



## TRINCAS DE SOLIDIFICAÇÃO E LIQUAÇÃO DE AÇOS INOXIDÁVEIS SUPERAUSTENÍTICOS AISI 904L SOLDADOS POR ARCO ELÉTRICO.

- (1) **Ramón S. Cortés Paredes**, Dr. Eng.; [ramon@demec.ufpr.br](mailto:ramon@demec.ufpr.br)  
(2) **Ana Sofia C.M. D'Oliveira**, PhD.; [sofmat@demec.ufpr.br](mailto:sofmat@demec.ufpr.br)

**Resumo.** *O trabalho apresenta os resultados do estudo da soldabilidade do aço inoxidável AISI 904L tipo 25 Ni – 20 Cr superaustenítico, contendo adições de Molibdênio e Cobre. Este tipo de aço é resistente aos meios corrosivos altamente agressivos que segundo a literatura são susceptíveis à trincas de solidificação e liquação durante a soldagem. Para avaliar a susceptibilidade ao trincamento foram preparados corpos de prova soldados por dois processos de soldagem, com eletrodos revestidos ou semi-automático MIG, com diferentes condições de soldagem em ambos os processos. Com o objetivo de estudar as microestruturas obtidas, corpos de prova foram analisados através de microscopia ótica e eletrônica para a verificação da existência de trincas na zona de solidificação ou na zona termicamente afetada. Não foram observadas trincas de solidificação a quente durante a soldagem e nem posteriormente na estrutura solidificada nos dois processos de soldagem estudados. No entanto, foram observadas trincas de liquação na zona termicamente afetada, trincas essas que foram eliminadas pela utilização de préaquecimento do substrato. Pode-se concluir que os procedimentos de soldagem utilizados nos processos com eletrodo revestido e semi-automático MIG permitiram evitar o surgimento de trincas de solidificação e que o préaquecimento foi fundamental para eliminar as trincas de liquação.*

**Palavras-chave:** soldagem inoxidável, inoxidável superaustenítico, trincas de liquação.

### 1. INTRODUÇÃO

O aço inoxidável superaustenítico AISI 904L com 25 % Ni e 20 % Cr com adições de molibdênio (4 a 4,8%) e cobre (entre 1 e 2 %), trata-se de um aço inoxidável com elevado teor de molibdênio, distingue-se pela sua excelente resistência à corrosão localizada, à corrosão por pites, à corrosão galvânica e em forma especial à corrosão em ambientes fortemente agressivos. É especialmente empregado em meios sulfurosos, fosfóricos, hidrocloreiros, na indústria de fertilizantes, instalações “offshore”, indústria química e petroquímica, assim como também na produção de papel e celulose. A adição de cobre melhora a resistência à corrosão nos meios ácidos (Rabensteiner, 1985; Liljas, 1985). Quando comparados a outros tipos de aços inoxidáveis, como observados na Figura 1, pode-se constatar seu superior desempenho.

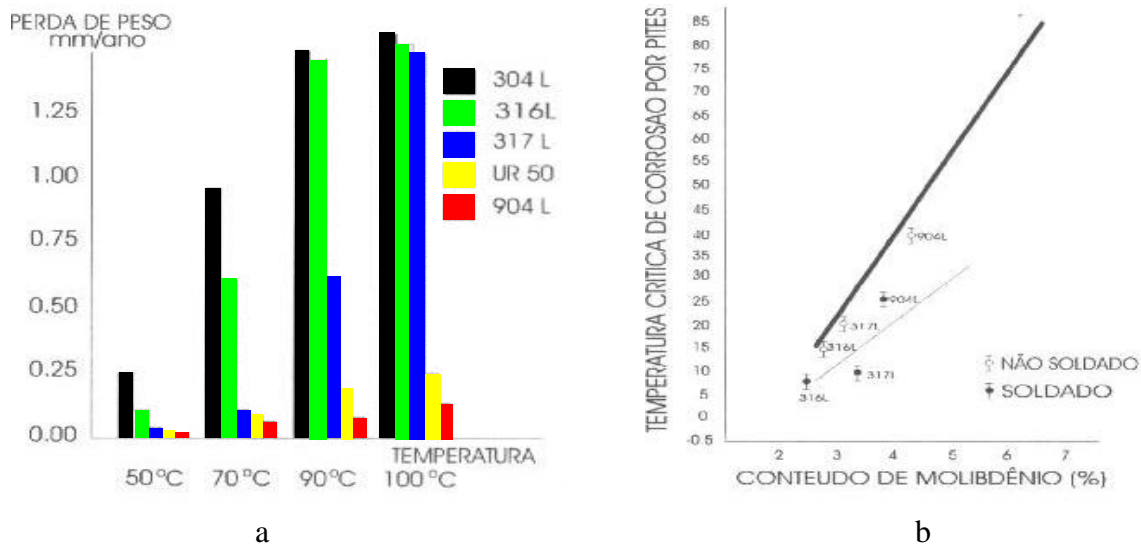


Figura 1. Comparação do aço AISI 904L com outros tipos de aços inoxidáveis (a) quando exposto no ácido fosfórico e (b) efeito do molibdênio na corrosão por pites (Thomas and Worman, 1986; Creusot Ind., 1990).

Algumas dificuldades ocorrem nestes aços quando soldados, podem ocorrer fenômenos indesejáveis, tais como, trincas a quente, sensitização, formação de fase sigma e segregação, que podem afetar a qualidade e integridade da união soldada, principalmente as propriedades mecânicas e a resistência à corrosão (Pertenezer et al, 1990).

Nos aços superausteníticos, a estrutura austenítica estável, é produzida pelo elevado teor de níquel e a desvantagem deste tipo de estrutura durante a soldagem é que ela só pode ser obtida durante a solidificação do cordão de solda por solidificação primária da austenita, o que incrementa a tendência à fissuração a quente em comparação com os metais de solda, que contém ferrita. Esse fenômeno, associado à segregação de elementos que promovem a formação de constituintes de baixo ponto de fusão, é acentuado pelo maior coeficiente de dilatação da rede cristalina austenítica, que produz no material grandes esforços de contração térmica, o que facilita a fissuração a quente na forma de trincas de solidificação no metal de solda, ou como trincas de liquação na zona termicamente afetada (ZTA), seja no metal de base como na zona fundida de uma soldagem multipasse (Pertenezer et al, 1990; Bilmes, 1992).

As trincas de liquação são favorecidas pelo crescimento de grão na ZTA, uma vez que isso acentua a segregação nos contornos de grão e com isso a formação de fases de baixo ponto de fusão, principalmente porque na região não misturada ou parcialmente fundida apresenta um nível elevado de segregação, principalmente de molibdênio.

O recurso conhecido para minimizar ou eliminar a tendência à fissuração a quente é utilizar materiais de adição que permitam a formação de ferrita delta (2 a 3 %) o que permitiria reduzir a concentração de segregação, porém, nestes aços quando expostos a condições de serviço em meios corrosivos, a ferrita delta presente traz consigo uma redução da resistência à corrosão (Bilmes, 1992; Folkhard, 1988).

Com relação à precipitação da fase sigma ( $\sigma$ ), segundo a literatura (Padilha, 1994) se o cromo equivalente for superior a 17,8 % é esperada a precipitação da fase sigma e se o aço contiver molibdênio também pode precipitar a fase qui ( $\chi$ ), sendo que a fase sigma não dissolve elementos intersticiais (carbono, boro e provavelmente nitrogênio) e a fase  $\chi$  pode dissolver carbono. Por conseguinte, além de outras razões de ordem metalúrgica, nos aços superausteníticos, há necessidade do empobrecimento prévio da matriz, o que pode ser feito pela precipitação de carbonetos e boretos ou limitando o teor de carbono a níveis baixos,

como é o caso dos aços AISI 904L. De qualquer forma as fases  $\sigma$  e  $\chi$  são consideradas negativas para as propriedades mecânicas e corrosivas dos aços superausteníticos.

## **2. RECOMENDAÇÕES PARA A SOLDAGEM DOS AÇOS AISI 904L COM MATERIAIS DE APORTE SUPERAUSTENÍTICOS**

Para evitar a fissuração a quente na soldagem dos aços totalmente austeníticos é importante considerar sugestões práticas da literatura (Folkhard, 1988), tomando precauções desde a fase de projeto do equipamento ou componente e da união soldada como tal, no sentido de reduzir a rigidez dos componentes, evitar a superposição de cordões de solda e mudanças de espessura, as quais são potencialmente regiões de elevadas tensões, e portanto sensíveis à fissuração a quente. Quanto ao procedimento de soldagem deve-se selecionar um aporte reduzido visando minimizar o crescimento de grão na ZTA. Contribuem também para essa finalidade as baixas temperaturas de interpasses e a alteração da seqüência de soldagem. Na soldagem de aços com elevado Mo as soldas devem se realizar com baixas energias de soldagem, o que também contribui para minimizar as segregações.

A soldagem com baixo aporte térmico, principalmente nos aços inoxidáveis com elevado Mo, permite durante a solidificação do cordão de solda, o aparecimento de grãos austeníticos primários pequenos, com isso reduz a tendência a formar fases líquidas (minimiza a segregação), minimizando a fissuração a quente, principalmente a que ocorre durante a solidificação. Para reduzir ou eliminar a formação de trincas de liquação pode ser conveniente a utilização de preaquecimento da superfície a ser soldada (Bilmes, 1992). Outro efeito benéfico da utilização de baixos níveis de aporte térmico, é evitar a precipitação de fases intermetálicas, aliado também ao efeito benéfico que produz controlar a temperatura de interpasse na soldagem de materiais de grande espessura.

Uma outra forma que a literatura recomenda (Pertenezer et al, 1990) para melhorar a resistência à fissuração a quente é que o material de aporte contenha elevado teor de manganês (> 4 %), sendo por enquanto o manganês só utilizado nos eletrodos AISI 904L, em teores no máximo de 2 %.

Outras recomendações práticas são: alternar a seqüência dos passes de soldagem; formar uma poça líquida pequena e não fazer tecimento (oscilação transversal) com o eletrodo e utilizar cobre junta.

## **3. METODOLOGIA E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL**

O objetivo deste estudo é analisar a soldabilidade do aço inoxidável AISI 904L utilizando os processos de soldagem com eletrodo revestido (ER) e o processo MIG. Foram utilizados dois eletrodos para cada processo, procurando otimizar os procedimentos de soldagem para permitir soldas isentas dos possíveis fenômenos indesejáveis.

### **3.1 Composição química**

A Tabela 1 contém a composição química do metal de base e dos eletrodos utilizados.

Tabela 1. Composição química do metal de base e eletrodos.

| Composição [%] | C    | Cr    | Ni    | Mo    | Cu  | Mn  | Si   | P    | S      |
|----------------|------|-------|-------|-------|-----|-----|------|------|--------|
| Metal base*    | 0,02 | 19-22 | 22-27 | 4-4.8 | 1-2 | 2,0 | 0,5  | 0,03 | 0,01   |
| ER1            | 0,02 | 20,3  | 25,1  | 3,5   | 2,0 | 2,0 | 0,6  | 0,02 | 0,02** |
| ER2            | 0,25 | 20,0  | 25,5  | 4,8   | 1,5 | 1,0 | 0,9  | ND   | ND     |
| MIG1           | 0,13 | 20,0  | 25,0  | 4,5   | 1,5 | 1,7 | 0,4  | ND   | ND     |
| MIG2           | 0,02 | 20,0  | 25,0  | 4,5   | 1,5 | 1,7 | 0,35 | ND   | ND     |

- Dados do fabricante do aço; \*\* 0.07% Nitrogênio; ND = não determinado.

### 3.2 Condições e procedimento de soldagem

Os corpos de prova para soldagem tiveram as seguintes dimensões, considerando a chapa como semi-infinita.

- comprimento = 300 mm; largura = 200 mm ; espessura = 9,6 mm.
- Junta em V (60 graus); reforço (nariz) = 2 mm e folga = 2 mm.

Eletrodo e condições de soldagem

- diâmetro dos eletrodos AISI 904L: ER = 3.2 mm e MIG = 1,2 mm
- gás de proteção do processo MIG = 98 % Ar e 2 % O<sub>2</sub>
- temperatura de preaquecimento = 200 °C.
- temperatura de interpasse ≈ 100 °C.

Todas as soldas foram feitas na posição plana com arco curto e reto. Na Tabela 2 registram-se os parâmetros de soldagem utilizados.

Tabela 2. Parâmetros de soldagem.

| Parâmetros®<br>Eletrodos <sup>-</sup> | Corrente<br>[A] | Tensão<br>[V] | Velocidade de soldagem<br>[cm/min] | Energia imposta<br>[kJ/cm] | Nº.<br>passes |
|---------------------------------------|-----------------|---------------|------------------------------------|----------------------------|---------------|
| ER1                                   | 120             | 15            | 24                                 | 4,5                        | 8             |
| ER2                                   | 120             | 14            | 22                                 | 4,6                        | 8             |
| MIG1                                  | 180             | 24            | 60                                 | 4,3                        | 10            |
| MIG2                                  | 180             | 24            | 60                                 | 4,3                        | 10            |

As condições e parâmetros de soldagem foram estabelecidas após testes preliminares com base em recomendações práticas e recomendações da literatura (Folkhard, 1988; Rojas e outros, 1992).

### 3.3. Ensaio mecânicos

Foram preparados corpos de prova para ensaios de tração e tenacidade (ensaio charpy, entalhe na zona fundida) respectivamente, de acordo com as normas ASTM E8-81 e ASTM E23-72, num total de 10 corpos de prova para cada ensaio.

A dureza Vickers foi medida com carga de 10 kgf, os valores apresentados correspondem à média de 5 pontos por região, mostrando na Figura 2 o gráfico que registra as medições no metal de base, ZTA e zona fundida.

### 3.4 Metalografia

Para medições de dureza e análises de microestrutura as superfícies do metal de base e das uniões soldadas foram preparadas da seguinte maneira:

- Lixamento: retifica e lixas 200, 320, 400, 600 e 1000,

- Polimento eletrolítico: ácido perclórico 70 % (50 ml), etano (750 ml), água destilada (40 ml), intensidade de corrente (1 A), tempo (10 s),
- Ataque eletrolítico: ácido oxálico (10 g), água destilada (100 ml),
- Intensidade de corrente (6 A), tempo (45 s).

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Dureza

Os valores de dureza observados na Figura 2, medidos no metal de base, zona fundida e zona afetada termicamente são compatíveis com o material de microestrutura austenítica. A dureza mais elevada do depósito feito com o eletrodo ER2, da ordem de 231 HV10, mostra que esse valor fica ainda abaixo do limite fixado pela norma NACE (248 HV) para aços sujeitos a corrosão sob tensão em meios contendo H<sub>2</sub>S (NACE Standard, 1990).

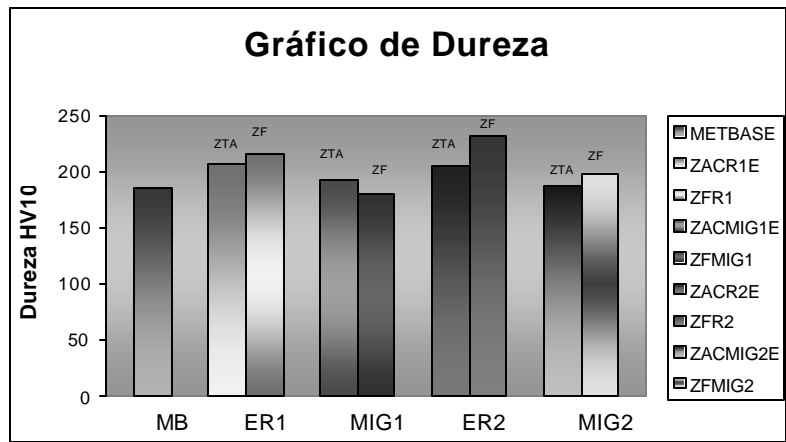


Figura 2. Resultados das medições da dureza HV10 do metal de base e união soldada.

### 4.2. Tração

Com relação aos resultados no ensaio de tração de corpos de prova soldados (Figura 3), pode-se comentar que as fraturas ocorreram no metal de base nos corpos de prova ER1 e ER2. Nos corpos de prova MIG 1 e MIG2, a fratura ocorreu no cordão de solda, sendo que só no corpo de prova MIG2 a resistência à tração ficou menor que a do metal de base.

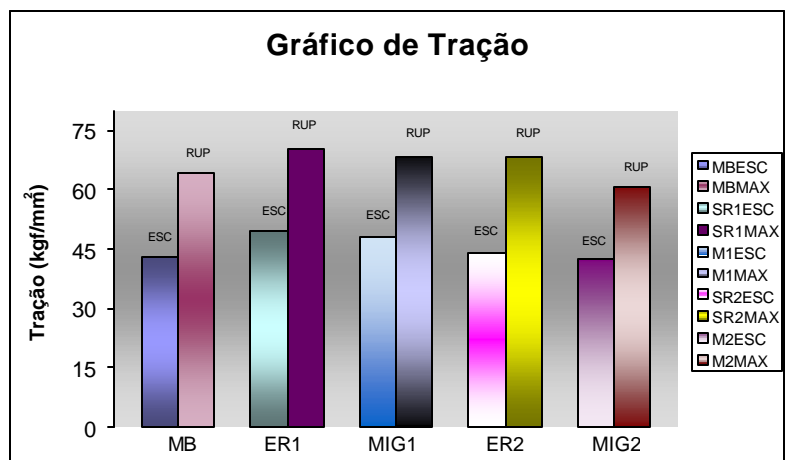


Figura 3. Resultados do ensaio de tração, medido no metal de base e nas uniões soldadas.

### 4.3. Tenacidade

Os resultados da medição da tenacidade apresentados na Figura 4 mostram que em todos os corpos de prova os valores obtidos são menores que o metal de base. A queda de tenacidade na zona fundida poderia estar associada à segregação, que é comum nesses materiais de estrutura puramente austenítica de elevado teor de Ni e Cr e também de Mo e Cu [7]. Este fenômeno é acentuado pela estrutura de solidificação dendrítico-celular (vide Figura 6) que facilita a segregação intergranular, o que ainda é incrementado pelo tipo de estrutura de solidificação (granulação grosseira) produzida no centro do cordão de solda, produto das elevadas velocidades de soldagem utilizadas, seja na soldagem com eletrodo revestido como com soldagem MIG. Uma outra justificativa a ser comentada diz relação com a possibilidade da formação de fases intermetálicas indesejáveis, tais como fases sigma ( $\sigma$ ) e Qui ( $\chi$ ), que segundo a literatura [8] pelo elevado cromo equivalente que apresentam os aços inoxidáveis AISI 904L (Creq. = 23,9) é esperada a precipitação destas fases, o que explicaria a sensível queda da tenacidade em todas as uniões soldadas.

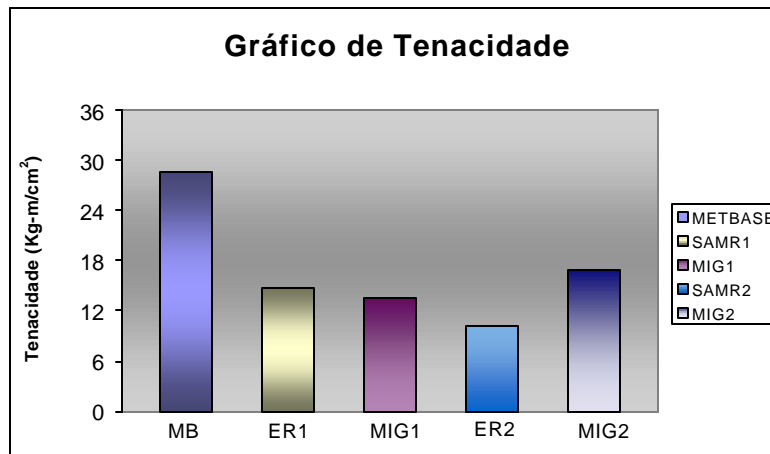


Figura 4. Resultados da medição da tenacidade do metal de base e das uniões soldadas.

No caso da união soldada com eletrodo revestido ER2 a de menor tenacidade e maior dureza (Figuras 2 e 3), a menor tenacidade poderia ser explicada pela participação do nitrogênio na forma de carbonitretos complexos o que permite aumentar a dureza, porém, a estrutura fica de menor resistência quando exposta ao ensaio de impacto.

Outro problema sério que afeta a integridade das uniões soldadas são as trincas de liquação observadas na ZTA e outras discontinuidades nos cordões de solda, conforme apresentado a seguir.

#### 4.4. Microestrutura e defeitos de soldagem

Através da Figura 5 pode-se observar a microestrutura típica completamente austenítica, com maclas dessa estrutura cristalina.

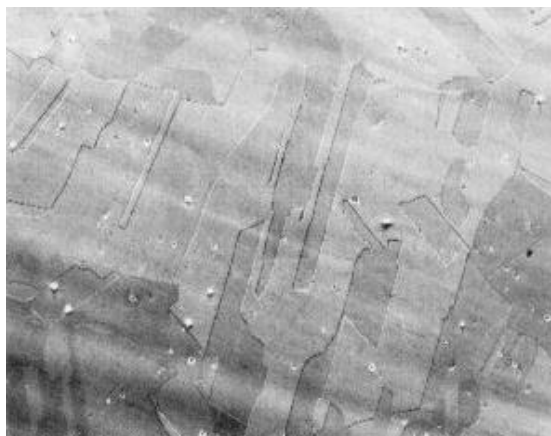




Figura 5. Microestrutura do metal de base – AISI 904L.

Na Figura 6 pode-se observar a estrutura típica de solidificação da soldagem com eletrodo revestido e processo MIG com consumível tipo 904L, onde coexistem as morfologias colunar dendrítica e celular dendrítica na região central do cordão de solda.

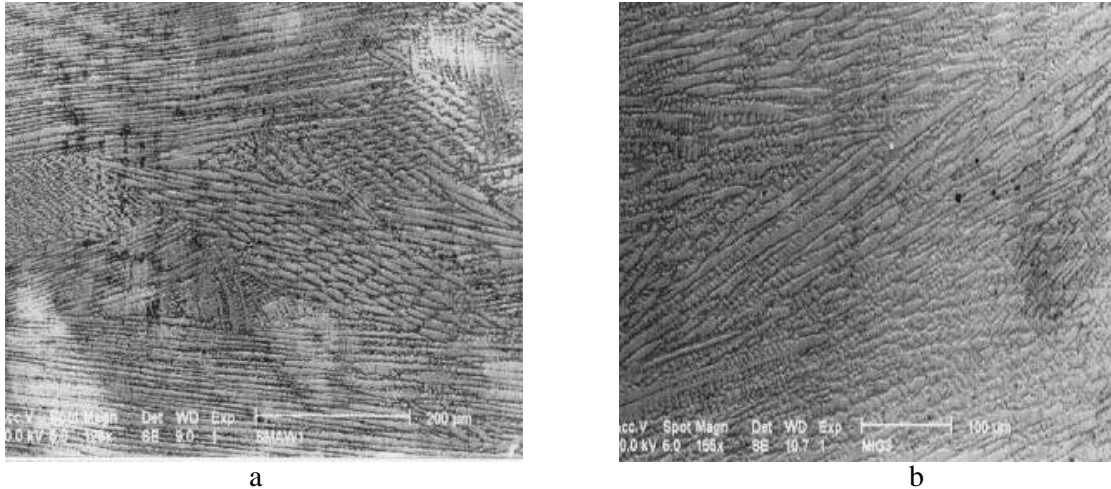


Figura 6. Microestrutura de solidificação a) microestrutura da soldagem com ER1, b) microestrutura da soldagem com MIG1.

Os procedimentos de soldagem adotados permitiram evitar trincas de solidificação durante a soldagem nos cordões de solda. Entretanto, em todas as soldas realizadas pelos dois processos, foram detectadas trincas de liquação. Como é ilustrado na Figura 7 observa-se as microtrincas, que tem entre 150 e 200 µm de extensão alongando-se intergranularmente entre a zona de ligação e a ZTA de grãos grosseiros.

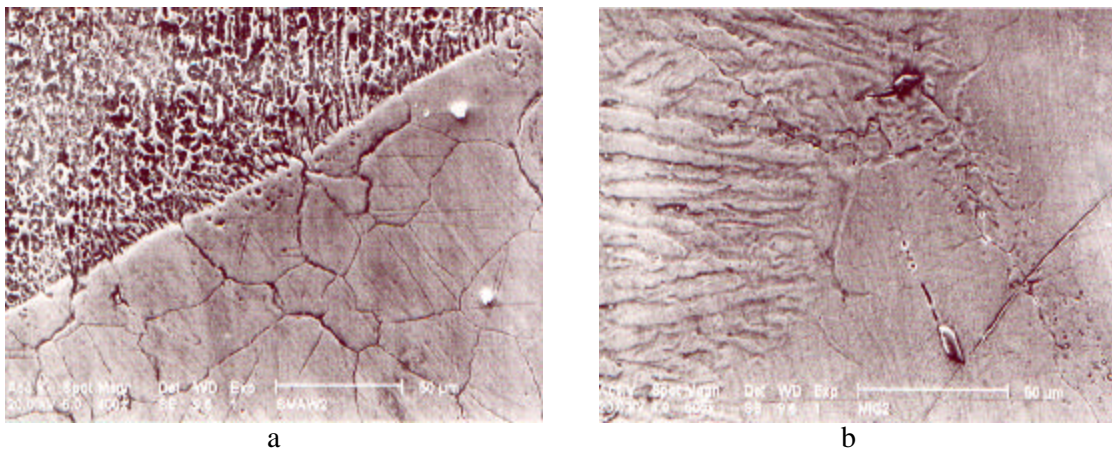


Figura 7. Microestrutura da zona de ligação mostrando a formação das microtrincas de liquação, a) Soldagem com eletrodo revestido ER1 e b) soldagem MIG 2.

A formação de trincas de liquação é atribuída ao crescimento de grãos na ZTA e ao elevado teor de molibdênio (4 a 4,8 %), que favorece a segregação ao longo da área reduzida dos contornos de grãos, levando a formação de filmes líquidos locais.

Entre as recomendações para minimizar ou eliminar a incidência das trincas de liquação na união soldada, além de realizar a solda com baixa energia de aporte, é preaquecer o substrato (200 °C), tal recomendação foi posta em prática com sucesso, não ocorrendo trincas de liquação em corpos de prova mantendo em 100 °C a temperatura de interpasse entre cada cordão de solda, isto foi possível pela redução das tensões trativas na fase de resfriamento durante a soldagem.

## 5. CONCLUSÕES.

Pelos resultados obtidos, conclui-se que o procedimento de soldagem permitiu evitar as trincas de solidificação durante a soldagem, sendo que para a eliminação das trincas de liquação foi necessário realizar preaquecimento do metal de base.

Com relação às propriedades mecânicas, pode-se concluir que as uniões soldadas pelos dois processos são adequadas quando solicitadas na tração, porém a tenacidade fica reduzida.

## REFERÊNCIAS

- [1] Rabensteiner G. 1985. The welding of austenitic CrNi stainless with high Mo-content for seawater applications. Doc. IIS/Iiw-800-84. Publ. In Welding in the world, Vol. 23.
- [2] Liljas M. 1985. Ulandender A, and Holmerg B. Welding of high molybdenum austenitic stainless steel. Metal construction.
- [3] Thomas R.D., JR, and Workman. 1986. Weld Surfacing a Distillation Columns with 904L Stainless Steel. Welding Journal, August.
- [4] Catalogue Creusot-Loire Industrie. 1990. Division Creusot-Manel. Paris.
- [5] Pertenezer E.; Rabensteiner G.; Toesch J.;Schabereiter H. 1990. Metalurgia de soldagem de aços inoxidáveis austeníticos com elevados teores de molibidênio, Anais XV Encontro Nacional de Tecnologia de Soldagem.
- [6] Bilmes P.D.; Gonzales C.; Llorente C.L.; Solari M.J. 1992. Metalurgia de la Soldadura y guias de la soldabilidad de los aceros inoxidables austeniticos. Anais III Congresso Iberoamericano de Soldagem.
- [7] Folkhard, E. 1988. Welding Metallurgy of Stainless Steels. Springer Verlar, Wien N.York.
- [8] Padilha A. F., Guedes L.C. 1994. Aços Inoxidáveis Austeníticos – Microestrutura e Propriedades. Ed. Hemus, Printed in Brazil.
- [9] Rojas M., Rojas E., Cortés R.. 1992. “Estudio y soldabilidad del acero inoxidable AISI 904L. Projeto para obtener el titulo de Ingeniero Mecánico. UTA Arica Chile.
- [10] NACE Standard MR 0175-1990 “Standard Materials Requirements – Sulfide Stress Cracking Resistant Metallic Materials for Oilfield Equipment”.

### **CRACKING OF SOLIDIFICATION AND LIQUATION OF STAINLESS STEEL SUPERAUSTENITIC AISI 904L WELDED FOR ELECTRIC ARC.**

**Abstracts.** *This work presents a study on the weldability of AISI 904L, type 25 Ni – 20 Cr superaustenitic stainless steel, with additions of Molybdenum and Copper. This type of steel is resistant to highly aggressive and corrosive medium and according to literature data they are susceptible to solidification cracking and liquation during welding. To evaluate the cracking solidification susceptibility, samples were prepared by two welding processes: shielded metal arc welding and semi-automatic MIG welding. Different processing parameters were evaluated in both welding processes. Microstructural analysis was performed by optical and electron microscopy (SEM) where particular emphasis was given on the evaluation of the solidification cracks and on the thermally affected zone. Results showed that for the two welding processes studied, hot solidification cracks were not observed during welding even*



*after solidification on the melted region. However, liquation cracks that disappeared when the substrate was pre-heated were identified on the thermally affected zone. It can be concluded that the welding procedures used in shielded metal arc welding and semi-automatic MIG welding prevented the occurrence of solidification cracks and that pre-heating the substrate was fundamental for the prevention of liquation cracks.*

**keywords:** *superaustenitic stainless steel, cracking of solidification, cracking of liquation*