



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E NATURAIS
BACHARELADO EM CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

JOSÉ EUDES MARQUES JÚNIOR

**PROBLEMAS METALÚRGICOS EM JUNTAS SOLDADAS – UMA ABORDAGEM
TEÓRICA.**

MOSSORÓ-RN

2014

JOSÉ EUDES MARQUES JÚNIOR

**PROBLEMAS METALÚRGICOS EM JUNTAS SOLDADAS – UMA ABORDAGEM
TEÓRICA.**

Trabalho de conclusão de curso
apresentado a Universidade Federal Rural
do Semi-Árido – UFERSA, Departamento
de Ciências Ambientais e Tecnológicas
para obtenção do título de Bacharel em
Ciência e Tecnologia.

Orientado pelo Profº Dr. Francisco Edson
Nogueira Fraga – UFERSA.

Mossoró-RN

2014

O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade de seus autores

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Biblioteca Central Orlando Teixeira (BCOT)

Setor de Informação e Referência

M357p Marques Júnior, José Eudes.

Problemas metalúrgicos em juntas soldadas: uma abordagem teórica / José Eudes Marques Júnior -- Mossoró, 2014.

34f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Edson Nogueira Fraga.
Monografia (Graduação em Ciência e Tecnologia) –
Universidade Federal Rural do Semi-Árido. Pró-Reitoria de
Graduação.

1. Soldagem. 2. Defeitos metalúrgicos. 3. Trincas. I. Título.

RN/UFERSA/BCOT/633-14

CDD: 671.52

Bibliotecária: Vanessa Christiane Alves de Souza Borba

CRB-15/452

JOSÉ EUDES MARQUES JÚNIOR

**PROBLEMAS METALÚRGICOS EM JUNTAS SOLDADAS:
UMA ABORDAGEM TEÓRICA.**

Monografia apresentada ao Departamento
de Ciências Ambientais e Tecnológicas
para a obtenção do título de Bacharel em
Ciência e Tecnologia.

APROVADO EM 04/08/2014

BANCA EXAMINADORA

Dr. Francisco Edson Nogueira Fraga – DCAT – UFERSA
Orientador - Presidente

Prof. Dr. George Luiz Gomes de Oliveira
Membro da banca

Prof.ª. Dra. JUSCIANE DA COSTA E SILVA
Membro da banca

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais José Eudes Marques e Maria dos Anjos Xavier Marques e amigos.

AGRADECIMENTOS

Tenho uma gratidão apreciável a todos que me ajudaram na realização deste trabalho, porém algumas pessoas merecem um sentimento em especial:

Meu professor e orientador Francisco Edson Fraga Nogueira por toda a orientação para a realização deste trabalho e em outros assuntos acadêmicos e conselhos fundamentais na minha jornada como discente.

Agradeço aos meus amigos e colegas graduandos que sempre me apoiaram e não me permitiram desvirtuar meus pensamentos do estudo, e aqueles que sempre se mostraram presentes em meus momentos de desmotivação, em especial aos amigos Ronnifran Cabral Leonez, Rossana Mayara Sampaio Leite e Fayrusy Paiva.

Agradeço aos amigos Maximiliano Rafael, Pablicio Rafael, Poliane Naiara.

Agradeço a minha “Mainha”, Mariana formiga, por apenas tudo que já aconteceu comigo desde que a conheci, pelas broncas, conselhos, tentar sempre me mostrar um caminho, nem sempre mais fáceis, mas o necessário para um crescimento como pessoa e sem dúvida por me tornar o homem que sou hoje, a um amor incondicional que dedicou a mim nesses vários anos que passou ao meu lado, me apoiando em tudo que viria a fazer, OBRIGADO MAINHA.

Se eu soubesse antes o que sei agora,
erraria tudo exatamente igual.
(Humberto Gessinger).

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo um estudo teórico que produzirá conhecimento necessário para eventuais pesquisas sobre as causas e como minimizar defeitos metalúrgicos oriundos dos processos de soldagem. O trabalho se fundamenta em uma revisão literária abordando os principais defeitos metalúrgicos que possam apresentar pelo processo de soldagem, que é um dos mais usados hoje na união de dois ou mais metais. Tendo em vista que a soldagem afeta a microestrutura dos metais causando por muitas vezes descontinuidades na metalurgia influenciando na forma de desempenho do material soldado. Problemas estes como porosidade, inclusões de escoria e trincas que podem ocasionar a fratura frágil da união dos metais. Por último foi discutido resultados de teses já realizadas e publicadas sobre os principais defeitos encontrados nos processos de Soldagem.

Palavras chave: Soldagem, Defeitos Metalúrgicos, trincas.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ZF – Zona Fundida
ZAT – Zona Termicamente Afetada
MAG – Metal Active Gas (Metal Ativo Gás)
MIG – Metal Inert Gas (Metal Inerte Gás)
TIG - Tungsten Inert Gas (Tungstênio Inerte Gás)
TIH – Trincas Induzidas por Hidrogênio
TR – Trincas de Reaquecimento
CTT – Comprimento total de Trinca
CE – Carbono equivalente
As – Arsênio
B - Boro
C – Carbono
Cr - Cromo
Cu – Cobre
H – Hidrogênio
Mo – Molibdênio
N – Nitrogênio
O – Oxigênio
V – Vanádio
P – Fósforo
S – Enxofre
Sb – Antimônio
Sn – Estanho
mm – Milímetro
ml - Mililitro
KJ – Quilojoule

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 - Formas da Porosidade. Formas da Porosidade. (a) distribuída, (b) agrupada, (c) alinhada e (d) vermicular. (esquemática)	15
Figura 02 – Poros em junta soldada	15
Figura 03 – Macrografia da seção transversal da solda MAG	19
Figura 04 – Classificação de trincas de soldagem de acordo com sua localização.	20
Figura 05 – Comprimento total da trinca em função da tensão tangencial aumentada.	22
Figura 06 – Comprimento total da trinca em função da variação de pulsação.	23
Figura 07 – Comprimento total da trinca em função do espaçamento entre os pontos fundidos.	24
Figura 08 - Resultados dos ensaios de TIH realizados à temperatura ambiente (25°C).	28
Figura 09 – Resultados dos ensaios de TIH realizados com temperatura de preaquecimento de 70°C.	29

SUMÁRIO

1. OBJETIVOS	12
2. INTRODUÇÃO	13
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
3.1. PRINCIPAIS DESCONTINUIDADES METALÚRGICAS EM JUNTAS SOLDADAS	14
3.1.1. Porosidade	14
3.1.2. Inclusão de Escória.....	18
3.1.3. Trincas	20
3.1.3.1. Trincas por Solidificação.....	21
3.1.3.2. Trincas por Hidrogênio (TIH)	25
3.1.3.3. Trinca de Reaquecimento	30
4. CONCLUSÃO	32
REFERÊNCIAS.....	33

1. OBJETIVOS

Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é uma abordagem teórica sobre os problemas metalúrgicos mais recorrentes em processos de soldagem, apontando suas causas, consequências e como evita-los ou minimiza-los.

Objetivos Específicos

Revisão teórica sobre defeitos metalúrgicos em juntas soldadas, abordando os seguintes aspectos:

- Tipos de defeitos metalúrgicos em juntas soldadas.
- Descrição de como ocorrem/como são gerados.
- Descrições de quais consequências esses defeitos podem trazer à junta soldada;
- Descrições de como esses defeitos podem ser evitados ou minimizados.

2. INTRODUÇÃO

A soldagem é um dos muitos processos de união de peças e se destaca por sua praticidade e confiabilidade, dentre várias técnicas de união, como por parafusos, rebites e outros, no entanto, com a soldagem, a peça é unida permanentemente. Entretanto, durante ou após os processos de soldagem, há problemas que podem desenvolver-se comprometendo a integridade da junta soldada. Esses problemas podem ser desde mais comuns, como defeitos por falta de penetração, porosidade e distorções, até casos mais complexos como os defeitos metalúrgicos. A proposta deste trabalho é realizar uma revisão teórica sobre os defeitos metalúrgicos mais recorrentes. Como a soldagem é uma união permanente entre dois ou mais materiais, existe uma preocupação na tentativa de minimizar os defeitos decorrentes deste processo. Visto que uma vez realizada a solda e constatado um defeito, este poderá ser descartado e ser realizado um novo processo. Assim este estudo visa destacar os tipos de defeitos metalúrgicos mais decorrentes nas juntas soldadas e alguns métodos de minimizar estes defeitos e até mesmo evitá-los.

Segundo, Villani, Modenesi e Bracarense (2009) as trincas são os piores defeitos metalúrgicos, pois elas são grandes concentradores de tensão, estas devem ser evitadas uma vez que seu surgimento pode oferecer o início da fratura frágil da junta soldada. Uma trinca pode ser resultado da incapacidade do material em responder, as solicitações de tensão impostas pelo processo de soldagem, uma vez que estes processos são associados a uma transferência de calor elevada, provocando expansões e contrações do material. As trincas também estão muito associadas à presença de elementos químicos, em particular, o Hidrogênio.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. PRINCIPAIS DESCONTINUIDADES METALÚRGICAS EM JUNTAS SOLDADAS

Descontinuidade metalúrgica é uma interrupção da estrutura típica do material. A falta de homogeneidade nas características mecânicas, metalúrgicas ou mesmo física. As descontinuidades não são necessariamente um defeito, o que as diferencia é a capacidade de atender os requisitos mínimos de aceitação de sua norma de fabricação.

As descontinuidades podem se originar durante o processo de fusão da poça de solda, na desoxidação, na solidificação e nas transformações de fases no estado sólido, tanto na Zona Fundida (ZF) como na Zona Afetada pelo Calor (ZAC). Dentre as descontinuidades em juntas soldadas, as mais relevantes são porosidade, inclusão de escória e trincas.

3.1.1. Porosidade

De acordo com Villani, Modenesi e Bracarense (2009), os poros são formados pela evolução dos gases no processo de solidificação da solda. As bolhas de gás podem ser aprisionadas pelo metal solidificado à medida que a poça de fusão é deslocada, pode ocorrer uniformemente distribuída, alinhada, em grupos ou como porosidade vermicular, Conforme mostra a Figura 01. Contudo pequenas quantidades de poros na junta soldada não fazem com que este seja descartado, há um limite, em geral atestado por normas técnicas, pois estes poros podem afetar suas propriedades mecânicas, é diretamente associado à redução da seção efetiva da junta.

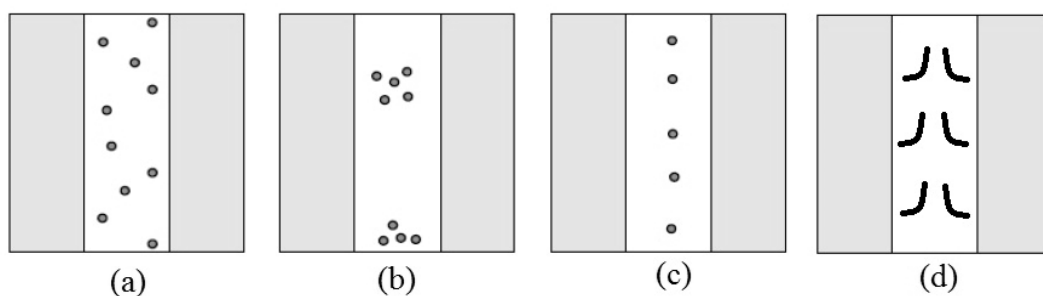


Figura 01 – Formas da Porosidade. (a) distribuída, (b) agrupada, (c) alinhada e (d) vermicular (esquemática).

FONTE: Modenesi, Marques e Bracarense (2009).

As causas da porosidade estão ligadas a interação entre gases e a poça de fusão, como também na umidade do metal de base e do arame de solda, pode esta relacionada a contaminações por óleo, graxa, ferrugem, etc. Tanto na junta de solda como no eletrodo. Segundo, Saunders (1997, apud Maia, 2005) água e hidrocarbonetos como óleos e graxas, quando presentes na superfície a ser soldada, ao entrarem em contato com o arco elétrico, são quebrados e liberam hidrogênio, contribuindo assim no enriquecimento desses gases na poça de fusão.



Figura 02 – Poros em juntas soldada.

Fonte: Sanches, Ricardo Almeida. Defeitos em soldas detectáveis através de inspeção visual 2010. Tese (Monografia em Engenharia civil) – Centro Universitário Luterano de Manaus, Manaus-AM. 2010.

Pode-se citar como interação entre diferentes gases e a poça de fusão, a interação entre O, N e H com o aço, alumínio, titânio e o zircônio, do O e H com o cobre e do N com o níquel. Estas interações podem resultar na dissolução e absorção do gás na poça de fusão causando o surgimento dos poros.

A solubilização dos gases é dada pela Lei de Sievert:

$$S_n = k * \sqrt{P_{G2}} \quad (1)$$

Onde k, é a constante que depende do sistema gás-metal e temperatura, e PG é a pressão parcial do gás sobre o metal. A solubilidade do gás no metal líquido pode ser expressa da forma de mililitro (ml) de gás por 100g de metal, como basicamente todo processo de interesse é endotérmico o valor de k aumenta com a temperatura.

Segundo Modenesi, Marques e Santos (2012), na soldagem a arco, diferentes gases são absorvidos de forma mais intensa que em outros processos. Uma exemplo disso é a absorção de hidrogênio (H) em soldas de aço carbono com eletrodo revestido de rutílico, que chega a 27ml/100g de metal depositado na temperatura ambiente. Acredita-se que a absorção mais intensa dos gases no arco está relacionada à quebra de moléculas e a ionização dos átomos pelo arco elétrico, aumentando a reatividade na poça de fusão.

Como a absorção dos gases na poça de fusão, e consequentemente, a formação de porosidade na junta soldada traz efeitos negativos na solda, estes podem ser evitados minimizando o contato do metal de base com esses gases, através de meios de proteção gasosa, de um gás de composição e pureza adequado com o processo. Ferraresi, Moraes e Lima (2003, apud Maia, 2005) comparando cordões de solda com e sem abertura de raiz, constataram que com a abertura de raiz a tendência de retenção de gases é menor, ajudando assim a minimizar a formação de poros. Na soldagem com eletrodo revestido devem-se usar eletrodos limpos e secos, assim como também os materiais de uso na soldagem, como equipamentos e os metais de base. Efetuar uso de parâmetros de soldagem adequados, evitando uma operação instável. A soldagem deve ser realizada, se possível, em ambientes protegidos contra correntes de ar, principalmente em

soldagem com proteção gasosa, exemplo, a soldagem por arco-submerso. Dois parâmetros então relacionados com os procedimentos de soldagem, a Energia de soldagem e a temperatura do pré-aquecimento, com o aumento destes implica em um aumento no tempo de solidificação da poça de solda, dando tempo hábil para que as bolhas geradas no processo de solda subam para a atmosfera e assim, seja liberada.

Segundo Modenesi (2004), o oxigênio dissolvido na poça de fusão pode reagir com o carbono do aço, causando a evolução e formação de monóxidos de carbono, resultando em porosidade na solda. Este tipo de porosidade pode ser evitado com o uso de desoxidantes que impeçam a reação do oxigênio com o carbono, o silício e o manganês são desoxidantes mais utilizados na soldagem a arco do aço. O nitrogênio, assim como o oxigênio, são impurezas prejudiciais para o metal de base, na soldagem a arco, a absorção ocorre primordialmente pelo excessivo alongamento no comprimento do arco. Este é, por exemplo, o caso de soldagem realizada pelo processo MAG.

Segundo Maia (2005), outra causa para a ocorrência de poros em juntas soldadas pode ser a formação da camada de nitreto no corte a plasma, onde é utilizado o nitrogênio como gás de proteção, este faz com que a região próxima à raiz da solda se enriqueça em nitretos. Trazendo assim problemas na falta de fusão da junta, e assim a formação de poros na região.

Ao realizar ensaios experimentais notou que a presença de uma camada de nitreto devido ao corte a plasma de ar comprimido em um tubo, tem influência significativa na formação de porosidade, principalmente em poros formado próximo a região próxima à raiz da solda. Isso ocorre por que os gases de plasma contem em sua composição nitrogênio, promovendo um enriquecimento de nitretos na camada formada no corte. Esta camada traz problemas na falta de fusão na junta, promovendo assim a formação dos mecanismos de poros.

A fim de evitar o enriquecimento da camada de nitreto e eliminar a formação de mecanismos de poros, Maia (2005) propôs o corte dos tubos, utilizando o oxigênio puro como gás de plasma. Desta forma a solda foi realizada sem a presença da formação da camada de nitretos na região fundida na extremidade do corte.

Após a soldagem de 381 eixos no chão de fábrica e em escala industrial, nenhum cordão de solda apresentou problemas com a porosidade. Assim pôde-se comprovar que os resultados experimentais foram eficazes. Eliminando a presença de porosidade em cordões de solda em eixos.

3.1.2. Inclusão de Escória

Este termo é usado para descrever partículas de óxidos e outros sólidos não metálicos, aprisionados entre os passes de solda ou entre o metal de solda e o metal de base geralmente formado por materiais poucos solúveis.

Modenesi (2001) descreve que a inclusão de escoria acontece quando partículas de óxidos ou outros metais ficam presos entre os passes da solda e ou entre o cordão e o metal de base. Para Villani, Modenesi e Bracarense (2009), existem várias reações que se processam na poça, provocando um surgimento de produtos insolúveis no metal líquido que tendem a se separar deste, e a formar a escória.

A manipulação incorreta do eletrodo pode provocar estes defeitos, como o ângulo do eletrodo e movimentos inadequados, de forma que a escoria flui à frente da poça de fusão. Na soldagem fora de posição plana e principalmente na remoção parcial da escória solidificada, entre os passes de solda, estes problemas são agravados quando o chanfro é estreito, dificultando que a escória se despeça entre os passes de solda. Em exames radiográficos pode-se observar que essas descontinuidades se mostram agrupadas em formatos alongados, ocasionando pontos de concentrações de tensões facilitando o surgimento de trincas na junta soldada, como pode ser observado na Figura 03.

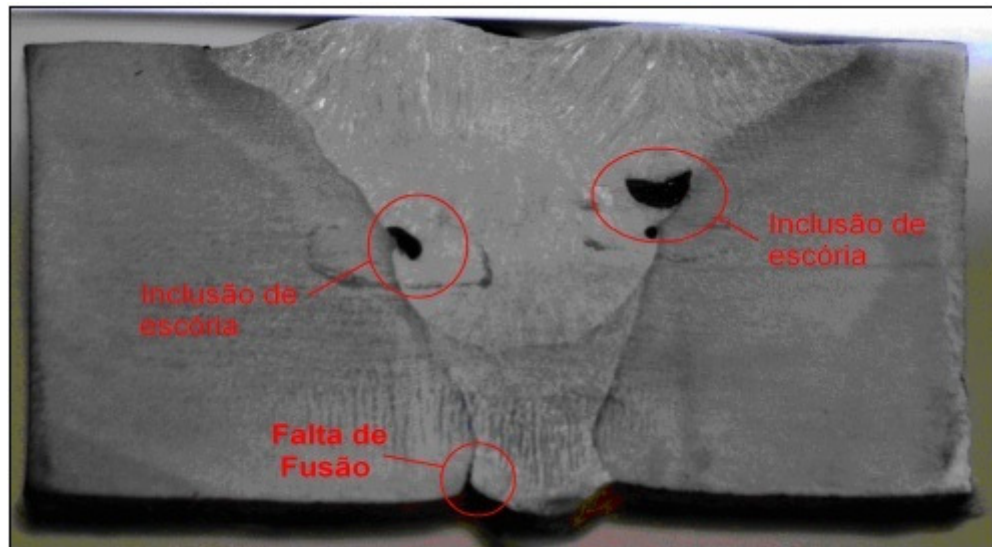


Figura 03 – Macrografia da seção transversal da solda MAG.

Fonte: http://connepi2009.ifpa.edu.br/connepi-anais/artigos/67_2182_560.pdf

Soldagens do tipo MAG ou Arame Tubular, são processos que utilizam gases como meio de proteção da poça de solda e do metal de base, com isso deve-se ficar atentos quanto a esses, pois os elementos dos gases podem interagir com a poça, provocando reações químicas e originando escória.

A manipulação correta e a limpeza entre passes da solda são importantes para minimizar os problemas com escórias no cordão de solda. Sendo possível minimizar a escória, para isso deve-se observar que o projeto da junta, esteja de modo a facilitar o acesso de deposição do cordão de solda. Também influi o acabamento do cordão, com acabamento côncavo facilita a remoção da escória mais do que um cordão com acabamento convexo.

Alguns métodos de correção se fazem útil a fim de tentar corrigir o surgimento de escoria no processo por soldagem, tais como;

- Remover totalmente a escoria antes de aplicar outro cordão de solda, fazendo uso de uma picadeira, ou ate mesmo escova de aço.
- Ao substituir o eletrodo, limpe o final do cordão de solda para começar outro passe de solda, para recomençar a soldagem em uma superfície limpa.

3.1.3. Trincas

As trincas podem ser externas, ou seja, na superfície da ZF, ZTA visíveis por inspeções superficiais na região da solda ou internas, estes só detectáveis em ensaios de radiografia. Quanto às dimensões podem ser micro ou macroscópicas, como mostra a Figura 04.

- Trincas durante a solidificação ocorrem no metal de base enquanto ainda quente.
- Trincas induzidas pelo hidrogênio ocorrem na ZTA após o resfriamento.

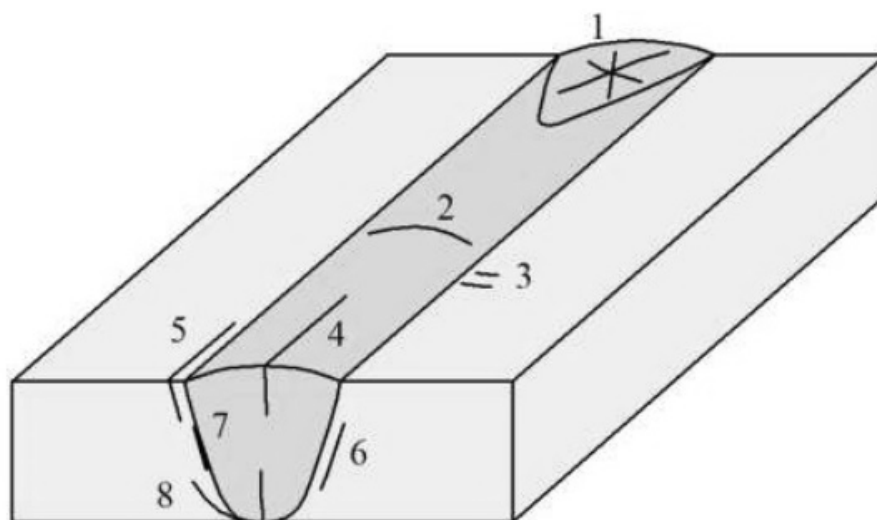


Figura 04 – classificação de trincas de soldagem de acordo com sua localização: (1) Trinca de cratera, (2) trinca transversal na ZF, (3) trinca transversal na ZTA, (4) trinca longitudinal na ZF, (5) trinca na margem da solda, (6) trinca sob o cordão, (7) trinca na linha de fusão e (8) trinca na raiz da solda.

Fonte: Modenesi, Marques e Santos (2013)

Segundo Pellini (1954), a deformação necessárias para haver as trincas, esta associada à capacidade da liga resistir aos esforços de solidificação. Além disso, a presença de impurezas durante este processo e tensões residuais, aumenta o tempo de solidificação do material, favorecendo assim o aparecimento de trincas.

Entre outros casos, fatores adicionais podem contribuir para formação de trincas em juntas soldadas, como concentradores de tensão, presença de elementos

de liga, capazes de aumentar a fragilização. Alguns dos mecanismos de formação de trincas em juntas de solda serão discutidos a seguir.

3.1.3.1. Trincas por Solidificação

As trincas por solidificação são uma das discontinuidades mais corriqueiras durante o processo de soldagem, ela tem origem intergranular, e ocorre durante o processo de solidificação do metal, esta associada com mais frequência em ligas de alumínio, mas podem aparecer em ligas de níquel, titânio e aços inoxidáveis austeníticos.

Segundo Wainer, Brandi e Mello (1992), as trincas de solidificação estão associadas à presença de fases de baixo ponto de fusão ou ao intervalo de solidificação da liga, daí se dá a ocorrência mais frequentes em ligas de alumínio. Estas trincas são propagadas intergranular, com a ação das tensões geradas no resfriamento da poça. Essa sensibilidade à trinca de solidificação ocorre em ligas que apresentam um intervalo de solidificação mais elevada, enquanto em ligas eutéticas essa suscetibilidade é descartada. Além desses fatores, influenciam nas condições de solidificação os parâmetros de soldagem, a energia de soldagem é diretamente proporcional à solidificação, que por sua vez é inversamente proporcional ao quadrado da diferença entre a temperatura de fusão e o pré-aquecimento do metal de base.

As trincas por solidificação estão associadas à formação de um filme líquido nos contornos de grão, resultado da segregação associada à segunda fase. Com isso, grãos parcialmente solidificados ficam rodeados por líquido, fazendo com que a junta soldada perca grande parte da sua resistência mecânica. Fazendo com que entre os contornos de grãos não se unam e a uma separação intergranular, ocasionando a trinca por solidificação.

Martins (2000) ao estudar a minimização de trincas de solidificação em ligas de alumínio soldada com corrente alternada pulsada, pelo processo de soldagem TIG, caracterizou o efeito destas trincas sendo influenciado em virtude de três variáveis, o efeito da tensão tangencial aumentada, o efeito da variação da potencia do arco entre os períodos de pico e base e o efeito do espaçamento entre os pontos

fundidos. Para melhor entender os resultados serão analisados os gráficos obtidos através de seus experimentos. Conforme a Figura 05 pode-se notar que o fator de maior influência, tensão tangencial, no Comprimento Total de Trincas (CTT) mostrou-se diretamente proporcional ao aumento do CTT.

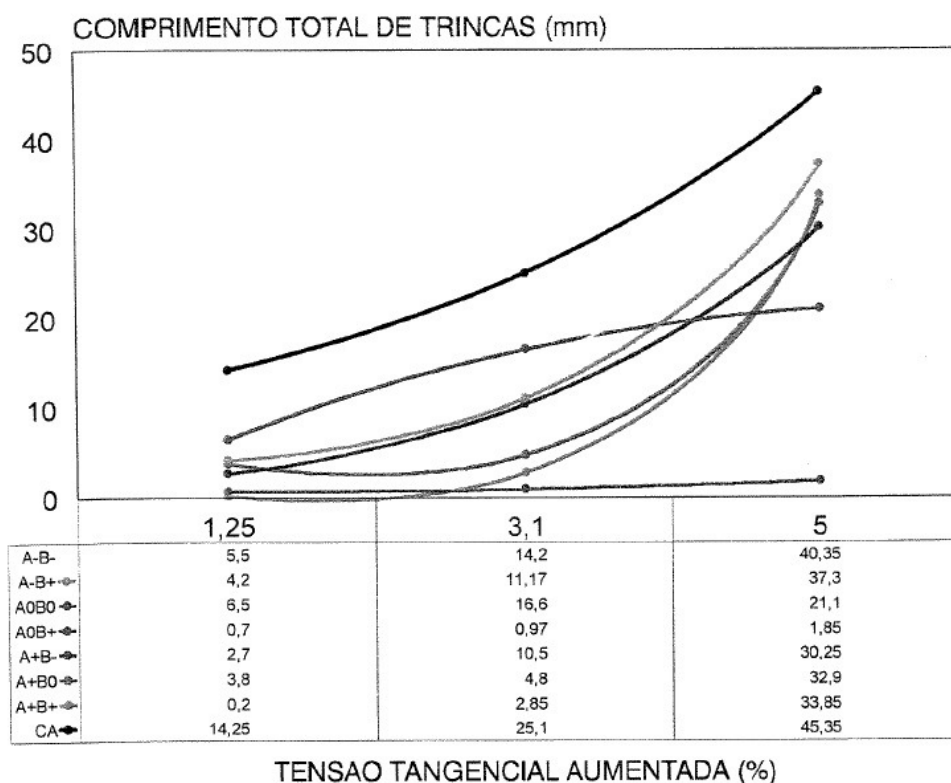


Figura 05 – Comprimento total da trinca em função da tensão tangencial aumentada.

Fonte: Martins, Fábio. **Minimização de trincas de solidificação em ligas de alumínio soldadas (GTAW) com corrente alternada pulsada**. 2000. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2000.

Para Martins (2000) com o uso de corrente alternada pulsada a incidência de trincas por solidificação foi menor do que com a utilização de corrente sem pulso. Foi constatado, que 51 ensaios realizados com corrente alternada pulsada apresentavam valores de comprimento máximo de trincas inferiores aos obtidos por corrente alternada sem pulsação, enquanto apenas três ensaios não mostraram esses resultados, em termos relativos isso representa aproximadamente 94,5% dos ensaios realizados com corrente alternada pulsada resultou em uma diminuição da incidência de trincas por solidificação.

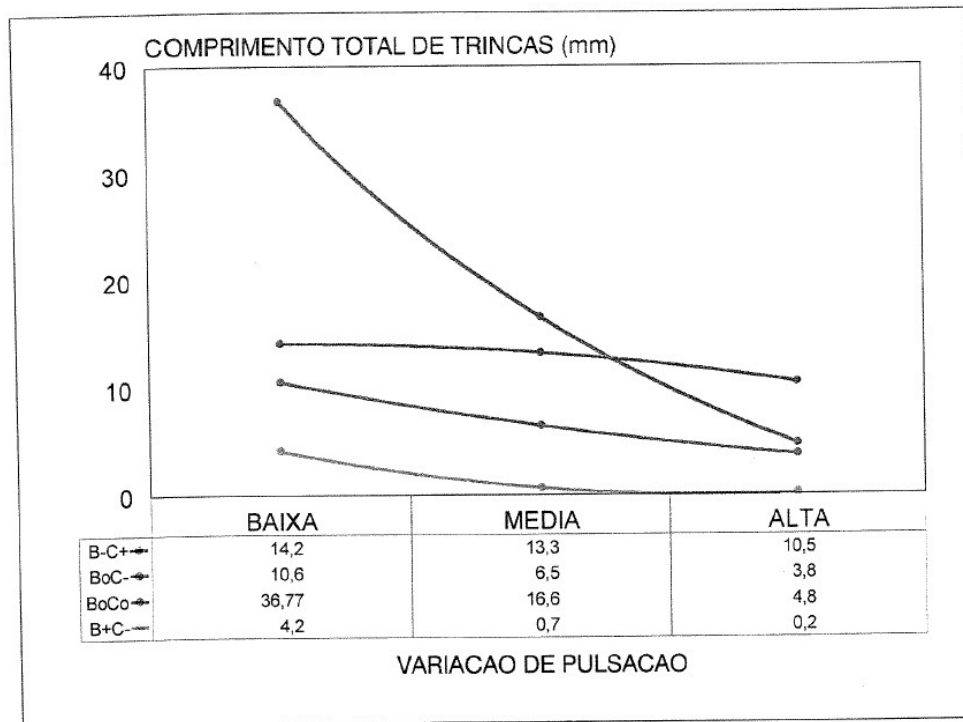


Figura 06 – Comprimento total da trinca em função da variação de pulsação.

Fonte: Martins, Fábio. **Minimização de trincas de solidificação em ligas de alumínio soldadas (GTAW) com corrente alternada pulsada**. 2000. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2000.

Na figura 06, pode-se perceber que a variação da pulsação é inversamente proporcional a ocorrência de trincas, ou seja, quanto maior a intensidade entre o potencial do arco elétrico entre os períodos de pico e base, menor se torna a ocorrência de trincas por solidificação. Para Martins (2000), isto ocorreu devido à ação mais energética do arco da soldagem. O mecanismo metalúrgico que aconteceu foi à quebra de dentritas pela ação do arco, que atuavam como agente nucleadores de novos grãos no centro da zona de fusão.

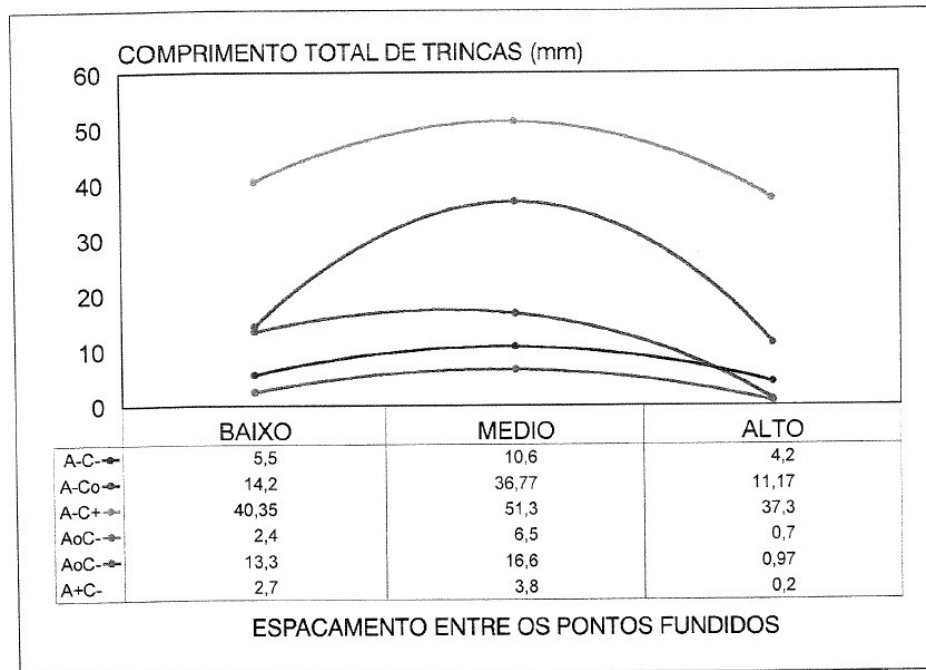


Figura 07 – Comprimento total da trinca em função do espaçamento entre os pontos fundidos.

Fonte: Martins, Fábio. **Minimização de trincas de solidificação em ligas de alumínio soldadas (GTAW) com corrente alternada pulsada**. 2000. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2000.

A relação entre o comprimento total de trinca e os pontos fundidos é observada analisando a figura 07. Nela foram traçadas curvas representativas de ensaios onde foi variado o espaçamento entre soldas, adotando os valores de baixo (0,5mm), médio (1,0mm) e alto (1,5mm). A ocorrência de trinca apresentou um aumento entre os níveis baixo e médio, e uma diminuição entre os níveis de médio e alto. Onde os menores valores de trinca foram observados nos níveis de alto.

Para Martins (2000), entre os níveis de baixo e médio, ocorreu uma tendência ao aumento de trincas devido ao espaçamento de 0,5mm, isto fez com que a sucessão de pulsos serem tão rápida, que não ouvi tempo para o metal se solidificar, conferindo pouca resistência mecânica a solda. Com o espaçamento de 1,0mm o tempo para a poça de fusão solidificar-se tornaria maior, porem não suficiente para o surgimento da união solido-solido. O preenchimento das trincas no metal de solda ocorre em menor escala, pela menor disponibilidade de liquido remanescente, com isso aumentando a incidência de trinca. Com o espaçamento de 1,5mm o tempo de solidificação entre um pulso e outro já era grande o suficiente

para que surjam os pontos de contato entre os grãos semisolidificados, visto que ainda aparecem trincas, mesmo que em menor quantidade. Estes pontos de contato permite uma maior resistência mecânica à solda, motivo pelo qual a incidência de trincas diminua.

Conforme os resultados obtidos por Martins (2000) encontrou a melhor condição para a minimização da ocorrência de trincas por solidificação, utilizando arco pulsado com corrente alternada. Tais parâmetros são baixa tensão tangencial aumentada, alta variação de pulsação e baixo espaçamento.

Conclui-se que as trincas por solidificação são influenciadas tanto pelos materiais como também, pelos processos de soldagem. Segundo Modenesi (2004), em soldas de aços transformáveis, em particular, aço carbono e aço-manganês não é muito comum o surgimento desse tipo de trinca. Podendo ocorrer mais frequentemente aos seguintes casos:

- Na soldagem com processos de alta energia, como eletro-escoria e arco submerso, onde a participação do metal de base na formação da poça de fusão contribui para elevar o volume deste, favorecendo a intensa segregação. A trinca então é formada, pelo aumento da razão entre a penetração e largura da solda.
- Na soldagem de juntas com abertura da raiz muito alta ou alinhamento inadequado.
- Na soldagem de peças sujas ou contaminadas, seja por óleo ou graxas.

3.1.3.2. Trincas por Hidrogênio (TIH)

Este tipo de defeito, também conhecido na literatura por trinca a frio, é segundo Modenesi, Marques e Santos (2012), um dos maiores problemas da soldagem, pois ocorre em faixas de temperaturas baixas. Charkravarti e Bala (1989, apud Fraga, 2005) menciona que as TIH ocorrem a faixas relativamente baixas de temperatura, tipicamente abaixo de 100°C. Sawhill Jr, Dix e Savage (1974, apud Fraga, 2005) especificam uma faixa de temperatura entre 200°C e -100°C. Podendo ocorrer tanto na ZTA como na ZF.

Segundo Wainer, Brandi e Mello (1992), pode aparecer alguns dias após o termino da soldagem, razão pela qual, é necessária a realização de ensaios não destrutivos, em um intervalo de tempo de ate 48 horas. Apresentam-se tanto longitudinal, transversal e superficial, a partir de concentradores de tensão. As trincas induzidas por hidrogênio ocorrem nas condições que existe a presença de hidrogênio na região da solda, tensões residuais e externas, microestrutura suscetível e baixas temperaturas.

De acordo com Modenesi, Marques e Santos (2013), durante a soldagem, o hidrogênio proveniente da umidade são dissociados pelo arco e entra em contato com a poça de fusão ficando em solução após a solidificação, atingindo tanto na ZF quanto na ZTA. A fragilização por hidrogênio é intensa na temperatura ambiente. Microestruturas de elevada dureza, principalmente a martensita, são em geral, mais sensíveis a trincas por hidrogênio. Fórmulas como a do carbono equivalente servem para avaliar a sensibilidade do metal de base à formação de fissuras por hidrogênio, uma fórmula muito utilizada, de acordo com Modonesi, Marques e Santos (2004), para esses fins é a que se apresenta a seguir.

$$CE = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Cu}{15} + \frac{\%Mo}{4} + \frac{\%Ni}{15} + \frac{\%Cr}{5} + \frac{\%P}{3} \quad (\% \text{ em peso}) \quad (2)$$

Um critério simples baseado nesta fórmula é considerando que se $CE < 0,4$, o material é insensível ao hidrogênio, caso $CE > 0,6$, este por sua vez é bastante sensível à fissuração por hidrogênio e medidas especiais devem ser adotadas, como exemplo, processos que exijam baixos níveis de hidrogênio e pré-aquecimento.

A liberdade de escolha no processo de soldagem adequado é muitas vezes limitada por considerações práticas e econômicas. Exigências com as propriedades mecânicas, principalmente a tenacidade, forçam a escolha de um determinado processo de soldagem do que a outro. Segundo Modenesi (2004) processos que utilizam elevadas energias de soldagem apresentam menos risco com o surgimento de trincas induzidas por hidrogênio, a exemplo disso é na soldagem por arco submerso e eletroescória. Já soldagem que utilizam eletrodos revestidos, como rutílico e celulósicos, é muito comum o seu uso em aços de baixo carbono. Porém

aços ligados e de alta resistência o uso de eletrodos básicos são mais utilizados por garantir a baixa quantidade de hidrogênio na soldagem, entretanto exigindo cuidados especiais no seu armazenamento e uso, pois este por serem higroscópicos adquire umidade pelo meio facilmente.

Por fim, as trincas por hidrogênio podem ser evitadas com o uso de um pré-aquecimento, esta medida reduz a velocidade de resfriamento, possibilitando uma estrutura menos dura na ZTA. Dando mais tempo para que o hidrogênio escape da peça sem que este atinja a temperatura de fragilização por este elemento. O pré-aquecimento pode ser uniforme ao longo de toda peça, ou em caso de peças de dimensões muito grande, podem ser pré-aquecidas na ZF e na ZTA. Neste caso a literatura mostra que se deve aquecer ao longo de uma faixa de 75 mm de cada lado da junta a ser soldada.

De acordo com Modenesi (2004) a forma da escolha da temperatura de pré-aquecimento não é simples, devido a um grande número de variáveis envolvidas, tais como, custo, composição do aço, espessura, tipo de junta, teor de hidrogênio, entre outros. De forma geral, a escolha da temperatura do pré-aquecimento é feita tomando como base normas técnicas, teste de fissuração e experiências prévias.

Em casos especiais, em que há sensibilidade a trincas por hidrogênio, a junta pode ser submetida ao pós-aquecimento, este processo permite que o hidrogênio escape da região de solda, para surtir efeito esta temperatura do pós-aquecimento deve ser superiores a 200°C em intervalos de tempo de aproximadamente 2 horas, com resfriamento final lento, até a temperatura ambiente.

Fraga (2005) analisou três principais variáveis influenciadoras para a formação do mecanismo de trincas induzidas por hidrogênio, dimensão de rebaixo, energia de soldagem e temperatura do pré-aquecimento. Em seus estudos experimentais foi utilizado como material de base um aço ASTM A-285 grau C, como metal de adição um arame tubular de classificação AWS E71T-1 e o CO₂ como gás de proteção auxiliar.

Para melhor entendermos os resultados deste estudo em questão, serão analisadas aqui em duas figuras (Figura 08 e Figura 09). Com os resultados obtidos nos experimentos relação às variáveis de influências da temperatura (25°C e 70°C) e dimensões de rebaiços (0,5mm e 1,0mm) no mecanismo de TIH.

Dimensão do Rebaixo	Energia de Soldagem de 1,6kJ/mm			Energia de Soldagem de 1,0kJ/mm		
	% de TIH	Média (%)	Desvio Padrão	% de TIH	Média (%)	Desvio Padrão
0,5mm	33,4	33,0	(1,1)	35,6	39,7	(6,7)
	33,0			33,8		
	34,3			40,6		
	31,5			48,8		
1,0mm	39,7	36,1	(10,0)	30,2	40,9	(10,0)
	48,6			48,8		
	28,4			49,8		
	27,7			34,6		

Figura 08 - Resultados dos ensaios de TIH realizados à temperatura ambiente (25°C).

Fonte: Fraga, Francisco Edson Nogueira. **Variáveis de influencia do teste G-BOP** 2005. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP. 2005.

Na Figura 08, são apresentados os resultados de ensaios TIH, onde se manteve a temperatura ambiente (25°C) constante, e variou a Energia de Soldagem (1,6 e 1,0 KJ/mm) e a Dimensão de Rebaixo (0,5 e 1,0mm).

Observa-se que com a redução da energia de soldagem de 1,6 KJ/mm para 1,0 KJ/mm com a dimensão de rebaixo a 0,5 mm ouve um aumento no percentual de TIH de 20%. Já com o aumento da dimensão de rebaixo nas mesmas condições de energia de soldagem, ouve um aumento no percentual de TIH de 13%.

Pode-se perceber também na figura 08, que com o aumento da dimensão de rebaixo de 0,5 mm para 1,0 mm, e mantendo a energia de soldagem a 1,6 KJ/mm ouve um aumento no percentual de TIH, da ordem de 10%. Já nas condições realizadas a 1,0 esse aumento não foi significante, apenas 3% de aumento do percentual de TIH.

Isso mostra que das variáveis de influencia do percentual de Trincas Induzidas por Hidrogênio, a mais significante é a energia de soldagem. Com um pequeno aumento da mesma há um aumento considerável no percentual de TIH.

Outra variável estudada por Fraga (2005) foi a Temperatura do pré-aquecimento, na figura 09, são demonstrados esses resultados.

Dimensão do Rebaixo	Energia de Soldagem de 1,6kJ/mm			Energia de Soldagem de 1,0kJ/mm		
	% de TIH	Média (%)	Desvio Padrão	% de TIH	Média (%)	Desvio Padrão
0,5mm	19,1	21,9	(8,8)	46,2	36,1	(7,8)
	11,3			34,9		
	25,5			36,1		
	31,8			27,3		
1,0mm	9,3	14,8	(8,0)	21,3	27,7	(4,4)
	9,0			31,0		
	26,0			28,1		
	15,1			30,3		

Figura 09 – Resultados dos ensaios de TIH realizados com temperatura de preaquecimento de 70°C.

Fonte: Fraga, Francisco Edson Nogueira. **Variáveis de influencia do teste G-BOP** 2005. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP. 2005.

Na mesma analogia adotada nas condições com temperatura ambiente de 25°C, adotaremos aqui em condições com temperatura de pré-aquecimento de 70°C. Observa-se que com a redução da energia de soldagem de 1,6 KJ/mm para 1,0KJ/mm ouvi um aumento significativo de TIH da ordem de 65% para os ensaios realizados com dimensão de rebaixo de 0,5 mm. E na dimensão de 1,0 mm este aumento foi mais significativo ainda, da ordem de 88%.

Quanto a influencia do Rebaixo, ao contrario do que foi observado na figura 08, com ensaios feitos a temperatura ambiente de 25°C, observa-se na figura 09, resultados de ensaios de TIH com temperatura de preaquecimento de 70°C, que com o aumento do rebaixo de 0,5 mm para 1,0 mm ouvi uma redução no percentual de TIH para ambos os níveis de energia de soldagem da ordem de 32% para ES de 1,6 KJ/mm e 23% para ES de 1,0 KJ/ mm. Levando em consideração a variável de rebaixo nas figuras 08 e 09, a respeito desta variável não a representação

significativa da influencia nos percentuais de TIH tanto para a temperatura ambiente, 25°C, quanto para a temperatura de pré-aquecimento de 70°C.

Observou-se que as duas condições de ensaios a temperatura ambiente, tiveram influencia na tendência do aumento da TIH com o aumento do rebaixo, enquanto que, nos testes realizados a temperatura de pré-aquecimento houve uma diminuição nas trincas. Portanto não evidenciando nenhuma tendência nos resultados de TIH em função da variável de rebaixo. Por fim, comparando as figuras 08 e 09, foi observado por Fraga (2005) que a utilização de uma temperatura de pré-aquecimento de 70°C causou uma tendência à diminuição das TIH, variando de 10% a 60% de redução em cada uma das condições analisadas por ele.

3.1.3.3. Trinca de Reaquecimento

Segundo Modenesi (2004), as fissurações no reaquecimento esta ligada ao endurecimento dos grãos na região da ZTA pela precipitação dos carbonetos durante o tratamento térmico. Em componentes soldados com grandes espessuras são submetidos a tratamentos térmicos para o alívio de tensões para se tentar reduzir as tensões residuais, assim evitar problemas futuros como fratura frágil, corrosão sob tensão etc. em certos casos, podem surgir o aparecimento de trincas onde podem ser percebidas em ensaios não destrutivos. Trincas de Reaquecimento (TR) ocorrem principalmente quando os componentes têm paredes muito grandes na sua espessura, em geral superiores a 50 mm, e são submetidas a um tratamento de alívio de tensão, como na fabricação de vasos de pressão e de equipamentos para a indústria nuclear e centrais térmicas. A formação da trinca ocorre durante o tratamento térmico, possivelmente durante o aquecimento entre 450 e 700°C em materiais como aços cromo-molibdênio-vanádio e aços inoxidáveis austeníticos. Em Aços transformáveis, a sensibilidade a trincas por reaquecimento do material aumenta com a presença de elementos como, C, Cr, Cu, Mo, B, V. Já para aços de baixa liga, a sensibilidade às trincas ao reaquecimento pode ser quantificada pela fórmula empírica de Nakamura, dada por:

$$\Delta G = \%Cr + 3,3\% Mo + 8,1\%V + 10\%C - 2 \quad (3)$$

Onde ΔG é o valor da sensibilidade do material e quando maior ou igual à zero, este aço é considerado sensível à trinca.

Este problema também pode ocorrer em elementos que não foram submetidos a tratamento térmico após a soldagem, mas que trabalham em temperaturas elevadas, entre 300 e 500°C. Neste caso a trinca pode ocorrer após vários anos de serviços. As TR são também observadas na ZTA de componentes de aços estruturais revestidos superficialmente de soldagens de aços inoxidáveis austeníticos, neste caso, as trincas se formam principalmente nas regiões da ZAC aquecidas acima de 1200°C.

Os principais fatores que influenciam este tipo de trinca são temperatura, tensões residuais elevadas. Segundo Modenesi (2004) existem evidências de que a presença de elementos residuais, como P, S, B, Sn, As e Sb, em aços transformáveis, aumenta a sensibilidade à fissuração do reaquecimento pela sua segregação para os contornos de grão nos quais são formadas e propagadas as trincas. Estes problemas são mais severos em juntas soldadas por arco submerso ou eletro-escória do que em juntas soldadas em processos que utilizam baixa energia como MAG/MIG ou arco manual. Pois a formação de uma microestrutura de baixa ductilidade na ZTA e de granulação grosseira aumenta as chances de trincas.

Como medida para se controlar ou evitar o surgimento das trincas ao reaquecimento deve-se realizar o tratamento de alívio de tensão em componentes do equipamento, ao invés do equipamento por completo, a fim de se minimizar o grau de restrição, esmerilhar as margens das soldas pode ser um bom artifício para minimizar os concentradores de tensão, selecionar o metal de base usando a fórmula empírica de Nakamura para avaliar o grau de sensibilidade e limitar o vanádio a um teor máximo de 0,10%.

4. CONCLUSÃO

Como foi possível observar, na maioria das discontinuidades apresentadas neste trabalho, as causas para o surgimento destes é relativamente simples de serem minimizadas, basta, contudo uma orientação mais rigorosa no trato com o processo em um todo:

- Proteger a poça de fusão, da ação nociva de correntes de ar. Impedindo que gases presentes no meio interajam com a poça e assim minimizando a ocorrência de porosidade na junta soldada.
- Fazer uso de eletrodos em bom estado, livre de impurezas e umidade. A cada passo de solda limpar o cordão para a remoção de eventuais escoria presentes para não estas não fique aprisionadas entre os cordões de solda.
- Atentar a seleção de materiais menos sensíveis a formação de microestruturas de elevada dureza, capazes de serem fragilizadas pela presença de hidrogênio. Como também evitar a presença de hidrogênio na região da solda, Proporcionar uma região livre de umidade e impurezas.

Para a execução de uma soldagem livre ou com valores aceitáveis de discontinuidades faz necessário determinar parâmetros e variáveis, descritas neste trabalho, antes da realização do processo de soldagem. Outro fator importante é a mão de obra do processo, pois a mesma deve ser conhecedora destes defeitos mais corriqueiros e serem treinadas para que não seja ele um fator influenciador nos eventuais problemas nos processos de soldagem.

REFERÊNCIAS

MARQUES, Paulo Villani.; MODENESI, Paulo José.; BRACARENSE, Alexandre Queiroz. **Soldagem Fundamentos e Tecnologia**. 3ª ed – Belo horizonte: Editora UFMG, 2009.

WAINER, E; BRANDI, S. D; MELLO, F. C. **Soldagem: processos e metalurgia**, 2ª ed. São Paulo/SP: Editora Bulcher, 1992.

MODENESI, Paulo J.; MARQUES, Paulo V.; SANTOS, Dagoberto B. **Introdução à Metalúrgica da Soldagem**, 2012.

MODENESI, Paulo J. **Soldabilidade dos Aços Transformáveis**, 2004. Universidade Federal de Minas Gerais.

BRAGA, Eduardo de Magalhães. **Efeito do nitrogênio nas trincas de solidificação em soldas de aço austenítico**, 2002. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2002.

http://connepi2009.ifpa.edu.br/connepi-anais/artigos/67_2182_560.pdf

Maia, Ivan Gonçalves. **Efeito da camada de nitretos na porosidade em soldas de eixos automotivos**, 2005. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2005.

Martins, Fábio. **Minimização de trincas de solidificação em ligas de alumínio soldadas (GTAW) com corrente alternada pulsada**. 2000. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2000.

Fraga, Francisco Edson Nogueira. **Variáveis de influencia do teste G-BOP** 2005. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP. 2005.

Sanches, Ricardo Almeida. **Defeitos em soldas detectáveis através de inspeção visual** 2010. Tese (Monografia em Engenharia civil) – Centro Universitário Luterano de Manaus, Manaus-AM. 2010.