 3.2 Caracterização Metalográfica das Juntas Soldadas

O aspecto macrográfico das juntas soldadas pode ser visto na Figura 5. Os passes de raiz apresentaram boa penetração e as juntas estavam isentas de descontinuidades, comprovando que os parâmetros de soldagem utilizados foram apropriados.

O procedimento *Tandem arc* se diferencia do *Single arc* por possibilitar a aplicação de maiores velocidades de soldagem em conjunto com altos aportes de calor. Com a utilização da técnica de *Tandem arc* há um aumento da taxa de deposição, sendo necessário um menor número de passes para preencher toda a junta soldada o que resulta em um aumento na produtividade, como já evidenciado na Figura 2.

Na Figura 6 são apresentadas as microestruturas identificadas no metal de solda das juntas soldadas. A identificação via microscópio ótico dos diferentes constituintes da zona fundida foi realizada segundo o sistema de classificação do Instituto Internacional de Soldagem [7].

Na soldagem multipasses, existem duas regiões no cordão de solda bem distintas em termos microestruturais e de propriedades mecânicas que são: i) a região do metal de solda que se apresenta como soldado (MS), ou seja, não sofreu alteração na sua estrutura original, e ii) a região do metal de solda que sofreu reaquecimento (MS-R), que no caso foi provocado pelo ciclo térmico do passe subsequente.

Em termos microestruturais, a região MS de todas as juntas soldadas apresentou, na região central, microestrutura predominante de ferrita de contorno de grão (PF(G)), perlita (P) e ferrita acicular (AF). Já no metal de solda próximo à ZAC, a quantidade de AF foi considerável. Com os consumíveis empregados, quando utilizada a técnica de soldagem convencional *Single arc*, foi observada uma maior quantidade de AF. A maior quantidade de PF(G) e P, quando empregado a técnica de soldagem *Tandem arc*, pode ser atribuída à menor taxa de resfriamento do cordão, associada ao maior aporte de calor utilizado com esta técnica. Já a região MS-R, que foi reaquecida acima da temperatura  $A_{c3}$  pelo passe subsequente, sofre um rápido ciclo térmico resultando em um refinamento da estrutura grosseira, MS, a qual, normalmente, é associada a uma boa tenacidade.

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

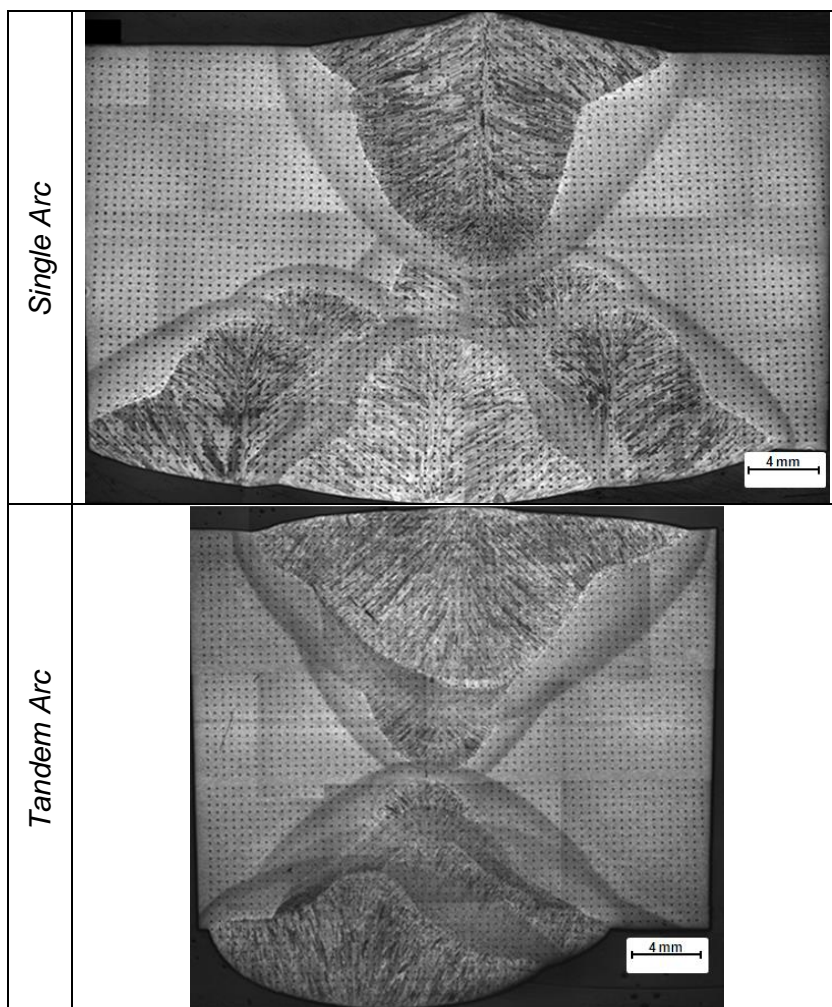


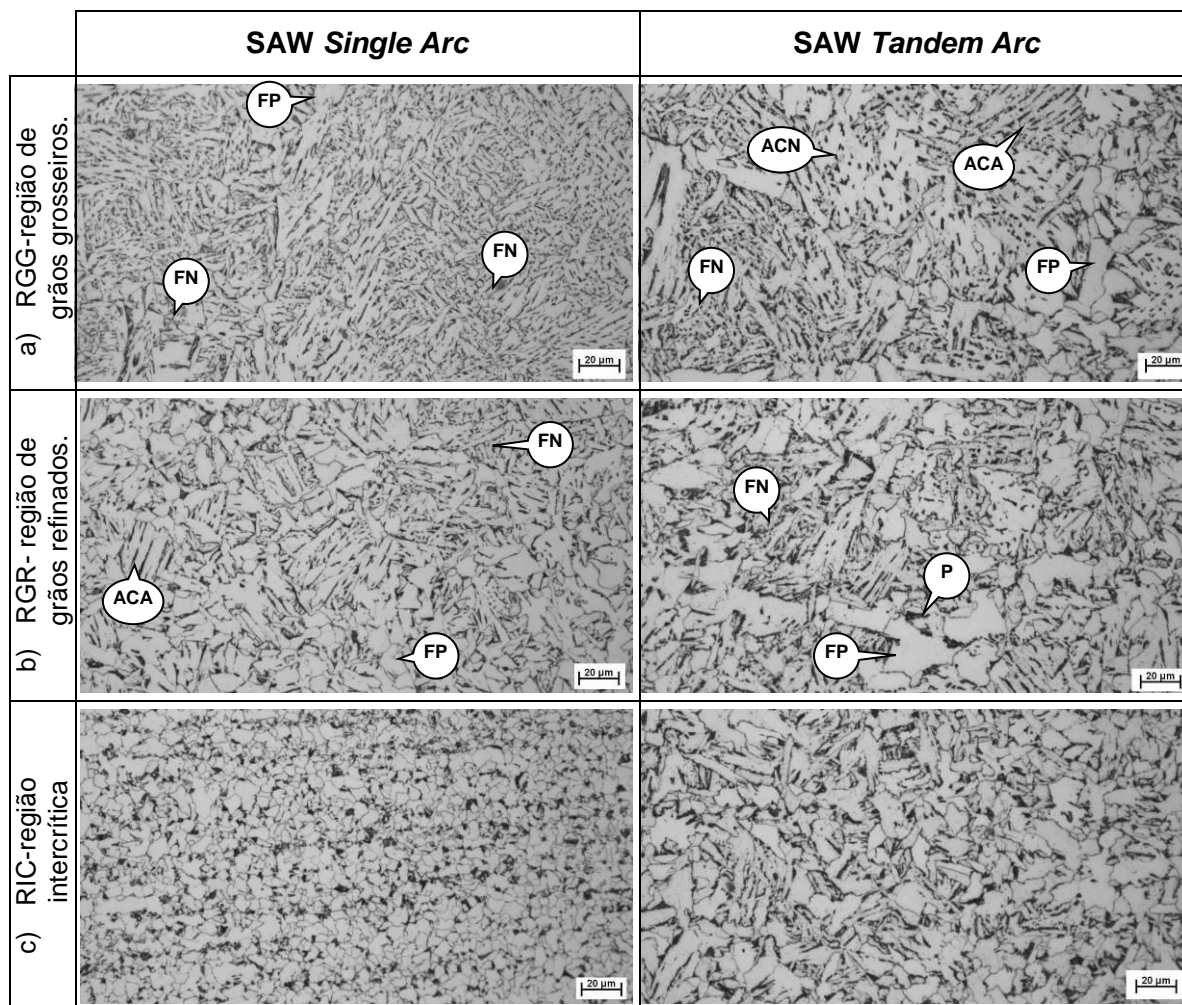
Figura 5. Macrografia das juntas soldadas.

	Metal de solda como soldado (MS)	Metal de solda reaquecido pelo passe subsequente (MS-R)
Single Arc		
Tandem Arc		

Figura 6. Aspecto típico da microestrutura observada no MS. Ataque nital 4%. Aumento Original: 500X. PF(G) = ferrita de contorno de grão, AF = Ferrita acicular, FS(A) = ferrita com segunda fase alinhada, P = perlita, FC = agregados ferrita-carbonetos.

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

Na Figura 7 são apresentadas as microestruturas identificadas ao longo da ZAC. Esta análise concentrou-se em regiões relativas ao último passe de soldagem, do lado externo do chanfro, onde não há efeito de reaquecimento pelo passe subsequente. A identificação via microscópio ótico, dos diferentes constituintes ao longo da ZAC foi realizada segundo o sistema de classificação The Welding institute (TWI) [8].



**Figura 7.** Aspecto da microestrutura observada ao longo da ZAC. Ataque nital 4%. Ampliação: 500X. (FP=ferrita de contorno de grão, P=perlita, FN=ferrita de Widmanstatten intragranular, FC=agregados ferrita-carbonetos, ACA=ferrita com segunda fase alinhada e ACN=ferrita com segunda fase não alinhada.)

Verificou-se um aumento da extensão das sub-regiões da ZAC com o aumento do aporte de calor, ou seja, quando utilizada a técnica de soldagem *Tandem arc*. Próxima a linha de fusão (RGG), observam-se um aumento do grão da austenita prévia, devido à alta temperatura de pico atingida nessa região, e a presença de microestruturas mais grosseiras e de maior temperatura de transformação, favorecidas pela menor velocidade de resfriamento proporcionado pelo aporte térmico empregado no procedimento *Tandem arc*. A região de grãos refinados (RGR), aquecida acima da temperatura  $A_{c3}$ , apresenta, após o resfriamento, um tamanho de grão da austenita formada pequeno devido à sua menor temperatura de pico em relação à RGG. Finalmente, na região intercrítica (RIC), aquecida a

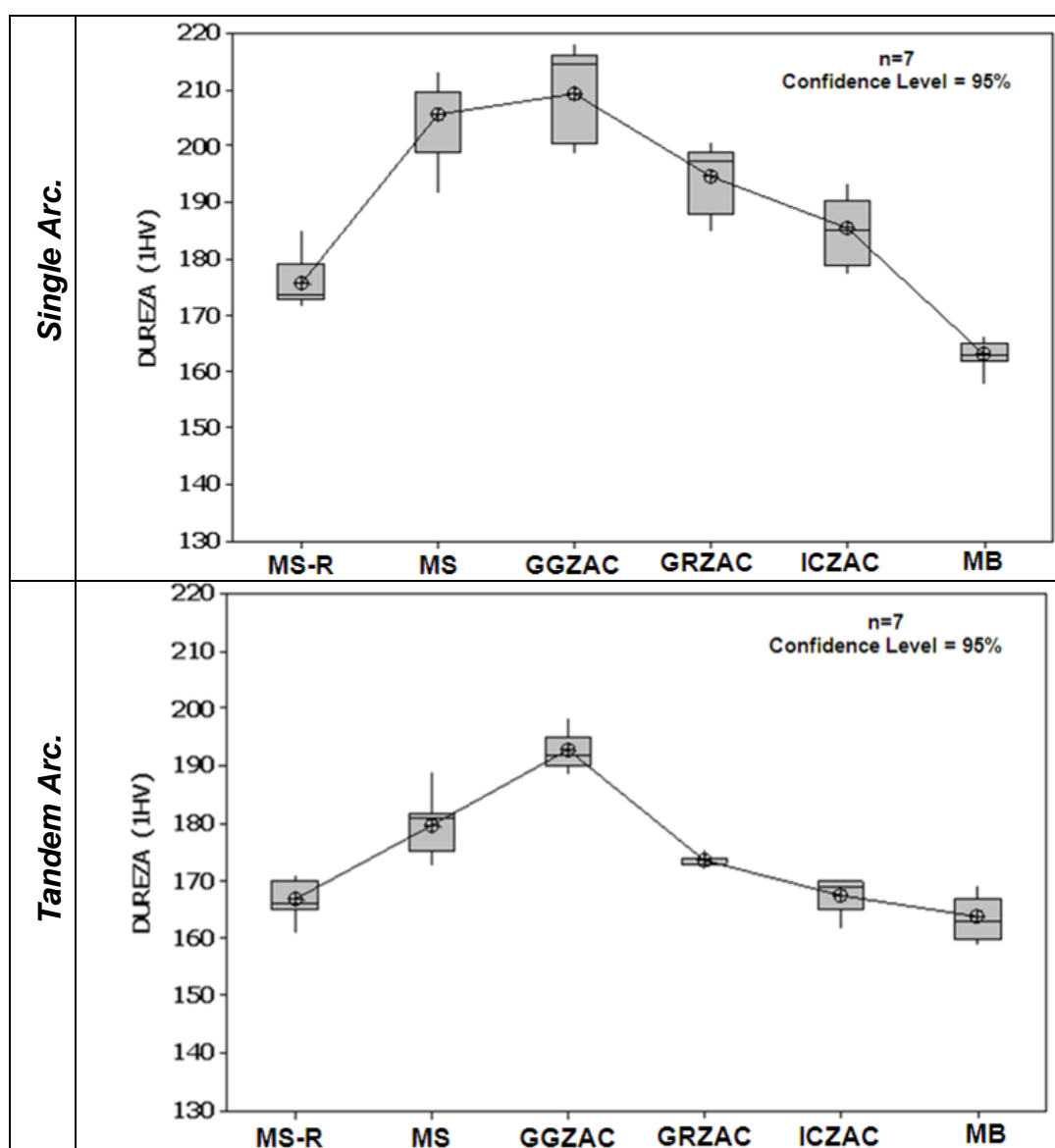
\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.



temperaturas entre  $A_{c3}$  e  $A_{c1}$ , ocorre uma transformação parcial da estrutura original do metal base, determinando um refinamento microestrutural substancial.

### 3.3 Perfil de Dureza

Os resultados do ensaio de dureza nas diferentes regiões da ZAC, realizado para todas as duas juntas, são apresentados na Figura 8. Os maiores valores de dureza foram observados próximos à linha de fusão, onde ocorre o crescimento dos grãos da austenita (RGG). Geralmente, a dureza da ZAC é limitada em função do risco de ocorrência de trincas a frio que, segundo a literatura [4], deve permanecer abaixo de 350 HV. É possível observar que todos os valores estão bem abaixo de 350 HV, sugerindo que o aço S355M, quando soldado com os procedimentos avaliados nesse estudo, possui baixa susceptibilidade à ocorrência de trincas a frio induzidas por hidrogênio na ZAC.



**Figura 8.** Perfil de dureza Vickers. (MS-R=metal de solda reaquecido; MS=metal de solda; GGZAC= região de grãos grosseiros da ZAC; GRZAC= região de grãos refinados da ZAC; ICZAC= região intercrítica da ZCA; MB= metal base).

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

Também é possível notar que os valores de dureza da região de grãos grosseiros das juntas soldadas pelos procedimentos *Single arc* foram superiores aos valores obtidos na mesma região das soldas realizadas pelo procedimento *Tandem arc*. Isso pode ser explicado pela formação de constituintes microestruturais de maior dureza, que são favorecidos pela maior velocidade de resfriamento do processo *Single arc* em relação ao processo *Tandem arc*.

### 3.4 Ensaios de tração e de dobramento

Os resultados obtidos nos ensaios de tração podem ser observados na Tabela 4. O único requisito especificado para as juntas soldadas no ensaio de tração é que o limite de resistência (LR) seja superior ao mínimo especificado para o metal base [10] que, no caso do aço S355M é de 470 a 630 MPa. Esse critério foi atendido para as duas juntas e não houve alterações significativas no valor de LR ao variar do processo *Single* para *Tandem arc*.

**Tabela 4.** Valores de propriedades mecânicas obtidos no ensaio de tração dos corpos de prova das juntas soldadas.

Metal Base	Processo (SAW)	Limite de Resistência (MPa)			Local da fratura
		CP1	CP2	Média	
S355M (25 mm)	<i>Single arc</i>	543	547	545	Metal Solda
	<i>Tandem arc</i>	559	552	556	Metal Base

Limite de resistência para o aço S355M : 470 - 630 MPa

Na Tabela 5 são apresentados os resultados obtidos dos ensaios de dobramento das juntas soldadas. Pelos resultados obtidos, percebe-se que o aço S355M, quando soldado com o processo SAW *Single* e *Tandem arc*, apresentou resultados satisfatórios nos ensaios de dobramento, não exibindo trincas na região do cordão de solda. Esse comportamento ocorreu em decorrência da formação de microestruturas mais dúcteis na ZAC de ambas as juntas (Figura 7). Estas microestruturas conferiram melhor acomodação da deformação durante os ensaios de dobramento.

**Tabela 5.** Resultados obtidos no ensaio de dobramento das juntas soldadas.

Metal Base	Processo (SAW)	Tipo de dobramento	Nº do ensaio	Resultado
S355M (25 mm)	<i>Single arc</i>	Face (lado externo)	1	Aprovado
			2	Aprovado
	<i>Tandem arc</i>	Raiz (lado interno)	1	Aprovado
			2	Aprovado

### 3.5 Ensaios de Impacto Charpy

De acordo com a Figura 9, os valores de energia absorvida obtidos foram superiores ao mínimo especificado para o material avaliado em ambas as técnicas de soldagem utilizadas e nas diversas posições do entalhe.

A excelente soldabilidade do aço S355M se deve aos menores teores de carbono e de carbono equivalente, a menor formação de constituintes mais grosseiros na ZAC, como a ACA, a P e a FP que, segundo Alé [2], são constituintes frágeis. Outro fator que pode ter contribuído para os bons resultados de tenacidade das juntas do

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

S355M é a menor susceptibilidade à formação de constituintes frágeis como o M-A [9] devido ao seu menor teor de carbono.

Pode-se dizer que os menores valores observados no MS foram em função da presença da maior porcentagem de estrutura grosseira, ou seja, que não sofreu efeito do passe subsequente, apresentando maior quantidade de ferrita de contorno de grão que pode prejudicar a tenacidade do MS a baixas temperaturas.

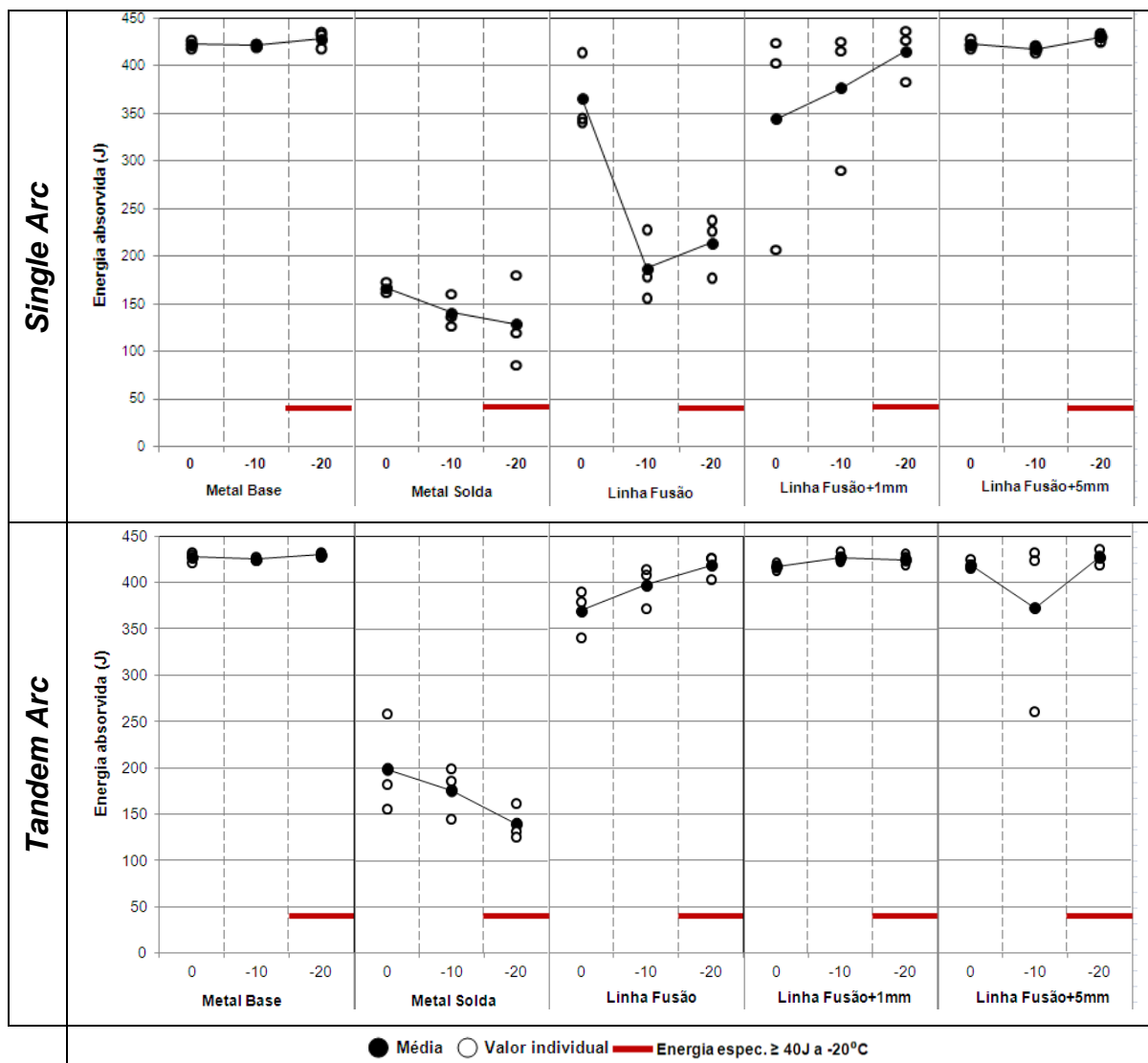


Figura 9. Representação gráfica dos resultados de impacto Charpy-V a 0,-10 e -20°C, em função da posição do entalhe e do procedimento de soldagem.

#### 4 CONCLUSÃO

Em termos macrográficos, todas as juntas soldadas apresentaram-se isentas de discontinuidades e de valores indesejáveis de dureza, cujos maiores valores foram observados na região de grãos grosseiros da ZAC, porém esses resultados foram muito inferiores ao limite máximo aceitável de 350 HV, indicando que as juntas soldadas do aço S355M possuem baixa susceptibilidade à formação de trincas induzidas pelo hidrogênio.

Os resultados obtidos dos ensaios mecânicos em tração e dobramento foram satisfatórios, atendendo ao mínimo especificado pelas normas em todas as juntas,

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.



assim como os valores de energia absorvida no ensaio de impacto Charpy. Independente do procedimento de soldagem adotado, da região da solda avaliada ou da temperatura de ensaio, os valores ficaram acima do mínimo especificado para os materiais base.

Os resultados encontrados demonstraram que as propriedades mecânicas da junta soldada não deterioraram quando substituído o processo de soldagem *Single* pelo *Tandem arc*, o que possibilita a utilização e a maior exploração desse processo em virtude de sua maior produtividade. Com base nos resultados obtidos a utilização do aço S355M na soldagem *Tandem arc*, pode ser aplicada na indústria eólica como uma excelente opção para a redução dos custos de produção, podendo reduzir em aproximadamente 50% o tempo de soldagem das virolas.

## Agradecimentos

Os autores agradecem toda a equipe da Usiminas, ESAB e da Gestamp Wind que contribuíram direta e indiretamente na realização desse trabalho.

## REFERÊNCIAS

- 1 Site da Empresa ESAB. [Online] [Citado em: 10 de dezembro de 2013] <http://www.esab.com/global/en/products/upload/XA00126920.pdf>.
- 2 Alé RA, Torres JAO, Turani LO. Soldagem de aços de alta resistência produzidos via resfriamento acelerado. 65º Congresso Anual da ABM, Rio de Janeiro, 2010.
- 3 Kim SH, Suh IS, Kang KB. Development of TMCP Steel Plate for Shipbuilding Application. s.l. : Posco Technical Report., 2006.
- 4 Toyosa M. Characteristics of TMCP Steel and Their Welded Joints Used for Hull Structures. Japão : Proceedings of International Offshore and Polar Engineering Conference, 2002.
- 5 Código ASME, Seção IX – Qualificação de Soldagem. The American Society Of Mechanical Engineers, 1980, 212p.
- 6 NORMA ASTM A370 – Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products. American Society for Testing and Materials International, 2009, 47p.
- 7 International Institute of Welding IIW, Doc. IX-1533-88. Guide to the light microscope examination of ferritic steel weld metals. 1988.
- 8 The Welding Institute – Introductory Notes on Metallography of Welds in C-Mn Steels. Published by the Welding Institute, Cambridge, UK, 1984.
- 9 Haze AI Tet. Steel Plates With Superior HAZ Toughness for Offshore Structures. Nippon Steel Technical Report: s.n., 1988.
- 10 Welding Handbook – 8<sup>th</sup> edition – American Welding Society.
- 11 Norma EN 10025-4 – Technical delivery conditions for thermomechanical rolled weldable fine grain structural steels, 2004.
- 12 Norma ASTM A572 - Standard specification for high-strength low-alloy columbium-vanadium structural steel, 2013.

---

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.