



Tema: Soldagem

## INCLUSÕES NA FORMAÇÃO DA FERRITA ACICULAR: CARACTERIZAÇÃO POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE TRANSMISSÃO\*

Juno Gallego<sup>1</sup>  
Vicente Afonso Ventrella<sup>2</sup>

### Resumo

A soldagem de peças de aço por arco submerso é um dos processos mais tradicionalmente usados na fabricação de componentes estruturais. A microestrutura do metal de solda é importante na definição das suas propriedades mecânicas, sendo a ferrita acicular um microconstituente capaz de conferir à solda altos níveis de resistência mecânica e tenacidade. A nucleação da ferrita acicular depende da presença de inclusões não metálicas no metal de solda. No presente trabalho fez-se a caracterização microestrutural do metal de solda preparados com diferentes aportes térmicos. Lâminas finas foram observadas por microscopia eletrônica de transmissão, que possibilitou determinar alguns parâmetros morfológicos e químicos das partículas e a sua relação com a nucleação das ripas de ferrita acicular. Verificou-se que partículas irregulares com maior tamanho, mais ricas em titânio quando formadas com maior energia de soldagem, apresentam maior probabilidade de servirem como sítio preferencial para nucleação da ferrita acicular, se comparadas às partículas mais lisas e menores.

**Palavras-chave:** Soldagem por arco submerso; Ferrita acicular; Inclusões; Microscopia eletrônica de transmissão.

### INCLUSIONS AND FORMATION OF ACICULAR FERRITE: CHARACTERIZATION BY TRANSMISSION ELECTRON MICROSCOPY

#### Abstract

Fabrication of steel parts by submerged arc welding is one of most traditional processes used in manufacturing structural components. The microstructure of the weld metal defines their mechanical properties, being acicular ferrite a microconstituent able to assign to the welding high levels of strength and toughness. The nucleation of acicular ferrite depends on the presence of non-metallic inclusions in the weld metal. In this work an extensive microstructural characterization of the weld metal prepared with different heat inputs was carried out by transmission electron microscopy. Thin foil sample observations have determined some morphological and chemical features of the particles and their relationship with the nucleation of acicular ferrite laths. It was found that larger irregular inclusions, richer in titanium when formed under higher heat input, are more effective as preferential site for nucleation of acicular ferrite, if compared to smaller and smoother particles.

**Keywords:** Submerged arc welding; Acicular ferrite; Inclusions; Transmission electron microscopy.

<sup>1</sup> Eng. Mecânico, Doutor em Engenharia de Materiais, Professor Adjunto, Depto. Eng. Mecânica, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Ilha Solteira, SP, Brasil; gallego@dem.feis.unesp.br

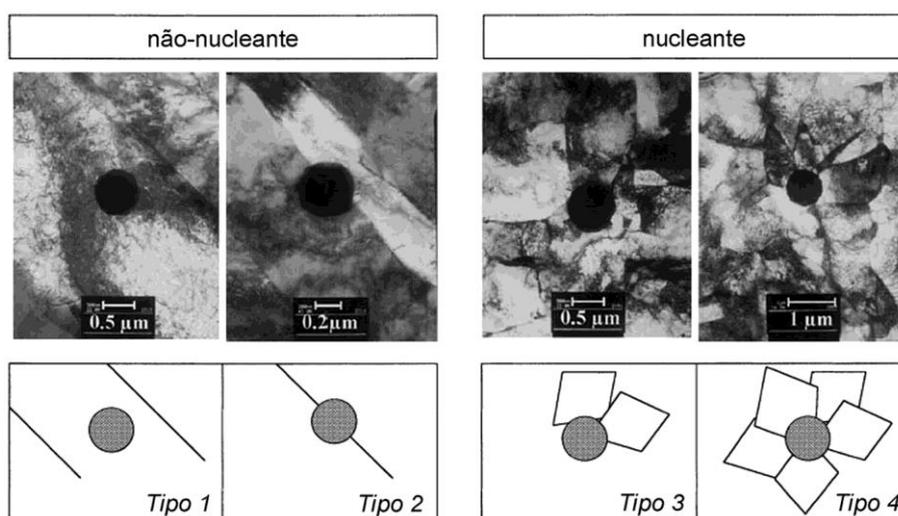
<sup>2</sup> Engenheiro Mecânico, Doutor em Engenharia de Materiais, Professor Adjunto, Departamento de Engenharia Mecânica, UNESP, Ilha Solteira, SP, Brasil.

\* 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 engenharia moderna requer, em escala crescente, soldagens com elevados níveis de resistência mecânica e tenacidade, sem comprometimento do custo, produtividade e confiabilidade do processo de soldagem por arco submerso [1]. A ferrita acicular apresenta-se como um microconstituente capaz de agregar tenacidade a um metal de solda de alta resistência mecânica. Tal comportamento mecânico é derivado da sua típica morfologia de alongados grãos ferríticos emaranhados (ripas), separados entre si por contornos de alto ângulo, com elevada densidade de discordâncias. Bhadeshia [2] destaca que a formação deste microconstituente pode ocorrer de duas formas. A principal baseia-se na nucleação heterogênea das ripas de ferrita acicular sobre inclusões não-metálicas existentes no metal de solda, enquanto que o outro mecanismo de transformação é conhecido como nucleação autocatalítica.

O papel das inclusões sobre a nucleação da ferrita acicular foi analisado por Lee e colaboradores [3], que classificaram as partículas de acordo com o efeito por elas causado. A Figura 1 mostra esquematicamente a classificação proposta, onde quatro tipos de inclusões se dividem em dois grupos. O primeiro grupo foi denominado “não-nucleante” cujas inclusões não tomam parte na formação da ferrita acicular durante a transformação de fase. O tipo 1 compreende a classe de partículas que se encontram no interior dos grãos, não possuindo qualquer interação com os contornos de grão. As partículas do tipo 2 seriam aquelas que teriam uma interface com um contorno de grão, de modo que a partícula fosse apenas compartilhada entre duas agulhas de ferrita. A nucleação heterogênea da ferrita ocorreria de modo radial a partir de um grupo inclusões atuantes na transformação de fase e que são constituídas por partículas dos tipos 3 e 4. As primeiras seriam menos eficientes na nucleação e seriam responsáveis pela formação de um reduzido número de agulhas, pois uma grande parte da interface com a matriz seria pertencente a um único grão. Quando a inclusão é classificada como do tipo 4 há uma grande eficácia da superfície em atuar como substrato para a formação das agulhas de ferrita acicular, de modo que um número maior de agulhas ou ripas de ferrita sejam formadas a partir de uma única inclusão.



**Figura 1.** Classificação das inclusões não-metálicas no metal de solda, de acordo com o poder de nuclear a ferrita acicular [3].

\* 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.

No presente trabalho fez-se a caracterização do papel das inclusões não-metálicas sobre a formação de ferrita acicular em soldas produzidas por arco submerso sob diferentes aportes térmicos. Lâminas finas foram observadas por microscopia eletrônica de transmissão, que possibilitou determinar alguns parâmetros morfológicos e químicos das partículas e a sua relação com a nucleação das ripas de ferrita acicular.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para realização dos ensaios de soldagem usou-se como metal base barras chatas de aço-carbono estrutural do tipo ASTM A36, com as dimensões 400 mm de comprimento, 76 mm de largura e 9,5 mm de espessura. O metal de adição selecionado foi o arame sólido de aço-carbono revestido de cobre, classificação AWS E70 S6, com diâmetro de 1,2 mm. As composições químicas nominais do metal base e metal de adição encontram-se na Tabela 1. O fluxo utilizado na soldagem foi do tipo ativo granulado, correspondente a especificação AWS F7AZ.

**Tabela 1.** Composição química nominal do metal base e do metal de solda utilizados nas soldagens por arco submerso (%peso)

Material	C (max.)	Mn	Si	P (max.)	S (max.)	Cu (max.)
ASTM A36	0,25	0,8 – 1,20	0,15 -0,40	0,04	0,05	0,20
AWS E70S-6	0,15	1,4 – 1,8	1,0	0,02	0,03	0,50

Para a deposição dos cordões de solda (*bead on plate*) foi utilizada uma fonte de soldagem a arco elétrico multiprocesso, cujas especificações técnicas são capacidade nominal de 30kVA, corrente e tensão máximas de 700 ampères e 44 volts, respectivamente, gentilmente cedida pela Servtec Serviços Técnicos Terceirizados Ltda (Ilha Solteira/SP). A velocidade de alimentação do arame de solda foi ajustada em 660 cm.min<sup>-1</sup> e o stick-out foi padronizado em 20 mm. A energia de soldagem  $E$ , expressa em kJ.mm<sup>-1</sup>, foi determinada em cada ensaio por meio da equação (1)

$$E = \frac{60.n.V.I}{1000.v} \quad (1)$$

na qual  $n$  é a eficiência do processo (considerada unitária),  $V$  é a tensão [V],  $I$  é a corrente [A] e  $v$  é a velocidade de soldagem [mm.min<sup>-1</sup>], controlada pelo trator de soldagem. Para este trabalho foram projetadas energias de soldagem nos valores nominais de 1, 2 e 3 kJ.mm<sup>-1</sup>.

Para a preparação de lâminas finas para microscopia eletrônica de transmissão (MET) foram usinados cilindros com 3 mm de diâmetro paralelos à direção de soldagem. Discos finos, com espessuras em torno de 200 µm, foram cortados com uma cortadeira de precisão com disco diamantado e cuidadosamente lixados até atingirem espessuras próximas a 50 µm. A seguir os discos finos foram polidos eletroliticamente no equipamento Struers Tenupol 3, com o propósito de obter áreas finas transparentes ao feixe de elétrons. O eletrólito usado foi uma solução 5% (v/v) ácido perclórico em ácido acético, seguindo-se limpeza em água destilada ou metanol e as melhores condições experimentais para a obtenção das lâminas e secagem após imersão das amostras em acetona. Para preservação das amostras até a sua observação no MET elas foram guardadas sob vácuo, sendo observadas no mínimo 5 amostras de cada condição de soldagem.

\* 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.

As lâminas finas foram observadas no microscópio eletrônico de transmissão Philips CM 120, operado com feixe de elétrons acelerado em 120kV e equipado com microanálise por espectrometria de energia dispersiva dos elétrons (EDS) modelo EDAX DX-4. A orientação cristalográfica entre ripas de ferrita acicular foi analisada por difração de elétrons. A caracterização de inclusões não-metálicas no metal de solda empregou, no mínimo, 150 micrografias distintas para cada condição de soldagem. As imagens foram analisadas com o auxílio do freeware *ImageTool* [4], sendo determinados o diâmetro equivalente  $d$  (Feret), equação (2), e o grau de arredondamento  $\Omega$  (*roundness*) das inclusões, equação (3). Para a análise estatística dos resultados foi adotado um nível de confiança de 95%.

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot \text{área da inclusão}}{\pi}} \quad (2)$$

$$\Omega = \frac{[4 \cdot \pi \cdot (\text{área projetada})]}{[\text{perímetro}]^2} \quad (3)$$

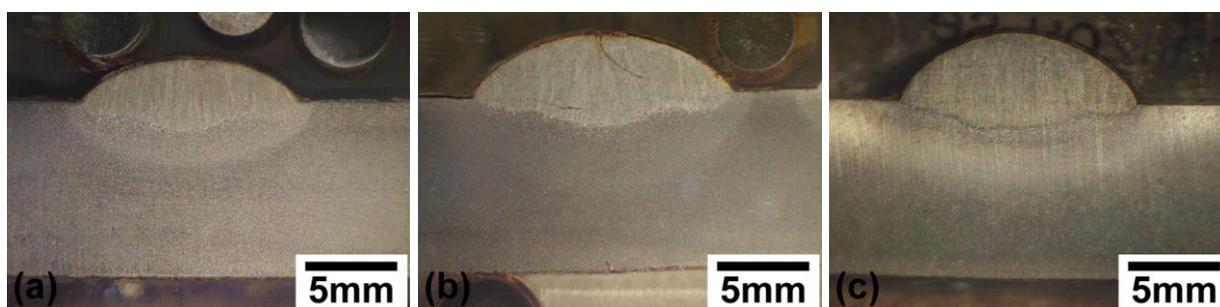
### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Soldagem a Arco Submerso

A Tabela 2 sintetiza os parâmetros obtidos no decorrer dos ensaios de soldagem por arco submerso. A Figura 2 apresenta macrografias típicas dos cordões obtidos, cuja geometria variou pelo efeito da variação da energia de soldagem aplicada. Variações na zona afetada pelo calor (ZAC) também podem ser observadas no metal base. O efeito mais significativo pode ser atribuído à redução, até 62%, na velocidade de soldagem, que tornou a exposição do arco elétrico por mais tempo no cordão. Esta pode ser a principal razão para o aumento da extensão da ZAC na Figura 2(c), considerando que a espessura da chapa e a difusividade térmica são as mesmas em todos os ensaios realizados [5,6].

**Tabela 2.** Parâmetros de soldagem aplicados

V (V)	I (A)	Potência (W)	v (mm.min <sup>-1</sup> )	E (kJ.mm <sup>-1</sup> )
35,9	231,8	8322	500	1,0
35,4	232,5	8230	250	2,0
41,4	227,3	9410	190	3,0



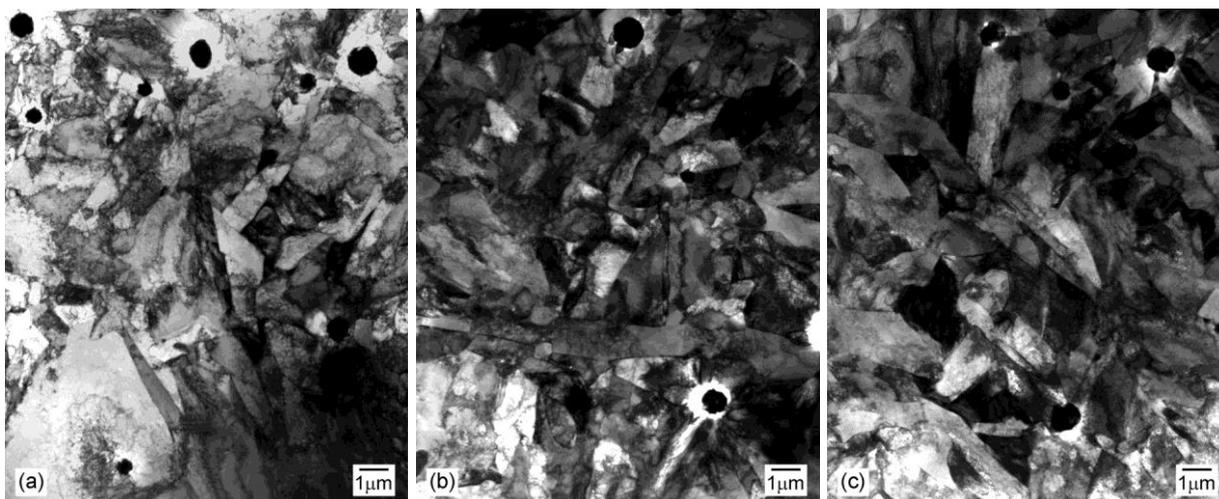
**Figura 2.** Macrografias da seção transversal dos cordões de solda SAW obtidos com diferentes energias de soldagem. (a) 1; (b) 2 e (c) 3 kJ.mm<sup>-1</sup>.

#### 3.2 Microestrutura da Ferrita Acicular

Independentemente da energia utilizada na soldagem, o metal de solda das amostras analisadas por microscopia eletrônica de transmissão mostrou ser

\* 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.

preponderantemente constituído por grãos com morfologia acicular, sendo às vezes observados grãos de ferrita primária com morfologia poligonal e microfases, como mostram as micrografias da Figura 3. As ripas de ferrita acicular apresentam comprimento variável, que pode atingir vários micrometros. A largura das ripas é consideravelmente menor, normalmente da ordem de 1 a 2 micrometros. Grãos de ferrita poligonal foram eventualmente formados sobre os antigos contornos de grão da austenita, que serviram de substrato para a sua nucleação. Inclusões não-metálicas também estavam presentes em todas as amostras, cujos aspectos morfológicos e químicos serão apresentados e discutidos adiante.



**Figura 3.** Micrografias MET em campo claro mostrando regiões típicas do metal de solda. Nota-se a presença de ripas de ferrita acicular, várias das quais nucleadas a partir de inclusões. Energia de soldagem: 1 kJ.mm<sup>-1</sup> (a), 2 kJ.mm<sup>-1</sup> (b) e 3 kJ.mm<sup>-1</sup> (c).

Durante a observação das folhas finas no MET notou-se que havia regiões com ferrita acicular onde não havia a presença de inclusões não-metálicas. Esta observação confirma que a formação da ferrita acicular não depende exclusivamente da presença de partículas que atuam como sítios preferenciais para nucleação, mas que também pode ser formada solidariamente às interfaces austenita-ferrita [7]. Este tipo de nucleação, denominado autocatalítico, contribuiu para incrementar o entrelaçamento das agulhas que é normalmente observado na ferrita acicular e que torna a sua microestrutura bastante complexa [8].

### 3.3 Caracterização Morfológica das Inclusões no Metal de Solda

A observação feita por microscopia eletrônica de transmissão não identificou evidências de contraste por deformação elástica (*strain contrast*) entre as inclusões e a matriz ferrítica, comprovando que não há qualquer correspondência cristalográfica entre elas e que as partículas são incoerentes com a ferrita. A análise de um grande número de micrografias possibilitou realizar um estudo estatístico sobre o tamanho e a morfologia dessas partículas encontradas no metal de solda, bem como determinar a atuação das mesmas com relação à nucleação da ferrita acicular. A Tabela 3 apresenta a variação do tamanho das inclusões com a energia empregada na soldagem.

\* 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.

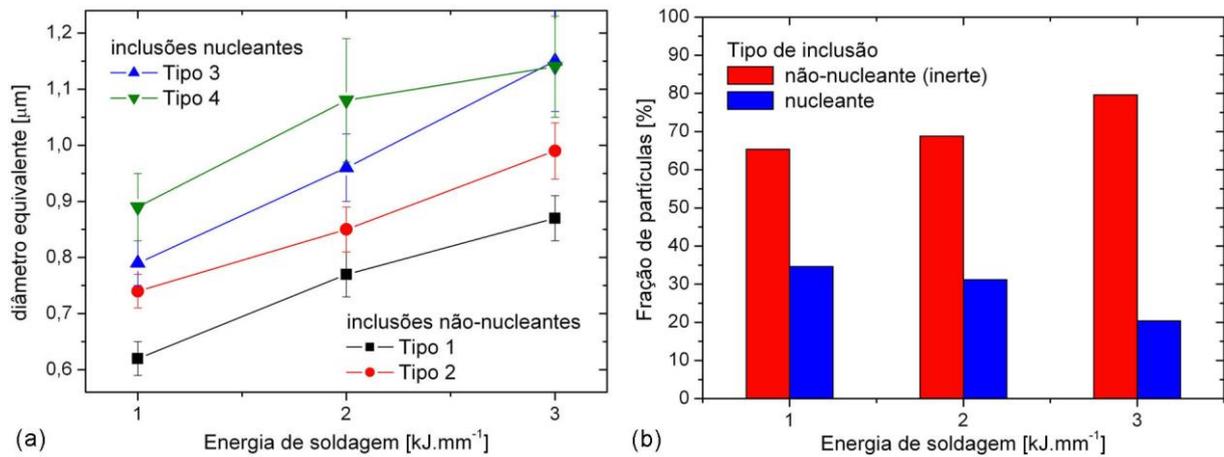
**Tabela 3.** Tamanho das inclusões encontradas no metal de solda

Energia de soldagem (kJ.mm <sup>-1</sup> )	Número de inclusões	Tamanho médio (µm)	Desvio padrão (µm)
1,0	1249	0,73	0,35
2,0	934	0,86	0,40
3,0	840	0,97	0,43

A análise de variância mostrou que as diferenças apresentadas na Tabela 3 são significativas, de maneira que o aumento da energia de soldagem contribuiu efetivamente para o aumento do tamanho médio das inclusões encontradas no metal de solda. Comportamento similar também foi relatado por Grong e Kluken [9] para inclusões com tamanho submicrométrico. Considerando que a deposição dos cordões de solda foi feita em chapas semelhantes e consultando a Tabela 2 nota-se que a variação da energia de 1 para 2 kJ.mm<sup>-1</sup> foi provocada principalmente pela redução da velocidade de soldagem (de 500 para 250 mm.min<sup>-1</sup>), sem grandes alterações na potência elétrica. Isto significou que a linha de solidificação avançou mais lentamente com 2 kJ.mm<sup>-1</sup>, favorecendo a interação química entre os elementos formadores da inclusão e o seu conseqüente crescimento. O mesmo raciocínio poderia ser aplicado no metal de solda depositado com 3 kJ.mm<sup>-1</sup>, onde a velocidade de soldagem foi reduzida ainda mais (190 mm.min<sup>-1</sup>) e a potência elétrica foi incrementada – tornando ainda mais favorável o crescimento das partículas na poça de fusão.

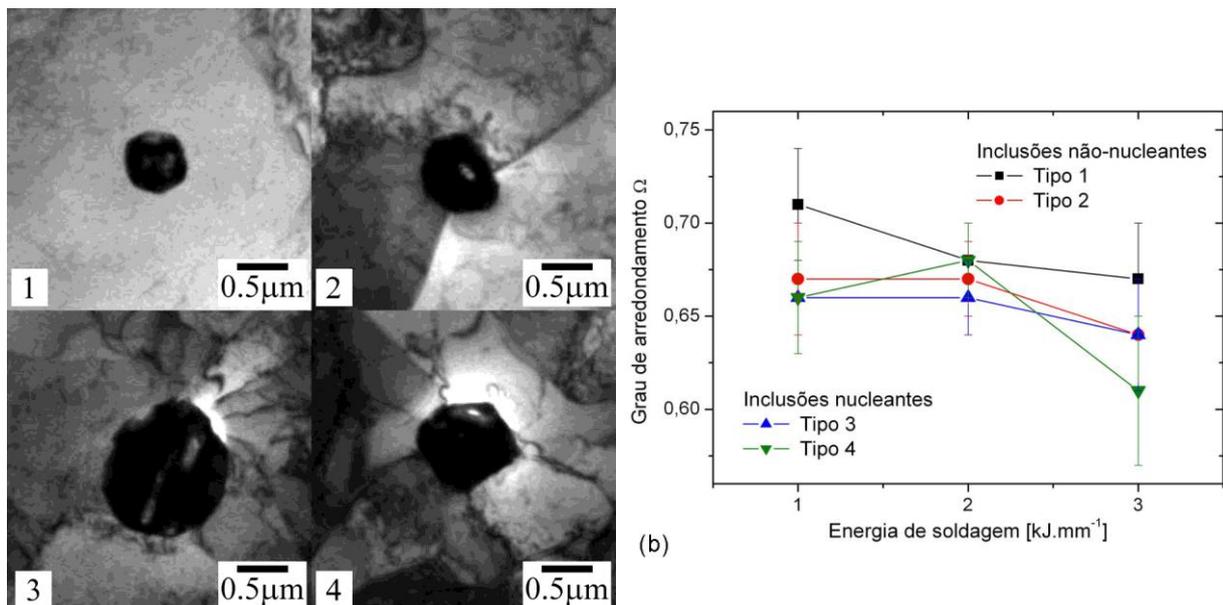
As micrografias MET tiradas do metal de solda também permitiram avaliar o papel das partículas no tocante à nucleação da ferrita acicular, seguindo-se para tanto a classificação proposta por Lee e colegas [3] que foi descrita no item anterior. Com auxílio do *ImageTool* [4] foi determinados o tamanho (diâmetro Feret, equação 2) médio das inclusões não-nucleantes (tipos 1 e 2) e nucleantes (tipos 3 e 4), como mostram graficamente a Figura 4(a) onde a dispersão está representada pelo erro padrão com nível de significância de 95%. Verifica-se que o aumento do poder de nucleação foi acompanhado de um incremento no tamanho das inclusões e que este comportamento foi também afetado pela energia de soldagem. A Figura 4(b) mostra que houve um expressivo aumento na proporção de inclusões inertes à nucleação da ferrita acicular (tipos 1 e 2) com o aumento da energia de soldagem, que atingiu 80% com a aplicação de 3 kJ.mm<sup>-1</sup>. Apesar de sempre estarem em menor número, o papel da fração de inclusões com efeito nucleante (tipos 3 e 4) foi decisivo para a obtenção de uma elevada fração volumétrica de ferrita acicular, cujo efeito foi complementado pela ocorrência da nucleação autocatalítica. A constatação que inclusões muito pequenas são menos eficazes como sítios de nucleação para a ferrita acicular também foi relatada em outros trabalhos [3,8,9].

\* 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.** Variação do tamanho (a) e da fração nucleante/não-nucleante (b) das inclusões com a energia de soldagem aplicada ao metal de solda.

O efeito da morfologia das inclusões sobre poder nucleante foi investigado. Para tanto foram analisadas 50 partículas de cada tipo (nucleantes e não-nucleantes), totalizando 200 inclusões para cada condição de soldagem. Após a digitalização das imagens, como os exemplos mostrados na Figura 5(a), e com o auxílio do *ImageTool* [4] determinou-se o grau de arredondamento  $\Omega$  das partículas, definido pela equação (3). Nota-se que a periferia das inclusões não é regular e este fator de forma permite quantificar esta irregularidade, como mostra a Figura 5(b). Nela a dispersão está representada pelo erro padrão, com nível de significância de 95%.

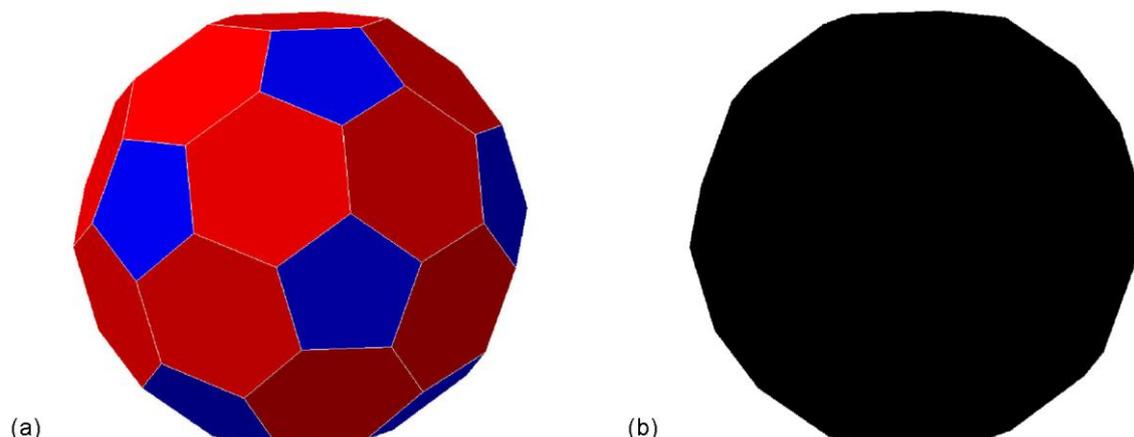


**Figura 5.** Exemplos de inclusões não nucleantes (tipos 1 e 2) e nucleantes (tipos 3 e 4) encontradas no metal de solda produzido com 3 kJ.mm<sup>-1</sup> em (a). Variação do grau de arredondamento para cada tipo de partícula com a energia de soldagem aplicada ao metal de solda em (b).

Observando-se a Figura 5 verifica-se que há uma tendência à redução do grau de arredondamento com o aumento da energia de soldagem. No aspecto qualitativo as inclusões mais eficientes para a nucleação de várias ripas de ferrita acicular (tipo 4) apresentam uma superfície mais irregular, ou seja, menores valores de  $\Omega$ . No entanto, as variações morfológicas (dispersão) aumentam com o aporte de energia para soldagem, afastando-se significativamente de um formato globular perfeito ( $\Omega = 1$ ) [10]. Considerando que as inclusões tenham uma geometria

\* 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.

poliédrica regular, pode-se comparar a imagem projetada de alguns poliedros com as imagens das inclusões obtidas na caracterização por MET. Através do aplicativo específico para geração de poliedros *Poly 1.12* [11] foram criados alguns poliedros associados a morfologia de partículas, como o dodecaedro e o icosaedro truncado [12]. Este último poliedro possui 32 faces, Figura 6, e um grau de arredondamento  $\Omega$  médio correspondente a 0,67 – um valor encontrado tanto para partículas nucleantes como inertes.



**Figura 6.** Associação de poliedros regulares como o icosaedro truncado em (a) com sua respectiva imagem projetada em (b). Compare com os exemplos das inclusões mostradas na Figura 5.

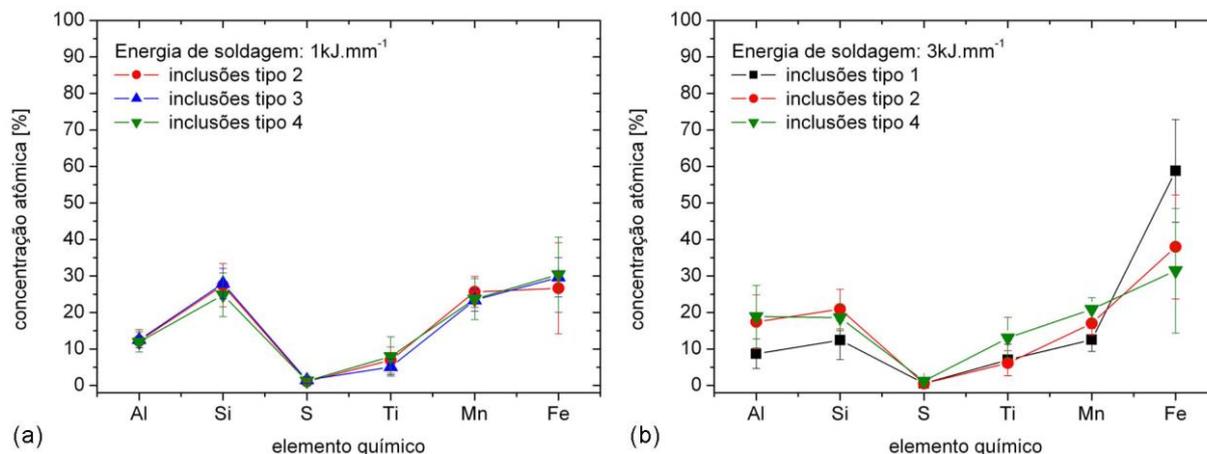
Investigando o efeito das inclusões sobre a nucleação da ferrita acicular por microscopia eletrônica de transmissão, Grong e colaboradores [13] sugeriram que partículas com estrutura cristalina cúbica e com o formato facetado seriam muito favoráveis à nucleação da transformação de fase. Tal comportamento foi relacionado com o fato que as faces do poliedro seriam praticamente paralelos à planos cristalográficos de baixos índices, tornando bastante provável uma orientação cristalográfica favorável – como Kurdjumov-Sachs, por exemplo. Além da orientação favorável é importante que o desajuste cristalográfico entre a inclusão e a ferrita seja minimizado. Entretanto, as inclusões encontradas no metal de solda raramente são “puras” nos aspectos químico e cristalino [14-16], reduzindo significativamente a probabilidade da nucleação das ripas de ferrita acicular a partir da superfície da partícula [13]. Isto sugere que a eficiência de uma inclusão para a nucleação da ferrita acicular não dependa apenas do seu tamanho e forma, mas também de sua composição química.

### 3.4 Análise Química das Inclusões no Metal de Solda

A Figura 7 mostra a variação da composição química das inclusões em função do seu poder de nucleação da ferrita acicular e da energia de soldagem empregada no metal de solda. A aplicação da menor energia de soldagem implicou na obtenção de partículas nas quais as variações de composição química foram menores, independentemente da inclusão ser ou não nucleante da ferrita acicular. Neste caso a morfologia e o tamanho das partículas podem ser os fatores determinantes para a nucleação da ferrita acicular. O aumento da energia de soldagem favoreceu a heterogeneidade química das inclusões, como mostra a Figura 7(b), de modo que as partículas com tendência nucleante (tipo 4) apresentassem maiores teores de titânio e manganês. Lembrando que os consumíveis e o metal base que foram utilizados nos experimentos eram os mesmos, é provável que estas partículas tenham

\* 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.

causado o fenômeno *Manganese Depleted Zone* (MDZ) descrito por Byun e colaboradores [17], no qual partículas ricas em titânio empobrecem a matriz circunvizinha de manganês e favorecem a nucleação da ferrita acicular.



**Figura 7.** Variação da composição química (%at) entre os diversos tipos de inclusões com a energia de soldagem aplicada. (a) 1 kJ.mm<sup>-1</sup>; (b) 3 kJ.mm<sup>-1</sup>.

A mudança da energia na soldagem afetou a proporção entre os elementos químicos encontrados nas partículas. Embora não haja diferença expressiva entre as inclusões nucleantes e não-nucleantes quando a solda foi feita com 1 kJ.mm<sup>-1</sup> as razões atômicas Mn:Si e Mn:Al se aproximaram de 1 e 2, respectivamente, sugerindo a formação de compostos estequiométricos como o MnSiO<sub>3</sub> [17] e o AlMn<sub>2</sub>O<sub>4</sub> [16]. A razão Mn:Ti para a mesma condição de soldagem aproximou-se de 3,9 para as partículas nucleantes da ferrita acicular, mas este valor caiu para 1,6 quando na soldagem foi aplicado um aporte de 3 kJ.mm<sup>-1</sup>. A razão Mn:Si manteve-se praticamente inalterada com a mudança dos parâmetros de soldagem, sendo a razão Mn:Al reduzida quase pela metade com o aumento no insumo de calor. Do exposto fica evidente que a presença do titânio na composição química das inclusões é fundamental para que as mesmas possam ter um efeito significativo sobre a nucleação da ferrita acicular.

## 4 CONCLUSÕES

A análise dos resultados experimentais apresentados neste trabalho possibilitou concluir que a nucleação da ferrita acicular sobre inclusões não-metálicas é um fenômeno complexo, que ocorre com maior frequência quando as partículas apresentam morfologia mais irregular e são de maior tamanho. A formação dessas partículas pode ser favorecida com o aumento da energia de soldagem aplicada ao metal de solda. A morfologia das inclusões se assemelha estatisticamente ao icosaedro truncado, um poliedro regular com 32 faces. A eficiência das partículas para a nucleação da ferrita acicular mostrou depender da presença de titânio em sua composição química, sendo mais significativo este efeito com o aumento da energia de soldagem. A formação de ferrita acicular também ocorreu em regiões isentas de inclusões, onde foi proeminente a nucleação autocatalítica.

## Agradecimentos

Os autores agradecem ao Laboratório de Caracterização Estrutural do DEMa/UFSCar pela utilização de equipamentos para caracterização microestrutural e ao

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

apoio financeiro concedido pelo CNPq e FAPESP para o desenvolvimento deste trabalho.

## REFERÊNCIAS

- 1 Marques PV, Modenesi PJ, Bracarense AQ. Soldagem – Fundamentos e Tecnologia. Editora UFMG, Belo Horizonte, pp. 263-275, 2005.
- 2 Bhadeshia HKDH. Modelling of phase transformations in steel weld metal. Proceedings of Environment Concious Innovative Materials Processing, Kyoto. High Temperature Society of Japan, pp. 35-44, 1998.
- 3 Lee T-K, Kim HJ, Kang BY, Hwang SK. Effect of inclusion size on the nucleation of acicular ferrite in welds. ISIJ International, 2000; 40(12): 1260-1268.
- 4 UTHSCSA ImageTool 3. [acesso em 10.jan.2014]. Freeware disponível em <http://compdent.uthscsa.edu/dig/itdesc.html>
- 5 Basu B, Raman R. Microstructural variations in a high-strength structural steel weld under isoheat input conditions. Welding Journal, November, pp. 239-248, 2002.
- 6 Gunaraj V, Murugan N. Prediction of heat-affected zone characteristics in submerged arc welding of structural steel pipes. Welding Journal, January, pp. 94-102, 2002.
- 7 Aaronsson HI. Sympathetic nucleation: an overview. Materials Science and Engineering B, 1995; 32: 107-123.
- 8 Ricks RA, Howell PR, Barrite GS. The nature of acicular ferrite in HSLA steel weld metals. Journal of Materials Science, 1982; 17: 732-740.
- 9 Grong O, Kluken AO. Microstructure and properties of steel weld metals. Key Engineering Materials, 1992; 69-70: 21-45.
- 10 Russ JC. Practical Stereology. Plenum Press, New York, 1986, pp. 103-120.
- 11 POLY 1.12: Aplicativo para geração de poliedros. [acesso em 16.jan.2014]. Versão executável para demonstração disponível em <http://peda.com/download/> .
- 12 Underwood EE. Quantitative Stereology: Particle and Grain Characteristics. Addison-Wesley Publishing Company, Reading, 1970, pp. 80-108.
- 13 Grong O, Kluken AO, Nylund HK, Dons AL, Hjelen J. Catalyst effects in heterogeneous nucleation of acicular ferrite. Metallurgical and Materials Transactions A, 1995; 26A (3): 525-534.
- 14 Abson DJ. Non-metallic inclusions in ferritic steel weld metals – a review. Welding in the World, 1989; 27, (3/4): 76-101.
- 15 St-Laurent S, L'Espérance G. Effects of chemistry, density and size distribution of inclusions on the nucleation of acicular ferrite of C-Mn steel shielded-metal-arc-welding weldments. Materials Science and Engineering A, 1992; A149: 203-216.
- 16 Dowling JM, Corbett JM, Kerr HW. Inclusion phases and the nucleation of acicular ferrite in submerged arc welds in high strength low alloy steels. Metallurgical Transactions A, 1986; 17A: 1611-1623.
- 17 Byun J-S, Shim J-H, Cho YM, Lee DN. Non-metallic inclusion and intragranular nucleation of ferrite in Ti-killed C-Mn steel. Acta Materialia, 2003; 51: 1593-1606.

---

\* 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.