

# Os efeitos da presença do campo magnético externo, no arco plasmático, sobre a microestrutura da poça de fusão do aço AISI 304L soldado no processo de soldagem TIG.

\*

*Anderson Vergílio de Queiroz<sup>1</sup>  
Marcio Teodoro Fernandes<sup>2</sup>  
Leonardo Martins da Silva<sup>3</sup>  
Izabel de Oliveira da Mota<sup>4</sup>  
Elizabeth M. Oliveira<sup>5</sup>  
José Adilson de Castro<sup>6</sup>*

## Resumo

Os aços AISI 304L são aços inoxidáveis, para alcançar suas excelentes propriedades mecânicas e de resistência à corrosão necessitam de um rígido controle sobre sua microestrutura. Buscando contribuir na investigação de parâmetros adequados para a soldagem destes aços, o presente estudo tem como objetivo avaliar a influência do campo magnético externo sobre tais transformações por meio da avaliação da microestrutural final de juntas soldadas. Para isto 2 chapas do aço AISI 304L foram soldadas via processo TIG, onde duas soldagens teve a presença de campo magnético externo e uma solda sem a presença do campo magnético externo. Após a soldagem, a microestrutura das juntas foi caracterizada via microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura e os resultados mostraram que a presença do campo magnético externo produziu arco plasmático e poça de fusão estreita e alongada, diminuição da ZTA, refinou a microestrutura da ZF e com imagens térmicas, via máquina FLIR, pode-se observar o formato do arco plasmático, dimensionar o arco e a poça de fusão e comparar a temperatura com a do termopar. Permitiu observar que a soldagem com campo magnético externo permitiu uma menor ZTA, refinamento dos grãos e poça de fusão estreita e profunda.

**Palavras-chave:** Soldagem; Aço AISI 304L; Microestrutura.

**The effects of the presence of the external magnetic field in the plasma arc on the microstructure of the weld pool of AISI 304L welded steel in the TIG welding process.**

## Abstract

The AISI 304L steel is stainless steel, in order to achieve its excellent mechanical properties and resistance to corrosion, it requires a rigid control about its microstructure, especially on two aspects: ferrite / austenite ratio and precipitation of deleterious phases. The metallurgical transformations that occur during the welding thermal cycle can modify these aspects and, consequently, cause serious degradation of the properties of these materials. Finding to contribute to the investigation of suitable parameters for the welding of these steels, the present study has to evaluate the influence of the external magnetic field on such transformations through the evaluation of the final microstructural weld joints. For this, two plates of the AISI 304L steel were welded through the TIG process, where a welding had the presence of external magnetic field and a weld without the presence of the external

magnetic field. After welding, the microstructure of the joints was characterized by optical microscopy and scanning electron microscopy and the results showed that the presence of the external magnetic field produced a plasma arc and a narrow and elongated fusion well, a decrease in HAZ, refined FZ microstructure and with thermal imaging, via the FLIR machine, one can observe the format of the plasma arc, size the arc and the melting pool and compare the temperature with that of the thermocouple. Has observed that the welding with the external magnetic field had a lower HAZ, grain refinement and narrow and deep weld pool

**Keywords:** Weld; AISI 304L; Steel,microstructure.

- 1 *Doutorando em Engenharia Metalúrgica, Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda, Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda, Brasil.*
- 2 *Doutorando em Engenharia Metalúrgica, Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda, Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda, Brasil.*
- 3 *Pós-Doutorando em Engenharia Metalúrgica, Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda, Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda, Brasil.*
- 4 *Professora Doutora no Centro Universitário de Volta Redonda-UniFoa, Volta Redonda, Brasil.*
- 5 *Professora Doutora Elizabeth M. Oliveira, Centro Federal de Educação Tecnológica, Angra dos Reis, Brasil*
- 6 *Ph.D, Professor Adjunto, Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda, Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda, Brasil.*

## 1 INTRODUÇÃO

Os aços inoxidáveis bifásicos (ferrítico/austenítico), também conhecidos de forma geral como “aços duplex”, são basicamente ligas Fe-Cr-Ni com adições de outros elementos que ou atuam em conjunto com o Cr na estabilização da ferrita ou atuam juntamente com o Ni na estabilização da austenita. Na maior parte destas aplicações, estes aços passam por processos de soldagem onde são expostos a ciclos térmicos que podem alterar significativamente sua microestrutura e leva-los a perdas significativas em suas propriedades. Neste caso, dois aspectos microestruturais são extremamente importantes: manter a relação manter a relação ferrita-austenita adequada e inibir a precipitação de fases secundárias. Os aços austeníticos são muitos usados nas indústrias nucleares, petroquímicas, estruturas interiores e nas indústrias médicas. Para união de partes industriais a soldagem é muito importantes no processo de união e produção de manufaturas. Portanto é muito usado a soldagem pelo processo de fusão a gás. Ao longo dos últimos anos foram estudado a soldagem com variação do calor aplicado, onde foi permitido avaliar a geometria da poça de fusão e da zona termicamente afetada, efeito da temperatura, mudança de fase na microestrutura, esses estudos foram realizado com Demarque e colaboradores 2017, Queiroz e colaboradores 2017e Ronqueti 2014. Havia a necessidade do estudo de soldagem com adicional do campo magnético externo, estudo que permitisse solda com a poça de fusão profunda e estreita, estrutura dendrítica refinada, variação das dimenssões decrescente da zona termicamente afetada, além dos estudos do arco plasmático. Neste trabalho foi utilizado o processo de soldagem TIG com adição do campo magnético ferrite externo paralelo ao aço 304L a ser soldada, arco plasmático e eletrodo, com campo magnético de neodímio externo paralelos e com o arco plasmático entre eles e soldagem com ausência do campo magnético externo. Foi produzido um suporte, fixo no bocal do eletrodo, para adaptar os pares de imã (em repulsão) de neodímio com 0,5 T, permitindo que o arco plasmático sofra ação do campo magnético externo. Foi observado o estreitamento e alongamento do arco plasmático e da zona de fusão (ZF) conforme Bachmann e colaboradores 2016 e o estreitamento da zona termicamente afetada (ZTA). O diferencial deste trabalho com o do Bachmann e colaboradores 2016 é: A análise via imagem térmica da Máquina Flir, essas imagens permite analisar a variação no formato do arco plasmático e da poça de fusão, comparar a temperatura através da máquina com a apresentada através de dois termopares sob a chapa soldada; o espaçamento dendrítico versus a taxa de resfriamento e espaçamento dendrítico versus a velocidade da isotérma líquidus, onde houve o refinamento dos grãos com a variação crescente da taxa de resfriamento e da velocidade da isotérma líquidus; foi definido a dendrita da ferrita  $\delta$  e a matriz austenita ; o dimensionamento da zona de fusão; análise química via EDS da dendrita ferrita  $\delta$  e da matriz austenita. As análise feitas no presente trabalho foi comparando a soldagem com presença do campo magnético externo, dois pares de imã de neodímio com 0,5T e soldagem com ausência do campo magnético externo 0T. Sendo assim tem o objetivo de avaliar a importância do campo magnético externo no processo de soldagem.

## 2 Materiais e métodos

O material que será utilizado no processo de soldagem é a chapa de aço inoxidável austenítico AISI 304L. A Tabela 1 apresenta análise química da chapa analisada.

O material, após fabricação, foi submetido ao tratamento térmico adequado de solubilização para dissolver precipitados formados durante o processo de solidificação. Porém, os fornecedores dos materiais não informaram a temperatura e os tempos de solubilização.

**Tabela 1** – Composição química (% em peso) dos aços inoxidáveis AISI 304L.

| AISI | C      | Mn   | Si    | P      | S      | Cr    | Ni   | Mo     | Cu     | N      |
|------|--------|------|-------|--------|--------|-------|------|--------|--------|--------|
| 304L | 0,0166 | 1,17 | 0,486 | 0,0431 | 0,0029 | 18,42 | 8,08 | 0,0031 | 0,0312 | 0,0623 |

Após o corte das amostras, as mesmas foram lixadas em lixadeiras manuais com lixa de carbetto de silício com as seguintes granulometrias: 100, 220, 320, 400, 600, 800, 1200, 2500 e 4000 mesh. Em seguida foi realizado o polimento mecânico das amostras em politrizes manuais utilizando como abrasivo pastas de diamantes de granulometria 3 e 1  $\mu\text{m}$  e, então, as amostras foram atacadas por imersão (Ronqueti 2014, Demarque e colaboradores 2017 e Queiroz e colaboradores 2017), no reagente Behara. Que possibilitou realizar as análises para os resultados.

Com o intuito de buscar inovação tecnológica, na Figura 1, foram adicionados dois ímãs ferríte, par de ímãs de neodímio em repulsão, com campos magnéticos de 0,8T, na forma paralelos e a fabricação de um suporte, com a distância, entre, do campo magnético a peça a ser soldada regulável, adicionado ao bocal, de forma que o arco plasmático fique entre os ímãs, na peça, semelhante a soldagem na Figura 1, a ser soldada com objetivo de aumentar o campo magnético no entorno do arco plasmático, alterar a geometria do plasma e a geometria do cordão de solda.

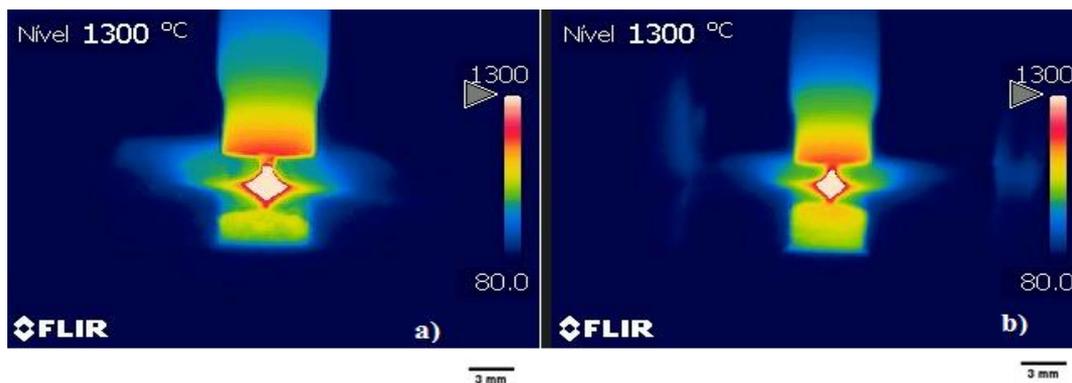


**Figura 1-** a) suporte para adição do campo magnético.

Nas chapas foram introduzidos termo pares para registro da temperatura na poça de fusão durante o processo de soldagem e para registrar a temperatura e o formato do arco plasmático foram retiradas fotos com a máquina infravermelho Flir. O formato da ZTA foram retirados através das imagens microscópio ópticos juntamente com software Imagem J. Foram retiradas diversas imagens através da máquina Flir e do microscópio óptico e a partir possibilitou-se realizar o presente trabalho.

### 3 Resultados e Discussão

Na Figura 2 é observada claramente a distribuição da temperatura no cordão de solda durante o processo de soldagem sob o efeito do campo magnético externo. Neste caso, a Fig 2 a) com ausência do campo magnético externo apresenta o formato do arco plasmático e mais horizontal, gerando o cordão de solda mais horizontal a abaixo do furo de entrada, Na Fig 2 b) o arco plasmático é mais vertical, originando o cordão de solda mais profundo devido a presença do campo magnético externo. Podemos observar que a distribuição de temperatura contribui para o formato regular e para o refinamento dos grãos. A parte superior, do cordão de solda, apresenta maior temperatura e o metal líquido flui para a região de fronteira da solda, com menor temperatura, originando o formato e a geometria do cordão de solda. O campo magnético externo comprime o arco plasmático, através das forças magnéticas radiais ou força de Lorentz, tornando o arco plasmático mais estreito produzindo a poça de fusão mais estreita e profunda conforme Bachmann e colaboradores, 2016. Pode-se observar que a temperatura máxima é de  $1300^{\circ}\text{C}$  e no interior do arco plasmático a temperatura é superior. Segundo Bachmann e colaboradores 2016 a região próxima do anodo no arco plasmático é a que possui menor temperatura e a próxima ao catodo é que possui maior temperatura. Na Figura 2 b), com a presença do campo magnético externo, apresenta maior temperatura no interior da poça de fusão em relação a Figura 2 a).



**Figura 2.** Distribuição da temperatura a) sem a presença do campo magnético e b) com a presença do campo magnético.

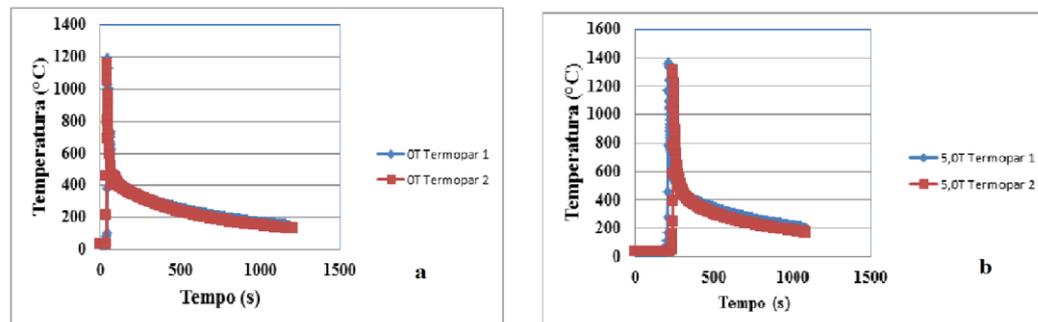
As variações geométricas mensuradas através do programa, Image J, estão apresentadas na Tabela 2, a adição do campo magnético externo no processo de soldagem, houve estreitamentos no arco plasmático, na poça de fusão e maior penetração da poça de fusão no material.

**Tabela 2 - Estatística do Arco Plasmático**

| Arco Plasmático                                      | Sem Campo Magnético Externo $B = 0\text{T}$ | Com Campo Magnético Externo $B = 0,5\text{T}$ |
|--|---|---|
| Largura (mm)   | 2,85  | 2,77  |
| Comprimento (mm)                                     | 0,90  | 0,97  |
| Área ( $\text{mm}^2$ ) $T \geq 1300^{\circ}\text{C}$ | 3,7   | 3,5   |

Conforme Almeida e colaboradores 2015, geralmente os parâmetros geométricos são obtidos por ajustes a ciclos térmicos experimentais que dificilmente se repetirão de forma exata em processos posteriores, mesmo sendo estes realizados com os mesmos parâmetros de processo, justamente devido à interação arco-atmosfera e arco-material que pode ser diferente causando alguma variação na geometria da fonte. No entanto os resultados apresentados na Figura 3 para os ciclos térmicos medidos e calculados com

diferentes campos magnéticos externos no aço AISI 304L mostram que variações significativas nos parâmetros causam um relativo deslocamento na temperatura de pico, 1200 °C para soldagem com ausência do campo magnético externo e 1400°C para a soldagem com presença do campo magnético externo e mantém alteração muito suave na taxa de resfriamento.



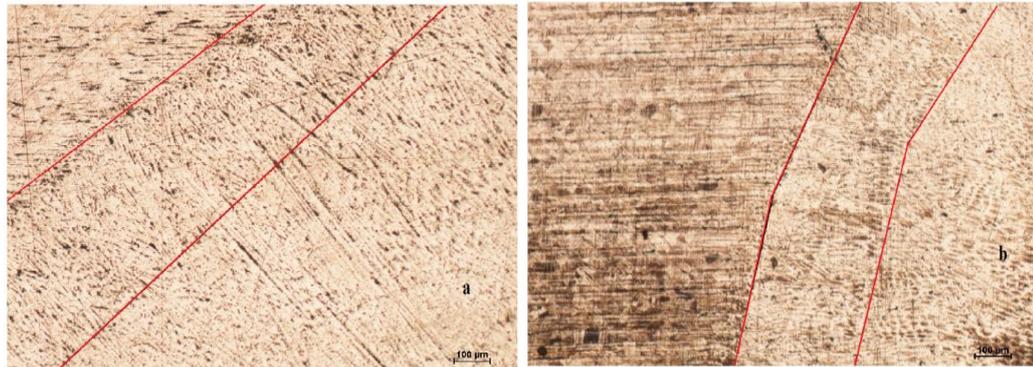
**Figura 3.** Curva de Temperatura; a) soldagem com  $B = 0T$  e b) soldagem com  $B = 0,5T$ .

Para avaliar a influência do processo de soldagem, nas geometrias e dimensões do cordão de solda do aço AISI 304L, a Tabela 3 mostra as comparações entre as macrografias das secções transversais dos cordões de solda. Assim como Backman e colaboradores 2016 e como vimos anteriormente nas imagens infravermelho, através da máquina FLir as soldas com adição do campo magnético externo apresentam a geometria ZF mais estreita e com maior profundidade em relação às soldas sem a adição do campo magnético externo conforme a Tabela 3, porque o campo magnético externo apresenta maior interação da força de Lorentz na região inferior do cordão de solda.

**Tabela 3** - Dimensões dos cordões de solda, sem o campo magnético externo e com o campo magnético externo.

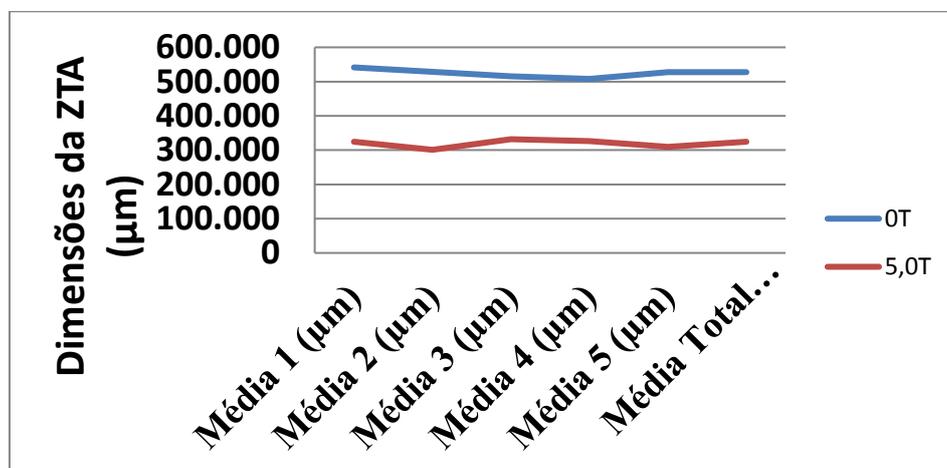
| CP's Soldagem       | Faixa do Aporte térmico (KJ/mm) | Largura (mm) | Penetração (mm) |
|---------------------|---------------------------------|--------------|-----------------|
| 0 T                 | 1,05-1,09                       | 829,78       | 254,89          |
| 0,5 T<br>(Neodímio) | 1,09-1,11                       | 542,41       | 389,44          |

Ronqueti, L.A. 2014 em seu trabalho exhibe micrografias da ZTA do AISI 304L soldado com diferentes aportes térmicos utilizando transferência metálica por curto-circuito (N). Onde é possível observar que para valores crescentes de aporte térmico, cresce a extensão da ZTA, o tamanho de grão austenítico e a fração volumétrica de ferrita  $\delta$ . Isto acontece em função da taxa de resfriamento, que diminui para valores crescentes de aporte térmico. Diferentemente no presente, Figura 4 e dimensionado na Figura 5, ocorre o estreitamento da ZTA em valores crescentes do campo magnético externo, devido a Força de Lorentz, que é a força responsável pela profundidade da poça de fusão. Além das dimensões da ZTA, ocorre alteração na taxa de resfriamento, ou seja, ocorre a maior taxa de resfriamento para a variação crescente do campo magnético externo.



**Figura 4.** Variação da ZTA com variação do campo magnético externo. a) 0T e b) 0,5T.

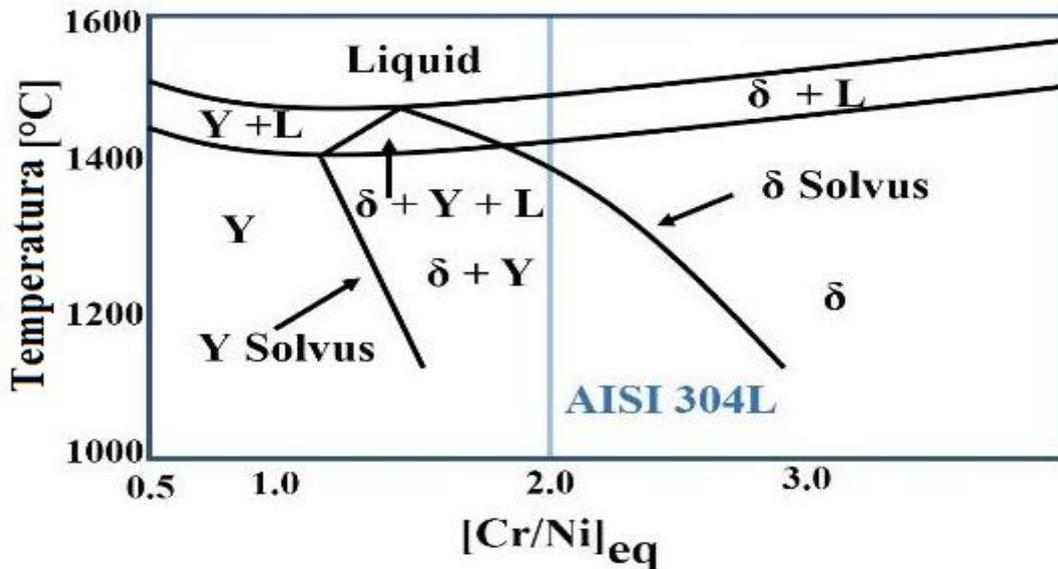
Para a Figura 5 apresenta o dimensionamento da ZTA, foram retiradas 5 médias de extensão (largura) da ZTA, devido a irregularidade dessas dimensões, posteriormente foi retirada a média final dessas médias, permitiu quantificar a diminuição da ZTA, em valores crescente do campo magnético externo.



**Figura 5.** Variação do ZTA versus campo magnético externo.

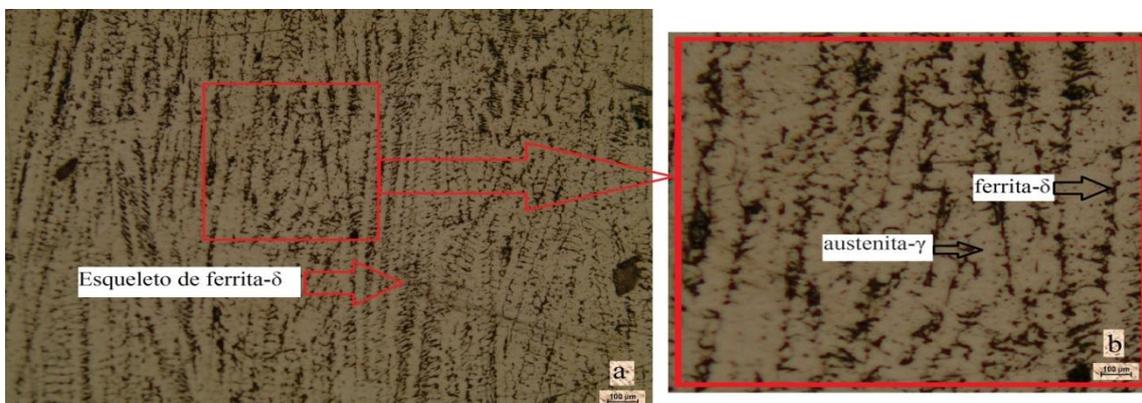
A discussão de resultados nesta sessão são para caracterizar a fração  $[Cr/Ni]_{eq}$  e a taxa de resfriamento. O cálculo da fração  $[Cr/Ni]$  (AISI304L) é 2,05, que pode ser visto no diagrama pseudo binário conforme Queiroz e colaboradores 2017 e Ronqueti 2014. O cálculo, da razão da composição química para o material, garante que o presente material tem fração volumétrica de ferrita  $\delta$  na matriz austenita, um importante fator é a taxa de resfriamento que influencia na quantidade do volume de ferrita  $\delta$  e menor espaçamento dendrítico.

A solidificação do material ocorre conforme a reação  $L_{liq} \rightarrow L + \delta \rightarrow \delta + \gamma$ , na Figura 6, podendo ser observado no diagrama pseudo binário. Como este aço passa lentamente no campo monofásico de ferrite  $\delta$ , menor é a taxa de resfriamento, sendo assim, o material permanecerá por mais tempo no campo e maior será a fração de ferrita  $\delta$  na matriz austenita. O aumento da quantidade de calor origina o crescimento de grãos austenítico e ocorrerá menor taxa de resfriamento. Na Figura 6 pode-se observar a máxima temperatura de 1600° C, região líquida,  $L + \delta$  apresenta a formação da ferrita  $\delta$ , fase  $\delta$  responsável pela solidificação sobre a influência do Cr e Ni. Yazdian e colaboradores 2018 afirmam que o equivalente de Cr e equivalente de Ni são especificações da composição química na base do metal e fios de enchimento.



**Figura 6.** Diagrama pseudo-binário do sistema Fe[Cr-Ni]<sub>eq</sub> na linha azul referente a razão [Cr/Ni]<sub>eq</sub> para o AISI 304L.

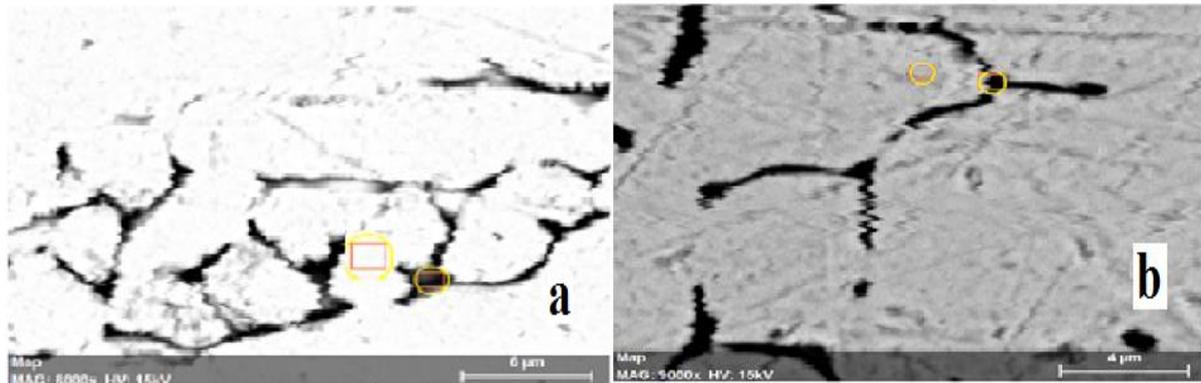
Conforme Yazdian e colaboradores 2018, a solidificação da solda inicia com a formação da fase ferrita  $\delta$ , essa formação pode ser vista no diagrama pseudo binário. A Figura 7 apresenta a solidificação microestrutural típica. Pode-se observar que a microestrutura é composta por dendritas colunares de ferrita  $\delta$  crescendo no modo epitaxial a partir da interface de fusão para o centro, a sua ponta é oposta a direção de transferência de calor. Na Figura 7 (b) pode-se observar que as dendritas de ferrita  $\delta$  são distribuídas uniformemente incidindo na matriz austenita.



**Figura 7.** Microestrutura da ZF; a) zona de fusão com ramificações de ferrita  $\delta$ ; b) composição da microestrutura.

Diferentemente de Yazdian e colaboradores 2018 a soldagem com campo magnético externo  $B = 0T$ , dentro da dendrita de ferrita  $\delta$  a porcentagem de massa, na Tabela 4, do Cr (16,54) foi ligeiramente maior que na matriz austenita (15,80) na Figura 8. Pelo contrário os resultados opostos foram encontrados para a distribuição de Ni através da região dendrítica. Além disso, para observar a transição de Cr, o elemento de liga substancial para melhoras resistência a corrosão, a linha de varredura EDS foi feita através do núcleo da dendrita de ferrita  $\delta$  em direção a austenita. A transição gradual de Cr da fase da ferrita  $\delta$  para a austenita não apresentou separação significativa. Na soldagem com campo magnético externo  $B = 0,5T$ , dentro da dendrita de ferrita  $\delta$  a porcentagem de massa, na Tabela 4, do Cr (15,27) foi ligeiramente menor que na matriz austenita (15,44). Pelo contrário os resultados opostos foram encontrados para a distribuição de Ni através da região dendrítica. Esses resultados para  $B = 0,5T$  contrário ao  $B = 0T$  se dá devido a presença do campo

magnético externo, na fusão do material, durante o processo de soldagem, ou seja, provavelmente pelo Cr ser um elemento paramagnético e precisa ter uma alta intensidade magnética para manter suas direções alinhadas. O efeito do campo magnético durante o processo de soldagem, na amostra soldada com campo magnético externo apresenta maior quantidade de Ni, na fase de ferrita  $\delta$ , em comparação a soldagem com 0T.



**Figura 8.** Análise química EDS; a) e b) para B = 0T na matriz austenita.

**Tabela 4** -Resultado da análise química EDS.

| Elemento | % Massa<br>(matriz austenítica)<br>B =0,5T | % Massa<br>(fase da<br>ferrita- $\delta$ ) B<br>= 0,5T | % Massa<br>(matriz<br>austenítica)<br>B =0T | % Massa<br>(fase da<br>ferrita- $\delta$ ) B<br>= 0T |
|----------|--|--|---|--|
| Cr       | 15,44                                      | 15,27  | 15,80                                       | 16,54  |
| Ni       | 7,08                                       | 7,42   | 7,82  | 2,17   |

## 4 CONCLUSÃO

A inclusão do campo magnético externo influenciou no aumento da profundidade e redução da largura da poça de fusão e do arco plasmático. Esse efeito se dá pela força magnética no entrono do arco plasmático, o aumento da pressão no interior do arco plasmático e o aumento da força de Lorentz responsável pela profundidade da poça de fusão.

Houve decréscimo na ZTA devido a profundidade e o estreitamento da poça de fusão. Sendo benéfico a soldagem por ser considerado a ZTA uma região suscetível a trinca.

Ocorreu maior refinamento dos grãos na soldagem com campo magnético externo na maior velocidade na isotermalíquidus.

Houve uma relativa uniformidade de Cr de  $\gamma$  para  $\delta$  e pouca diferença na composição química nas regiões dendríticas e inter-dendríticas ocorrendo leve micro segregação durante a solidificação.

## 5 Agradecimentos

A Universidade Federal Fluminense e ao PPGEM, CNPq e FAPERJ.

## 6 REFERÊNCIAS

- 1 Almeida, S.S., Avaliação experimental e numérica da soldabilidade dos aços inoxidáveis duplex 2205 e superduplex 2507, Dissertação de Mestrado,

- Escola Engenharia Indústiral Metalúrgica de Volta Redonda, PPGEM, UFF, p 1-147, 2014.
- 2 Bachmann, M., Avilov, V., Gumenyuka, A., Rethmeier, M., Numerical assessment and experimental verification of the influence of the Hartmann effect in laser beam welding processes by steady magnetic fields, International Journal os thermal Sciences 101, p 24-34, 2016.
  - 3 Demarque, R, Ellem, P,S., Queiroz, A,V., Silva, L.M., Castro, J.A., Xavier, C.R., Silva, R,S., Avaliação do Efeitos da Variação do Apóрте Térmico Sobre a Morfologia da Estrutura Macro-Micro do Metal de Solda Utilizando O Process GMAW Autógeno do Aço AISI 304. 72 Congresso Anual da ABM, ABM WEEK 2017.
  - 4 Queiroz, A,V., Fernandes, M.T., Silva, L,M., Demarque, R., Oliveira, E,M., Ellem, P,S., Lima,IR., Barbosa, G,C., Teixeira, P,S., Castro, J.A., Study of the Microstructure of AISI Steel 304l in WZ, Haz and BmAfter Welding in the GMAW Process, American Journal of Engineering Research, V6, pp 433-438, 2017.
  - 5 Ronqueti, L.A., Efeito do modo de transferência metálica sobre o comportamento térmico e as transformações metalúrgica na soldagem GMAW dos aços austeníticos AISI 304 e 316 utilizados em projetos de instalações nucleares, Dissertação de Mestrado, Escola Engenharia Indústiral Metalúrgica de Volta Redonda, PPGEM,UFF, p 1-163, 2014.
  - 6 Silva, C.C., Farias, J.P., Sant'ana, H.B. Evaluation of AISI 316L stainless steel welded plates in heavy petroleum environment. Materials and Desingn, p. 1581 – 1587, 2009.
  - 7 Vasconcelos, A,J,, Magno, I,A,B,, Azevedo, L,M,S,, Rocha, O,F,L,, Determinação Experimental das Variáveis Térmicas da Liga Multicomponente do Sistema AL-Mg Solidificada Direcionalmente, 65ª Reunião Anual da SBPC, 2016.
  - 8 Yazdian, N., Mohammadpour, M., Razavi, R., Kovacevic, R., Hybrid laser/arc welding of 304L stainless steel tubes, part 2 – Effect of filler wires on microstructure and corrosion behavior, International Journal of Pressure Vessels and Piping, 163, p 45-54,2018.