INTERCORR2008_033

Copyright 2008, ABRACO
Trabalho apresentado durante o INTERCORR 2008, em Recife/PE, no mês de maio de 2008.
As informações e opiniões contidas neste trabalho são de exclusiva responsabilidade do(s) autor(es).

OCORRÊNCIA DA FRAGILIZAÇÃO INDUZIDA POR METAL LÍQUIDO EM AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS E FERRÍTICOS.

Guilherme Marconi Silva[1], Alexandre Queiroz Bracarense[2]

Abstract

This paper shows the Liquid Metal Induced Embrittlement of ferritic and austenitic stainless steel sheets when in contact with liquid copper in a Mig-brazing process.
The Liquid metal induced embrittlement (LMIE) refers to the loss of ductility of normally ductile metals when stressed when in contact with a liquid metal. [Lynch, 1992].
On this case the embrittlement carried out by cracks after a MIG-brazing process.
The MIG-Brazing process is an association of two welding process: gas metal arc welding (GMAW or MIG) and Brazing. The main characteristic of this process is the low temperature process and less or non fusion of the base metal.
Therefore, for the work three different stainless steel alloys, AISI 304, AISI 316 and AISI 430 were used. Argon was used as a shield gas and a Copper/Aluminum wire as filer metal.

Resumo

Este artigo apresenta um estudo da ocorrência da Fragilização Induzida pelo Cobre Líquido, revelada pelo aparecimento de trincas no metal base, em chapas finas de aços inoxidáveis austeníticos, quando unidas pelo processo de soldabrasagem-mig.
A fragilização induzida por metal líquido (FIML) refere-se à perda de ductilidade de materiais normalmente dúcteis, quando em contato com um metal líquido e submetidos à uma tensão. [Lynch, 1992]. No caso deste trabalho a FIML se caracterizou pelo trincamento das chapas, verificado após a união pelo processo de soldabrasagem-mig. O processo de soldabrasagem–mig é caracterizado por uma associação de dois processos de união: a soldagem a arco elétrico com proteção gasosa (mig) e a brasagem. É caracterizado também pela menor temperatura de processo e pouca ou nenhuma fusão do metal de base. A geração de calor é decorrente do arco elétrico gerado que funde o metal de adição, sob proteção gasosa e a penetração utiliza parcialmente o princípio do processo de Brasagem (molhamento e fluxo capilar).

Palavras-chave: Fragilização Induzida por Metal Líquido, Aço Inoxidável, Adsorção.

[1] MSc - Engº Mecânico - Prof do Depto de Engenharia Mecânica do CEFET MG
[2] Ph.D - Prof do Depto de Engenharia Mecânica da UFMG

1-Introdução

A Fragilização Induzida por Metal Líquido - FIML é uma fratura frágil ou a perda de ductilidade de metais normalmente dúcteis, quando em contato com um metal líquido. A falha de componentes devido a FIML é menos comum que falhas causadas por outros processos como: fadiga, fragilização por hidrogênio, corrosão sob-tensão, entretanto, um número significativo de falhas têm ocorrido devido à FIML. Este crescimento no número de falhas decorre, dentre outros, de dois aspectos principais: a falta de informação sobre o fenômeno e a falta de conhecimento das condições sob as quais ocorre o fenômeno [Lynch, 1992].
O processo de Soldabrasagem-MIG é uma associação entre os processos de soldagem ao arco metálico com proteção gasosa (MIG) e o processo de brasagem. A geração de calor é decorrente do arco elétrico gerado que funde o metal de adição, sob proteção gasosa e a penetração utiliza parcialmente o princípio do processo de Brasagem (molhamento e ação capilar) [Andrade, 2003].
Sua aplicação tem como grande usuário a indústria automobilística, onde é usado para união de chapas galvanizadas, sendo o principal benefício a menor queima da camada protetora de zinco, garantindo assim as propriedades anticorrosivas e a vida útil estimada dos componentes soldados.
O objetivo principal deste trabalho foi verificar a existência do processo de Fragilização Induzida por Metal Líquido nas diferentes chapas testadas de aços inoxidáveis após o processo de união por soldabrasagem-MIG, utilizando um metal de adição à base de cobre.

2 – Revisão Bibliográfica

2.1 - Aços Inoxidáveis
Os aços inoxidáveis são ligas de Ferro e Carbono resistentes à corrosão ou oxidação, contendo no mínimo 10,5% de Cromo e não mais de 1,5% de Carbono e um teor de Ferro superior a qualquer outro elemento em particular. Outros elementos também são adicionados para garantir outras propriedades tais como: resistência ao calor, resistência ao frio, capacidade de deformação, resistência mecânica, etc. [Kotecki, 1983]
A resistência à corrosão é decorrente da existência de uma camada de óxido, rica em cromo, formada naturalmente na superfície do aço. Apesar de sua pequena espessura (1 a 5 ηm) possui grande aderência e estabilidade química.
Os aços inoxidáveis podem ser classificados em comuns e especiais. Os comuns são: os martensíticos, os ferríticos e os austeníticos e os especiais são: os endurecíveis por precipitação e os duplex. [Kotecki, 1983]
Os aços inoxidáveis comuns são classificados de acordo com sua composição química pela American Iron and Steel Institute (AISI) recebendo designações por séries 2XX (Cr-Ni-Mn), 3XX (Cr-Ni) e 4XX (Cr). [AWS, 1998]. Dos aços inoxidáveis comuns, os com maior aplicação industrial são os auteníticos e os ferríticos.
Os aços austeníticos são baseados no sistema ternário ferro-cromo-níquel e contêm um total de cromo, níquel, manganês e silício acima de 25% em peso, com conteúdo de cromo geralmente acima de 16%. A fase austenítica (ferro gama) tem uma estrutura cristalina cúbica de face centrada, é não-magnética e consiste de uma solução sólida de carbono, cromo, níquel e outros elementos de liga no ferro γ. Estes aços são em geral totalmente austeníticos, embora alguma ferrita possa ficar retida na estrutura. Estes aços não podem ser endurecidos por tratamento térmico, porém são facilmente encruáveis, isto é, podem ser endurecidos por deformação plástica a frio. Apresentam resistência ao calor, ao frio e à corrosão. Os aços austeníticos cobrem um vasto quadro de composições químicas, porém, uma liga típica, poderia ser a do aço AISI 304.

Os aços ferríticos podem ser classificados em três classes distintas: os de carbono não muito baixo e cromo mais alto chamados de 1ª geração, a liga típica deste grupo é a AISI 430 que possui como microestrutura de equilíbrio à temperatura ambiente a ferrita e alguns carbonetos; os de menor teor de carbono e nitrogênio ditos de 2ª geração, a liga típica é a do aço AISI 409 cuja microestrutura é a ferrita em todos os níveis de temperatura; e os de mais baixo teor de carbono e adição de estabilizadores (Nb e Ti) de 3ª geração, a liga típica é a do aço AISI 444 e que surgiram no início da década de 1970 em decorrência da maior eficiência nos processos de redução do teor de carbono do metal líquido. De uma maneira geral os aços inoxidáveis ferríticos se caracterizam pela ausência da transformação ferrita-austenita durante o processo de aquecimento, principalmente os de 2ª e 3ª gerações.

2.2 Processos de união

2.2.1 Brasagem

Brasagem é um processo de união entre metais ou entre materiais cerâmicos, por intermédio de um metal de enchimento fundido, com ponto de fusão, mínimo de 427°C, e normalmente inferior ao dos materiais a serem unidos e que preenche a junta de união através da ação capilar. [Corrigam, 1993]

A brasagem pode ser executada em ambientes abertos com a fonte de calor oriunda de uma chama oxi-gás ou por indução eletromagnética e em fornos com ou sem atmosfera protetora. A principal característica, que torna o processo em fornos, o mais atrativo, é a possibilidade de se utilizar equipamentos que possuem controle de atmosferas gasosas, neutras ou em vácuo, sem a necessidade da utilização de fluxos. O uso de atmosferas protetoras do tipo Argônio, Hidrogênio e Nitrogênio previnem a formação de óxidos, melhorando o molhamento e o espalhamento ou penetração do metal de adição por capilaridade. [Liu at al, 1993]

2.2.2 O processo MIG

O processo de Soldagem ao Arco Metálico com Proteção Gasosa – SAMG ou em inglês, Gas Metal Arc Welding - GMAW ou também Metal Inert Gas – MIG é um processo de soldagem ao arco elétrico que utiliza um arco entre uma alimentação contínua de metal (arame) e a poça de fusão. Esse processo utiliza fonte externa de gás de proteção para a poça de soldagem contra contaminação do ar externo. O processo pode ser utilizado nos modos automático, semi-automático e mecanizado. Todos os metais comercialmente importantes, tais como aços ao carbono, aços de alta resistência e baixa liga (HSLA), aço inoxidável, alumínio, cobre, titânio e ligas de níquel podem ser soldados em todas as posições de soldagem através da escolha apropriada do gás de proteção, dos eletrodos e das variáveis de soldagem.[Bracarense,2003]

2.2.3 O processo de Soldabrasagem-MIG

O processo está sendo pesquisado como uma alternativa, que apresenta certos aspectos interessantes [Andrade, 2003], tecnicamente não é uma brasagem, uma vez que, não ocorre o fenômeno de capilaridade no *stricto senso* da palavra, pois, pode ocorrer fusão localizada do metal base. O processo utiliza os princípios do processo de soldagem ao arco metálico com proteção gasosa (MIG), onde se obtém os melhores resultados com aplicação de transferência metálica pulsada ou por curto-circuito, sendo que nesta última as fontes de potência são preparadas para fornecer uma menor amplitude dos curtos circuitos e curvas com formato mais arredondado, são mais adequadas devido ao menor aporte de calor [Andrade, 2000].

No processo de soldabrasagem-MIG o metal de adição é depositado em filetes em uma estreita área da junta onde, através do fenômeno do molhamento e espalhamento, se difunde e, por vezes, penetra nos contornos de grãos. Adicionalmente pode ocorrer pequena diluição devido à fusão parcial do metal base [Andrade, 2000].

O processo foi lançado comercialmente por volta de 1995 pela DAIHEN Corporation Welding Products Division- OTC (fabricante Japonês), com uma fonte de potência dedicada para curto circuito.[Andrade, 2003]. Atualmente este processo tem grande aplicação industrial para união de chapas galvanizadas, utilizando como metal de adição uma liga bronze silício ou bronze

alumínio e como gás de proteção argônio puro ou misturas com pequenos teores de oxigênio ou CO_2 em argônio. No que diz respeito aos aços galvanizados, o desenvolvimento da tecnologia da soldagem ao arco elétrico com proteção gasosa ainda está lento e a literatura existente recomenda diversos procedimentos de soldagem contrastantes entre si. [Zeemann, 1995].
A presença do zinco durante a soldagem de chapas galvanizadas pode causar alguns inconvenientes, tais como: geração de fumos, ocorrência de porosidade e respingos, trincas, instabilidade de arco, além de danificar a camada galvanizada que protege o aço contra corrosão. Com a utilização do processo soldabrasagem-MIG estes problemas podem ser eliminados ou minimizados, devido ao menor aporte térmico, o que contribui para reduzir a queima da camada protetora, reduzir a volatilização de zinco, arco elétrico mais estável, boa fluidez do metal de adição, baixa taxa de respingos, ótimas propriedades mecânicas, resultando em uma união de excelente qualidade.

2.3 Fragilização Induzida por Metal Líquido

2.3.1 Definição

Apesar deste fenômeno já ter sido relatado por N.H. Johnson em 1874, não tem sido tão investigado como outras formas de fraturas ou trincas decorrentes de condições ambientais tais como: Fragilização por Hidrogênio, Fragilização de Revenido e Corrosão sob Tensão. [Fernandes, 1993]
A Fragilização Induzida por Metal Líquido - FIML é uma fratura frágil ou a perda de ductilidade de metais normalmente dúcteis, quando em contato com um metal líquido. [Joseph, 1999]
Alguns autores acrescentam à esta definição a necessidade da existência de uma tensão de carregamento externa ou uma tensão interna sobre o metal O modo de fratura muda de dúctil para frágil intergranular ou frágil transgranular (Clivagem), sendo este último mais comum em metais com arranjos cristalinos do tipo cúbico de corpo centrado(CCC) e hexagonal compacto(HC). A perda de ductilidade decorrente do FIML geralmente se manifesta como redução no Alongamento Percentual (A) ou na Estricção (Z), sem que haja modificação significativa nas demais propriedades do material, a Tensão Limite de Escoamento, o Módulo de Young e a capacidade de deformação a quente permanecem inalteradas. A curva de tensão deformação permanece inalterada até o ponto de falha. [Fernandes, 1993].
A fragilização sofrida pelo metal sólido, imerso ou coberto pelo metal líquido não depende do tempo de exposição. A mais severa fragilização ocorre quando a temperatura gira em torno da temperatura de solidificação do metal líquido. [Kamdar, 1986]

2.3.2 Características Específicas

A FIML resulta em uma drástica redução da ductilidade do material, evidenciada tanto pela ausência de deformação plástica como na redução da tenacidade à fratura na região da falha. O crescimento da trinca é muito rápido e o início da trinca ocorre na interface sólido/metal líquido. A superfície da trinca ou fratura fica normalmente coberta por uma camada do metal líquido, que pode variar de alguns átomos a alguns milímetros de espessura. A presença de metal líquido na ponta da trinca é essencial para a continuação do trincamento de forma frágil. [Kandar,1986].

3- Procedimento Experimental

O objetivo deste trabalho foi verificar o aparecimento de trincas em chapas finas de aço, decorrentes do processo de fragilização induzida pelo contato com metal líquido. A fonte de metal líquido é resultado da fusão de um arame de Cobre com Alumínio, pelo processo de soldabrasagem-MIG. Está demonstrado a seguir como foram executadas todas as atividades deste trabalho para que fosse possível chegar-se ao resultado obtido. Estão apresentados: uma descrição dos materiais utilizados, os equipamentos, os parâmetros adotados e a matriz de experimentação.

3.1 Materiais Utilizados

Como metais de base foram utilizadas chapas de aço AISI 304 com 0,8mm de espessura, AISI 316 com 1,0mm, AISI 430 de 0,8mm. A tabela 1 apresenta as composições químicas dos materiais das chapas utilizadas. Como metal de adição foi usado o arame Brastak 531 - 0,8mm de diâmetro, correspondente à especificação AWS A 5.7/84 ER-CuAl-Al. Como gás de proteção foi utilizado o argônio puro.

Tabela 1 – Composição química das chapas utilizadas.

Elemento (%)	**AISI 304**	**AISI 316**	**AISI 430**
Carbono (C)	0,044	0,003	0,040
Silício (Si)	0,522	0,433	0,304
Manganês (Mn)	1,398	1,503	0,334
Fósforo (P)	0,036	0,034	0,029
Enxofre (S)	0,005	0,006	0,001
Cromo (Cr)	18,342	16,891	16,913
Níquel (Ni)	8,202	10,150	0,221
Molibdênio (Mo)	0,058	1,964	0,050
Vanádio (V)	0,039	0,066	0,045
Alumínio (Al)	0,010	0,015	0,013
Cobre (Cu)	0,048	0,056	0,013

Na tabela 2, está apresentada a matriz de experimentação adotada para os testes. Como este trabalho foi direcionado ao estudo do comportamento de chapas quando unidas pelo processo de soldabrasagem-MIG, mantivemos as mesmas condições de soldagem para as 04(quatro) combinações efetuadas entre os 03(três) tipos de metal-base.

4 – Resultados e Discussão

4.1 Resultados Preliminares

Foram executados vários cordões de solda de cada combinação de metais base. Como não houve diferença significativa, tanto do ponto de vista de parâmetros de soldagem, quanto de aparência e qualidade dos cordões, foram utilizados somente alguns cordões de cada combinação. A identificação dos cordões está apresentada na tabela 3. Na figura 1 apresentam-se as fotografias de alguns dos cordões executados.

Tabela 2 – Matriz de Experimentação

Variável	Nº de Variações	Tipo
Junta	1	Topo
Gás de Proteção	1	Argônio
Posição de Soldagem	1	Plana
Diâmetro do Arame	1	0,8mm
Material do Arame	1	Brastak BT 531
Metal Base	3	304/316/430
Combinações de Metais Base	4	304 X 304 430 X 304 316 X 304 430 X 316

Tabela 3 – Identificação das Amostras

Número da Amostra	Combinação
01-a	AISI 304 com AISI 304
02-a	AISI 430 com AISI 304
03-a	AISI 316 com AISI 304
04-a	AISI 430 com AISI 316

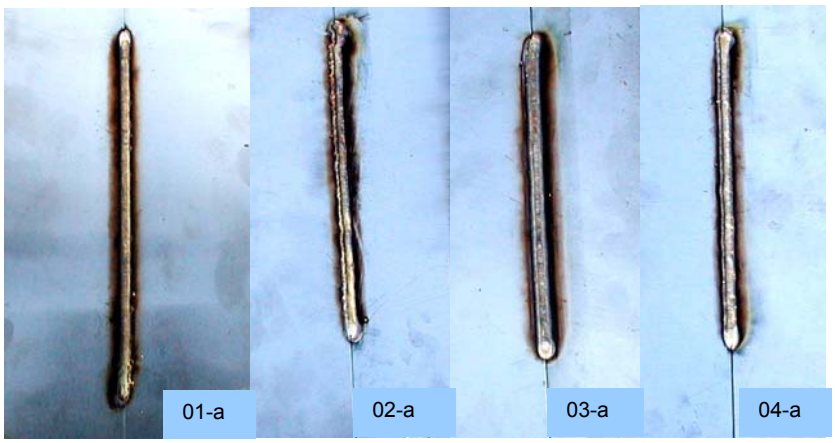

Figura 1 - Fotografia evidenciando o aspecto dos cordões escolhidos para análise.

Foi utilizado um Robô antropomórfico que permitiu a obtenção de cordões com boa aparência e que conduziu a tocha de uma máquina de tensão constante preparada para soldabrasagem-MIG. Os parâmetros de soldagem utilizados estão mostrados na tabela 4.

Tabela 4 - Parâmetros de Soldagem Utilizados

Característica	**Valores Utilizados**
Tensão (V)	14,80 a 16,00
Corrente (A)	46,00 a 48,00
Stick Out (mm)	9,00
Velocidade da Tocha (cm/min)	105,00
Vazão de Gás (l/min)	13,00
Posição da Tocha	90°
Tipo de Junta	Topo
Posição de Soldagem	Plana

4.2 Resultados da Metalografia Ótica e ao MEV

Após o corte seguido de embutimento em resina acrílica, todas as amostras foram atacadas com reativo de Villela. O ataque revelou levemente as microestruturas presentes, porém, no caso da existência de trincas houve uma nítida revelação. As figuras: 2, 3, 4, e 5 apresentam as fotografias das amostras analisadas pela metalografia ótica; as figuras 6, 7, 8 e 9 referem-se à análise no Microscópio Eletrônico de Varredura.

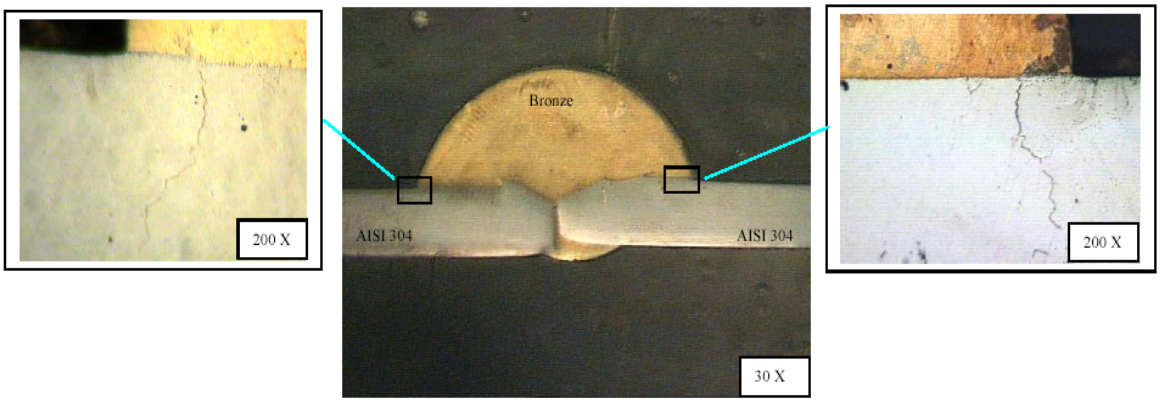

Figura 2 – Combinação AISI 304 e AISI 304 - Fotografia evidenciando seção transversal do cordão da amostra (1) evidenciando os detalhes das trincas em ambos os metais base, AISI 304.

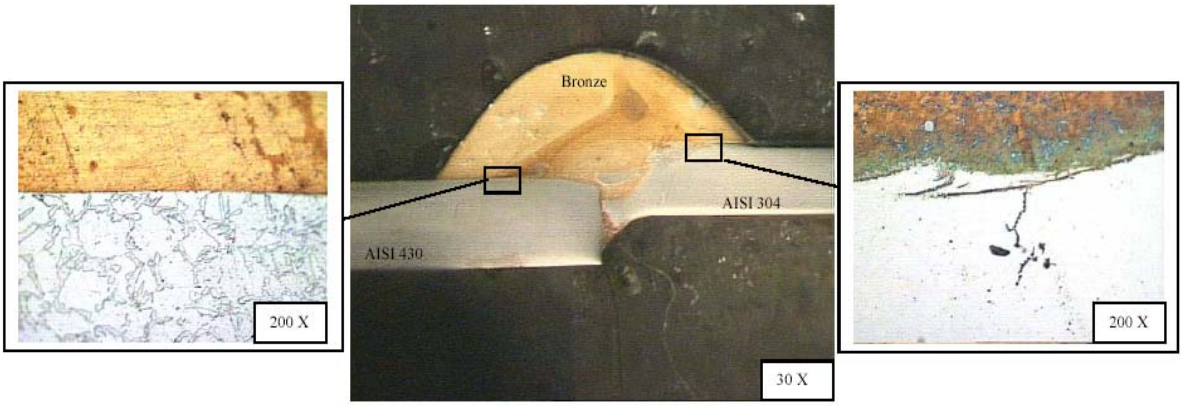

Figura 3 – Combinação AISI 430 e AISI 304- Fotografia evidenciando seção transversal do cordão da amostra (2) evidenciando os detalhes com maior aumento com ausência de trinca no aço AISI 430 e trinca no aço AISI 304.

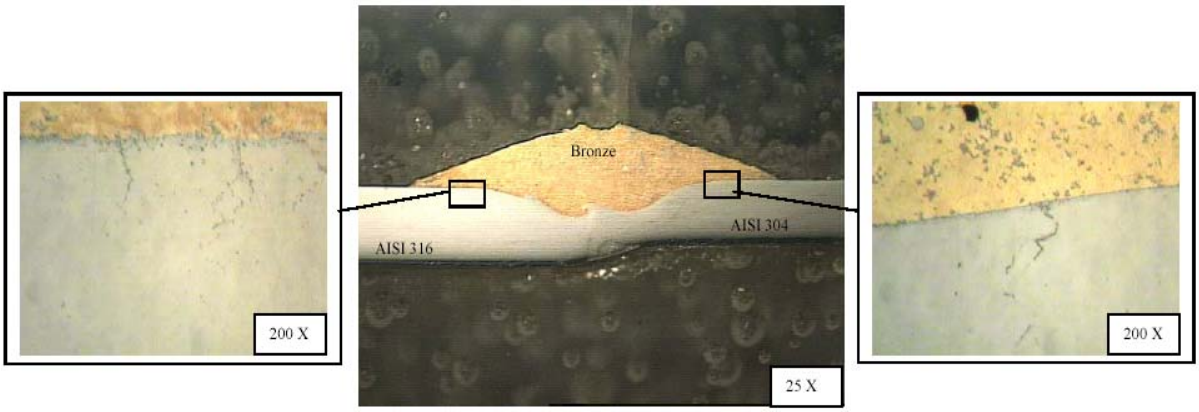

Figura 4 – Combinação AISI 316 e AISI 304-Fotografia evidenciando seção transversal do cordão da amostra (3) evidenciando os detalhes das trincas em ambos os metais base AISI 316 e AISI 304.

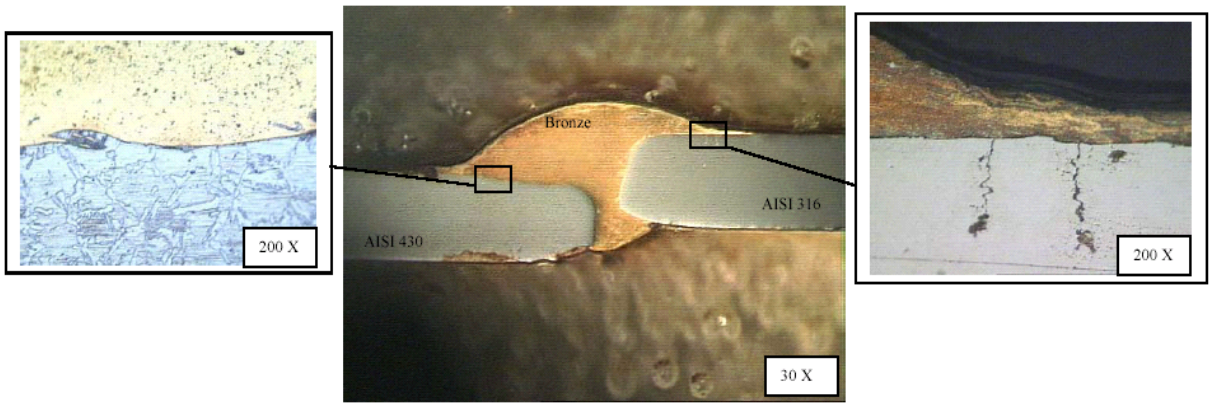

Figura 5 – Combinação AISI 430 e AISI 316 - Fotografia evidenciando seção transversal do cordão da amostra (5) evidenciando os detalhes com maior aumento com ausência de trinca no aço AISI 430 e trinca somente no aço AISI 316.

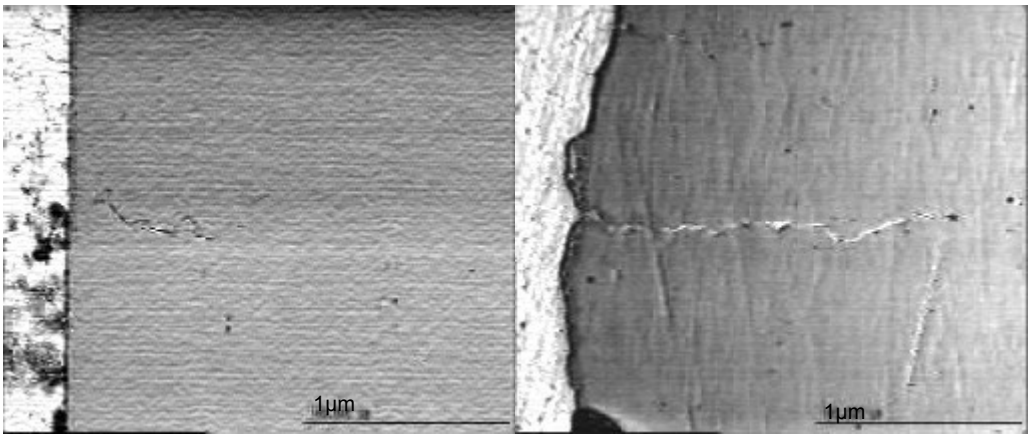

Figura 6 Fotografia das trincas vistas ao MEV com aumento de 400X. A foto da esquerda é referente ao aço AISI 304(304X304) e a da direita referente ao aço AISI 316(430X316).

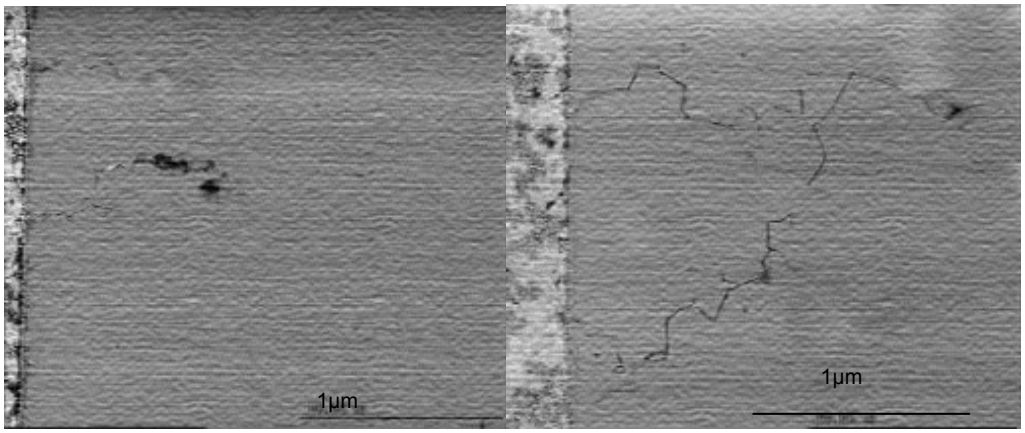

Figura 7 – Fotografia das trincas vistas ao MEV com aumento de 400X. As fotos são da mesma junta, a esquerda refere-se ao lado AISI 304 e à direita ao lado AISI 316.

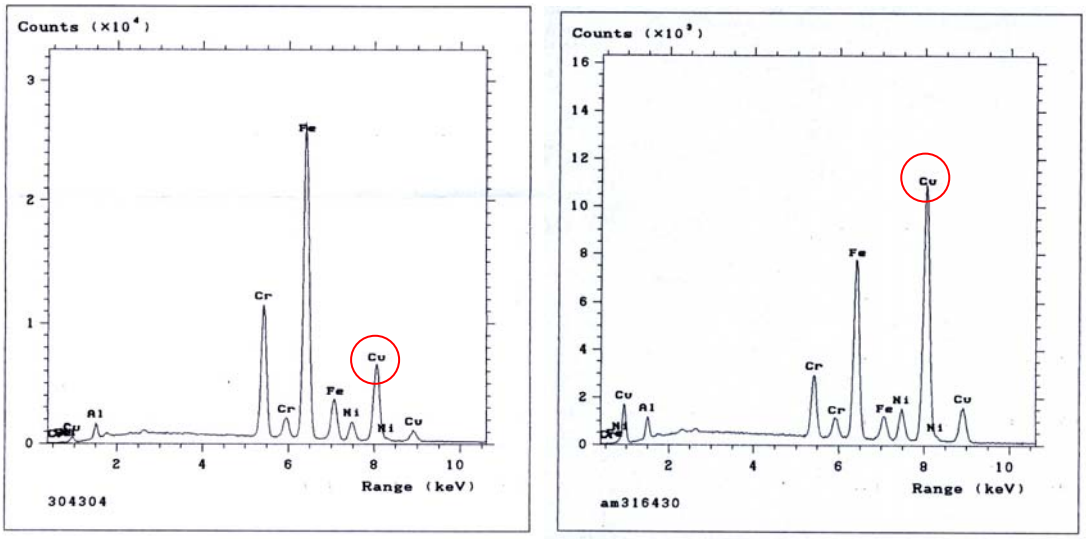

Fig 8 - Gráficos evidenciando a presença de Cobre no interior das trincas presentes nas amostras. O gráfico da esquerda refere-se à junta 304X304 e à direita à junta 430X316.

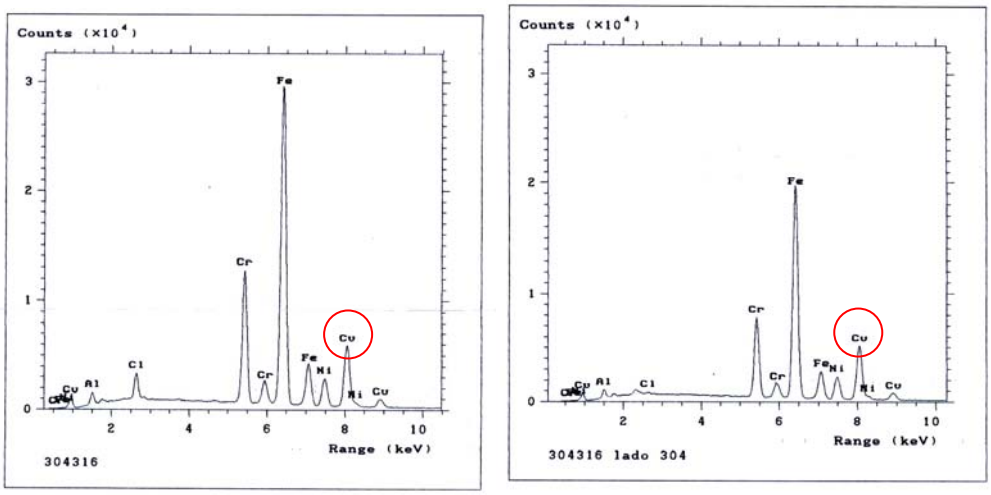

Figura 9 - Gráficos evidenciando a presença de Cobre no interior das trincas da junta 304X316, o da esquerda refere-se ao lado 316 e o da direita ao lado 304.

4.3 Resumo dos resultados obtidos:

A Tabela 5 apresenta uma síntese dos resultados obtidos, evidenciando a ocorrência ou não de trincas nas chapas que formaram as combinações utilizadas como metal de base.

Tabela 5 – Resumo da Análise Metalográfica

Lado 1	**Junta soldada**		**Lado 2**
Encontrado	**Material**	**Material**	**Encontrado**
TRINCA	AISI 304	AISI 304	TRINCA
AUSÊNCIA DE TRINCA	AISI 430	AISI 304	TRINCA
TRINCA	AISI 316	AISI304	TRINCA
AUSÊNCIA DE TRINCA	AISI 430	AISI 316	TRINCA

5-Conclusões

Em função das experiências realizadas pode-se concluir que:
1 - Os aços inoxidáveis austeníticos, AISI 304 e AISI 316 foram severamente fragilizados pela presença do Cobre Líquido. Conforme descrito por Lynch em [Lynch,1992] o Cobre (Cu) líquido fragiliza aços inoxidáveis austeníticos. Todas as amostras apresentaram trincas decorrentes da fragilização.
2 - O aço inoxidável ferrítico, AISI 430 não foi fragilizado pelo Cobre líquido, não foi detectada a presença de trincas em nenhuma das amostras ensaiadas.
3 - Foi verificada a presença de cobre (Cu) no interior das trincas encontradas nas amostras.

6-Referências bibliográficas

-ANDRADE, A.S. **Estudo da União do Aço Inoxidável Austenítico 304 pelo Processo de Soldabrasagem-Mig,** Tese de Mestrado PPGMEC-UFMG, 2003.

-KOTECKI, D.J. **Welding of Stainless Steel,** ASM Metals Handbook, Vol 6, p.677-707, 1983.

-KAMDAR, M.H. **Liquid Metal Embrittlement,** ASM Metals Handbook, Vol 11, p.225-238, 1986.

-HEIPLE,C. ET ALLI. **Embrittlement of Several Stainless Steel by Liquid Copper and Liquid Braze Alloys,** Materials Science and Engineering, p. 277-289, 1982.

-BRUSCATO, R.M. **Liquid Metal Embrittlement of Austenitic Stainless Steel when Welded to Galvanized Steel,** Welding Research Supplement, p. 455-459, 1992.

-LYNCH, S.P. **Metallografic Contributions to Understanding Mechanisms of Environmentally Assisted Cracking,** Metallography, p 147-171, 1989.

-FERNANDES, P.J.L. et alli. **Failure by Liquid Metal Induced Embrittlement,** Enginnering Failure Analysis, p. 51-63,1994.

-JOSEPH, B. ET ALLI. **Liquid Metal Embrittlement: A State-of-the-art Appraisal,** The European Physical Journal, p. 19-31, 1999.

-CREGG, R.E. JONES, D.R.H. **Liquid Metal Embrittlement of Tensile Specimens of EN 19 Steel by Tin**, Failure Analysis Engineering, p.119-130, 2003.

-INA, K. KOIZUME, H. **Penetration of Liquid Metals into Solid Metals and Liquid Metal Embrittlement,** Materials Science Engineering, p. 1-5, 2004.

-PEASLEE, R.L. **Brazing - Questions and Answers,** Welding Journal, p. 19, 2005.

-FLEMINGS, M.C. **Solidification Processing,** MacGraw-Hill, p.214-252,1974.

- AWS, AMERICAM WELDING SOCIETY- Welding Handbook Vol 4. **Stainless and Heat-Resisting Steels,** 1988.

-MODENESI, P.J. **Soldabilidade dos Aços Inoxidáveis,** Coleção Técnica de Soldagem, SENAI, 2001.

-RAMALHO, J. **Fenômenos de Molhamento**, Infosolda, p.1-7, 2002.

-BROOKS, J. ET ALLI. **Microstructural Development and Solidification Cracking Susceptibility of Austenitic Stainless Steel Weld,** International Materials Review, 1991.

-BRACARENSE, A.Q. **Apostila de Processos de Soldagem**, UFMG, 2003.

-ANDRADE,A.S. ABREU, L. **Migbraziing em Chapas Galvanizadas**, 2000

-GRANADA, C.E. **Tensão Superficial**, Rio Grande do Sul, 2005.

-ROBERTSON, W.M. **Transactions.** The Metallurgical Society of AIME, 1966.

-GLICKMAN, E.E. GORYNOV,Y.V. **Soviet Materials Science**, 1978.

-STOLOFF, N.S. JOHNSTON, T.L. **Acta Metallurgica**, 1963.

-WESTWOOD,A.R.C. KAMDAR,M.H. **Philosophical Magazine**, 1963.

POPOVICK, V.V. DMUKHOVSKAYA,I.G. **Soviet Materials Science**, 1978.

-RHINES, F.N. GOKHALE, A.B. **Embrittlement by Liquid and Solid Metals,** AIME, USA, 1982.