

UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ
Fernando Ferreira dos Santos

TRINCA Á QUENTE EM AÇO BAIXA LIGA

Taubaté – SP

2017

Fernando Ferreira dos Santos

TRINCA Á QUENTE EM AÇO BAIXA LIGA

Dissertação apresentada para obtenção do Título de Pós Graduação de Engenharia Mecânica com Especialização em Solda do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté.

Área de Concentração: Engenharia Mecânica
Orientador: Prof. Mestre Kleber Ferreira Vasconcellos.

Taubaté – SP

2017

Fernando Ferreira dos Santos

TRINCA Á QUENTE EM AÇO BAIXA LIGA

Dissertação apresentada para obtenção do
Título de Pós Graduação de Engenharia
Mecânica com Especialização em Solda do
Departamento de Engenharia Mecânica da
Universidade de Taubaté.
Área de Concentração: Engenharia Mecânica

Data: / /2017

Resultado: _____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Universidade de Taubaté

Assinatura: _____

Prof. Dr. Universidade de Taubaté

Assinatura: _____

*Dedico este trabalho á Deus minha orientação maior
neste caminho.*

AGRADECIMENTOS

À minha família que desde o início esteve ao meu lado, me incentivando e apoiando.

Ao Professor Mestre Kleber Ferreira Vasconcellos, pela impecável orientação, confiança e incentivo atribuído ao desenvolvimento desta dissertação.

À Universidade de Taubaté e Professores, que forneceram todos os recursos e conhecimentos necessários para a minha formação e para realização deste trabalho.

A todas as pessoas que gentilmente colaboraram, respondendo os questionários, e tornaram possível a conclusão deste trabalho.

“A mente que se abre a uma nova ideia jamais voltará ao seu tamanho original”.

(Albert Einstein)

RESUMO

O processo de soldagem abrange um cenário que envolve muitos fenômenos metalúrgicos dentre os quais, exemplificando, ocorrem a fusão, solidificação, transformações no estado sólido, deformações causadas pelo calor e tensões de contração, que podem ocasionar muitos problemas no processo. As ocorrências destes problemas no processo podem ser evitados ou resolvidas através do conhecimento e da aplicação de princípios metalúrgicos apropriados na realização do processo de soldagem. Os aços de baixa liga contêm pequenas quantidades de elementos de liga que objetivam produzir consideráveis melhorias em suas propriedades onde a adição desses elementos visa a melhoria da resistência mecânica e a tenacidade de forma a diminuir ou aumentar a resposta ao tratamento térmico e para retardar os processos de formação de carepa e corrosão. Um dos principais defeitos que pode ocorrer no processo de soldagem de aços de baixa liga é a trinca a quente ou trinca de solidificação o que denota a importância da compreensão de sua soldabilidade no processo. Este trabalho tem como objetivo geral a proposta de realizar uma pesquisa do conceito de Trincas a quente em aço de baixa liga e suas principais características através da exposição de informações claras e objetivas. O método de trabalho utilizado nesta pesquisa pode ser caracterizado como “Estudo Bibliográfico” porque, a pesquisa científica realizada, visa coletar e analisar dados retirados de acervos bibliográficos acadêmicos e científicos. Concluindo nesta pesquisa que existem uma diversidade de mecanismos de fissuração que podem ser associados ao processo de soldagem e não há como padronizar a sua ocorrência o que pode ser realizada é de acordo com cada particularidade do processo elaborar através de tentativas as suas possíveis causas e, desta forma, planejar a execução do processo.

Palavras-chave: Aços Baixa Liga; Trincas a quente; Soldabilidade.

ABSTRACT

The welding process encompasses a scenario involving many metallurgical phenomena, among which, for example, fusion, solidification, solid state transformations, heat deformations and contraction tensions occur, which can cause many problems in the process. The occurrence of these problems in the process can be avoided or solved through the knowledge and application of appropriate metallurgical principles in the realization of the welding process. Low alloy steels contain small amounts of alloying elements that aim to produce considerable improvements in their properties where the addition of these elements aims at improving mechanical strength and toughness in order to decrease or increase the response to the heat treatment and to delay the processes Of rust and corrosion. One of the main defects that can occur in the welding process of low alloy steels is the hot crack or solidification crack which denotes the importance of understanding its weldability in the process. This work has as a general objective the proposal to carry out a research on the concept of hot-cutting in low-alloy steel and its main characteristics through the presentation of clear and objective information. The work method used in this research can be characterized as "Bibliographic Study" because, the scientific research carried out, aims to collect and analyze data taken from academic and scientific bibliographical collections. Concluding in this research that there is a diversity of cracking mechanisms that can be associated with the welding process and there is no way to standardize its occurrence what can be done is according to each particularity of the process to elaborate through its possible causes and , In this way, plan the execution of the process.

Keywords: Low Alloy Steels; Hot starch; Weldability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Processo de Solidificação dos Metais.....	5
Figura 2 - Processo de solidificação de uma junta soldada.	6
Figura 3 - Diagrama de equilíbrio metaestável Fe-Fe ₃ C.....	7
Figura 4 - Caracterização das Trincas a quente.....	9
Figura 5 - Fragilização e Solidificação.....	10
Figura 6 - Fissuração no centro da solda.	10
Figura 7 - Trinca na Soldagem da Chapa e da Bucha	11
Figura 8 - Tabela de composição química do material da Chapa e da Bucha	12
Figura 9 - Classificação do tipo de fissuração de acordo com a localização da trinca	14
Figura 10 - Microtrincas de solidificação na ZF de uma liga Fe-Mn-Al-Si-C. 200x	11
Figura 11 - Exemplo de trinca no centro do cordão.....	11
Figura 12 - Nível de restrição em função de (a) das dimensões da solda em relação a junta e, (b) da rigidez da montagem.....	16
Figura 13 - Formação de Trincas de Solidificação em (a) cordões côncavos em soldas de filete, (b) cordões côncavos em passe de raiz, (c) soldas de topo com elevada razão penetração - largura e (d) em cordões em forma de sino.	17

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	111
1.1.	Estrutura do Trabalho	12
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	13
2.1	Aço Baixa Liga.....	13
2.2	Processo de Soldagem em Aço Baixa Liga.....	15
2.2.1	Diagrama de Fases	16
2.2.2	Diagrama de equilíbrio Fe-C	17
2.3	Trincas a Quente em Aço Baixa Liga	
3	MATERIAIS, EQUIPAMENTOS E MÉTODO	21
3.1	Trincas a quente em aços de baixa liga	21
3.2	Principais causas.....	22
3.3	Principais Possibilidades de Soluções	27
3.4	Método de Trabalho	29
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	30
5	CONCLUSÕES	32
	REFERÊNCIAS.....	34

1. INTRODUÇÃO

O processo de soldagem abrange um cenário que envolve muitos fenômenos metalúrgicos dentre os quais, exemplificando, ocorrem a fusão, solidificação, transformações no estado sólido, deformações causadas pelo calor e tensões de contração, que podem ocasionar muitos problemas no processo.

As ocorrências destes problemas no processo podem ser evitados ou resolvidos através do conhecimento e da aplicação de princípios metalúrgicos apropriados na realização do processo de soldagem.

Estes princípios metalúrgicos forma a base para aplicar o conhecimento da metalurgia de soldagem o que denota que esta deve acompanhado o conhecimento fornecido pelos conceitos da metalurgia geral

A partir dos conceitos da metalurgia geral seguem os princípios da metalurgia de soldagem considerando algumas questões e pontos de vista divergem entre ambas baseadas em particularidades das propriedades do material e do processo.

Os aços de baixa liga contêm pequenas quantidades de elementos de liga que objetivam produzir consideráveis melhorias em suas propriedades onde a adição desses elementos visa a melhoria da resistência mecânica e a tenacidade de forma a diminuir ou aumentar a resposta ao tratamento térmico e para retardar os processos de formação de carepa e corrosão.

Um dos principais defeitos que pode ocorrer no processo de soldagem de aços de baixa liga é a trinca a quente ou trinca de solidificação o que denota a importância da compreensão de sua soldabilidade no processo (American Welding Society – AWS, 1996).

O trabalho tem como objetivo analisar as condições em que pode ocorrer o fenômeno de trinca a quente.

O que se busca ainda neste trabalho, é a disseminação de informações aos interessados no conteúdo referente as trincas em aço baixa liga brevemente comentadas de forma a prover clareza e entendimento exemplificadas principalmente através do processo de soldagem de MIG/MAG.

1.1. Estrutura do Trabalho

A dissertação está estruturada em capítulos e subcapítulos.

O capítulo 1 introduz o tema, o problema que motivou a pesquisa, os objetivos gerais e específicos, a justificativa, a delimitação do assunto e a estrutura do trabalho.

O capítulo 2 apresenta uma revisão da literatura sobre o processo de soldagem e a ocorrência de trincas a quente em aços de baixa liga onde no Subcapítulo 2.1 trata das principais características dos Aços de Baixa Liga, no Subcapítulo 2.2 trata das principais características do Processo de Soldagem em Aços de Baixa Liga e no Subcapítulo 2.3 trata das principais características de Trincas a Quente em Aços de Baixa Liga.

O capítulo 3 trata da metodologia adotada na pesquisa, apresentando como foi feita a coleta e a obtenção dos dados e como foi conduzida.

No capítulo 4 são apresentados os resultados e discussões.

O capítulo 5 apresenta as considerações finais, conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

Por fim, são apresentadas as referências utilizadas neste trabalho.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Aço Baixa Liga

Os aços de baixa liga recebem esta denominação por conter em suas propriedades melhorias realizadas através da presença de pequenas quantidades de elementos de liga (Fortes *et. al.* 2005; Campos, 2010).

A adição dos elementos de liga ocorre para que se realize a melhoria da resistência mecânica e da tenacidade (resistência e aderência) favorecendo a diminuição ou o aumento da resposta ao tratamento térmico e para favorecer o retardamento dos processos de formação de carepa e corrosão (Fortes *et. al.* 2005; Campos, 2010).

Os elementos que compõem e formam os aços de liga comumente são o manganês, silício, cromo, níquel, molibdênio e vanádio (Fortes *et. al.* 2005; Campos, 2010).

Os efeitos causados nas propriedades dos aços pelo Manganês (Mn) em teores até 1,0% nos aços de baixa liga agem como agente desoxidante ou dessulfurante, ou seja, realiza a combinação com o oxigênio e o enxofre onde realiza a neutralização do efeito indesejável que esses elementos possuem quando estão em seu estado natural aumentando a resistência à tração e a temperabilidade dos aços o que o torna presente em todos os aços de liga (Fortes *et. al.* 2005; Campos, 2010).

O Cromo (Cr) quando combinado com o carbono se torna um poderoso elemento de liga produzindo o aumento da dureza dos aços que adicionados as suas propriedades de endurecimento aumentam a resistência à corrosão e a resistência do aço a altas temperaturas (Fortes *et. al.* 2005; Campos, 2010).

O Níquel (Ni) se torna a principal propriedade do aço em razão da melhoria que exerce na sua ductilidade ou sua tenacidade ao entalhe o que o torna o mais eficaz dos elementos de liga para o aumento da resistência ao impacto do aço a baixas temperaturas (Fortes *et. al.* 2005; Campos, 2010).

O molibdênio (Mo) melhora fortemente a característica do aço em função do aumento da profundidade de têmpera característica do aço e, quando combinado com

o cromo (aços ao cromo-molibdênio) promove o aumento da resistência do aço a altas temperaturas (Fortes *et. al.* 2005; Campos, 2010).

A função mais comum do silício (Si) nos aços é como agente desoxidante e, promotor do aumento da resistência dos aços sendo necessária maior atenção no seu manuseio, pois se for utilizado em quantidades excessivas ocasiona a redução da ductilidade (Fortes *et. al.* 2005; Campos, 2010).

O Vanádio (V) realiza a manutenção do tamanho de grão pequeno após a realização do tratamento térmico e, auxilia no aumento da profundidade de têmpera e resistência ao amolecimento dos aços durante os tratamentos térmicos de revenimento (Fortes *et. al.* 2005; Campos, 2010).

Desta forma, os aços de baixa liga definem a sua composição com teor total de liga de 1,5% a 5,0% e podem conter quatro ou cinco desses elementos de liga em diversos teores objetivando melhorar a dureza, a resistência mecânica, a ductilidade e a resistência à corrosão (Fortes *et. al.* 2005; Campos, 2010).

Os elementos de liga impactam influenciando na intenção de ligar, ou seja, realizar a adição um elemento a um metal ou um não metal aos metais puros tais como cobre, alumínio ou ferro melhorando as suas propriedades o que nos dias atuais inclusive faz com que dificilmente se encontre no mercado um metal realmente puro para o processo de soldagem (Fortes *et. al.* 2005; Campos, 2010).

Dentre as suas principais características denotam vantagens em sua utilização nos produtos e processos que exigem maior limite de escoamento e de resistência principalmente em comparação aos aços doces ou aços carbono estruturais (Fortes *et. al.* 2005; Campos, 2010).

A sua característica de altas razões resistência-peso possibilita a redução do peso de carros, caminhões, equipamentos pesados, entre outros (Fortes *et. al.* 2005; Campos, 2010).

Se os aços de baixa liga possuem adição de níquel se tornam com utilização frequente em situações de baixa temperatura, pois, os aços acabam por perder muito de sua resistência na exposição de altas temperaturas e os aços que se tornam mais frágeis a baixas temperaturas não são confiáveis em aplicações críticas o que faz com que seja necessário a adição de pequenas quantidades de cromo ou de molibdênio (Fortes *et. al.* 2005; Campos, 2010).

2.2 Processo de Soldagem em Aço Baixa Liga

Todos os metais se solidificam na forma cristalina, sendo assim, conforme ocorre o aumento da temperatura de um cristal mais energia térmica, ou seja, mais calor será absorvido pelos átomos ou moléculas, e desta forma aumentará seu movimento de vibração (Fortes *et. al.* 2005; Campos, 2010).

Com a vibração, aumenta a distância entre os átomos o que fará com que o arranjo cristalino se desfça e ocorra que o cristal seja fundido o que faz com que no aço de baixa liga, o qual contém dois ou mais tipos de átomos, esta fusão comece a uma determinada temperatura, porém, sem ser de forma completa o que determina a utilização de uma temperatura mais alta na busca de atingir a combinação de líquido e sólido dentro de uma faixa de temperaturas (Fortes *et. al.* 2005; Campos, 2010).

À medida que ocorre o resfriamento do metal até seu ponto de solidificação, um pequeno agrupamento de átomos começa a se arranjar numa estrutura cristalina e o líquido remanescente se solidifica na forma de cristais adjacentes até o término da solidificação (Figura 1) (Fortes *et. al.* 2005; Campos, 2010).



Figura 1 – Processo de Solidificação dos Metais.
Fonte: (Fortes *et. al.* 2005).

A Figura 1 relaciona as características do processo de solidificação dos metais.

A formação dos primeiros cristais ocorre no local de menor temperatura da solda, no ponto de encontro entre o metal fundido e o metal de base não fundido o que caracteriza os grãos no centro como menores e com textura mais fina que aqueles

que se localizam nos limites exteriores do depósito de solda afetando a sua integridade e as propriedades mecânicas de uma liga (Figura 2) (Fortes *et. al.* 2005; Campos, 2010).



Figura 2 – Processo de solidificação de uma junta soldada.
Fonte: (Fortes *et. al.* 2005).

A Figura 2 relaciona as características do processo de uma junta soldada.

Quando a solda apresenta grãos pequenos se torna mais resistente e mais dúctil que a que apresenta grãos grandes os quais tendenciam o surgimento de trincas e afetam adversamente as propriedades do metal ocasionando o aumento da ocorrência de fissuração durante a soldagem ou tratamento térmico (Fortes *et. al.* 2005; Campos, 2010).

A granulação fina ocasiona melhores propriedades mecânicas e desempenho para aplicação em temperatura ambiente e em baixas temperaturas e, metais com granulação grosseira em altas temperaturas (Fortes *et. al.* 2005; Campos, 2010).

2.2.1 Diagrama de Fases

Os Diagramas binários de fases são utilizados para realizar a definição das regiões de estabilidade das fases que podem ocorrer em um sistema que usualmente fica sob constante pressão e, tem como ordenada, a temperatura e, como abcissa, a composição.

A importância destes diagramas para o estudo de ligas metálicas está na indicação das fases esperadas a uma dada temperatura para uma composição específica válidas, contudo, somente para condições de equilíbrio.

Indicando um dos sistemas simples de dois componentes representa uma única fase sólida além do líquido (sistema isomorfo).

2.2.2 Diagrama de equilíbrio Fe-C

O estudo da constituição e estrutura das ligas de ferro (aços e ferros fundidos) deve começar com o diagrama de equilíbrio Fe-C.

As características básicas deste sistema influenciam até o comportamento dos aços mais complexos, ou seja, as fases do diagrama Fe-C persistem nestes aços, sendo, entretanto, necessário examinar os efeitos dos elementos de liga sobre a formação e propriedades destas fases.

O diagrama de equilíbrio Fe-C fornece um conjunto de informações fundamentais para o conhecimento e compreensão dos aços carbono e aços ligados na sua imensa variedade (Figura 3).

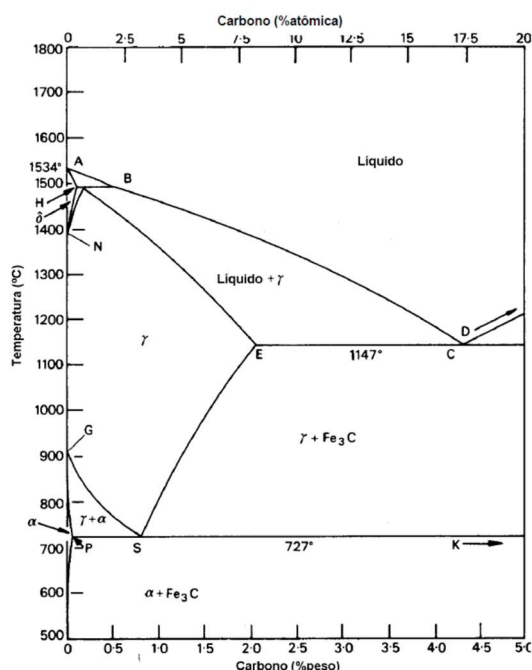


Figura 3 – Diagrama de equilíbrio metaestável Fe-Fe₃C.

A área deste diagrama acima da linha líquido corresponde à região de estabilidade do líquido.

A área abaixo da linha sólido representa a região de estabilidade do sólido.

Entre estas duas regiões, as duas fases (sólido e líquido) coexistem em equilíbrio.

2.3 Trincas a Quente em Aço Baixa Liga

Durante o processo de soldagem podem ocorrer defeitos ou imperfeições dentre os quais os principais são as trincas de solidificação ou trincas a quente, trincas induzidas por hidrogênio no metal de solda, porosidade, inclusões de escória ou outras inclusões, trincas de cratera, falta de fusão e perfil do cordão desfavorável (Fortes *et. al.* 2005; Campos, 2010).

Para a pesquisa realizada neste trabalho a abordagem deste capítulo será em relação as trincas de solidificação ou trincas a quente.

Trincas ou fissuras caracterizam um dos defeitos considerados mais graves de descontinuidade em uma junta soldada (Fortes *et. al.* 2005; Campos, 2010; Novais, 2010).

Quando no material ocorrem tensões de tração desenvolvidas em um material fragilizado com a incapacidade de deformação plástica para a absorção destas tensões ocorre as fissuras ou trincas (Fortes *et. al.* 2005; Campos, 2010; Novais, 2010).

Os desenvolvimentos de tensões de tração elevadas na região soldada são resultantes das expansões e contrações térmicas localizadas acrescidas da associação do aquecimento desuniforme característico do processo de soldagem e, ainda, das variações de volumes devido as transformações de fases e como resultados das ligações entre as peças soldadas e o restante da estrutura (Fortes *et. al.* 2005; Campos, 2010; Novais, 2010).

A ocorrência da fragilização surge na região de solda devido a resultantes de mudanças estruturais, da absorção de elementos nocivos, de alterações posteriores durante as operações do processamento de produção como no tratamento térmico

por exemplo e, em serviço como por exemplo, nas alterações elevadas de temperatura (Machado, 1980; Fortes *et. al.* 2005; Campos, 2010; Novais, 2010).

Os problemas de trincas podem ocorrer nos aços na localização das zonas ZF, ZTA e no metal de base e podem ser desde macroscópicas ou macrofissuras (até vários centímetros de comprimento) ou microscópicas ou microfissuras (visíveis somente com um microscópio) (Fortes *et. al.* 2005; Campos, 2010; Novais, 2010).

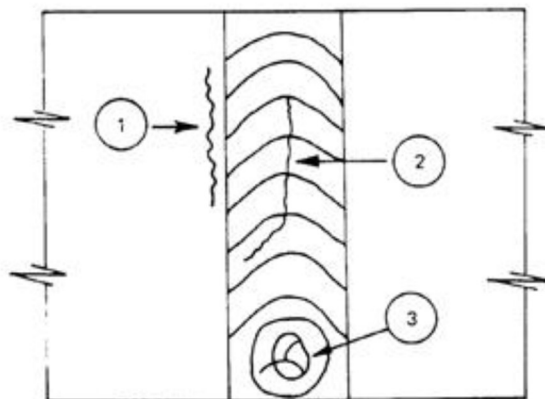


Figura 4 – Caracterização das Trincas a quente.
Fonte: (Fortes *et. al.* 2005).

A Figura 4 representa a caracterização das Trincas a quente na ordem:

- 1- Trinca longitudinal na ZTA.
- 2- Trinca longitudinal na ZF.
- 3- Trinca de cratera.

Os aços podem ser soldados com metal de solda de composição similar à do metal de base, porém, os aços de baixa liga, devido a esta caracterização, se tornam fragilizados em sua composição de ligas para a ocorrência da fissuração de solidificação ou a quente (Machado, 1980; Fortes *et. al.* 2005; Campos, 2010; Novais, 2010).

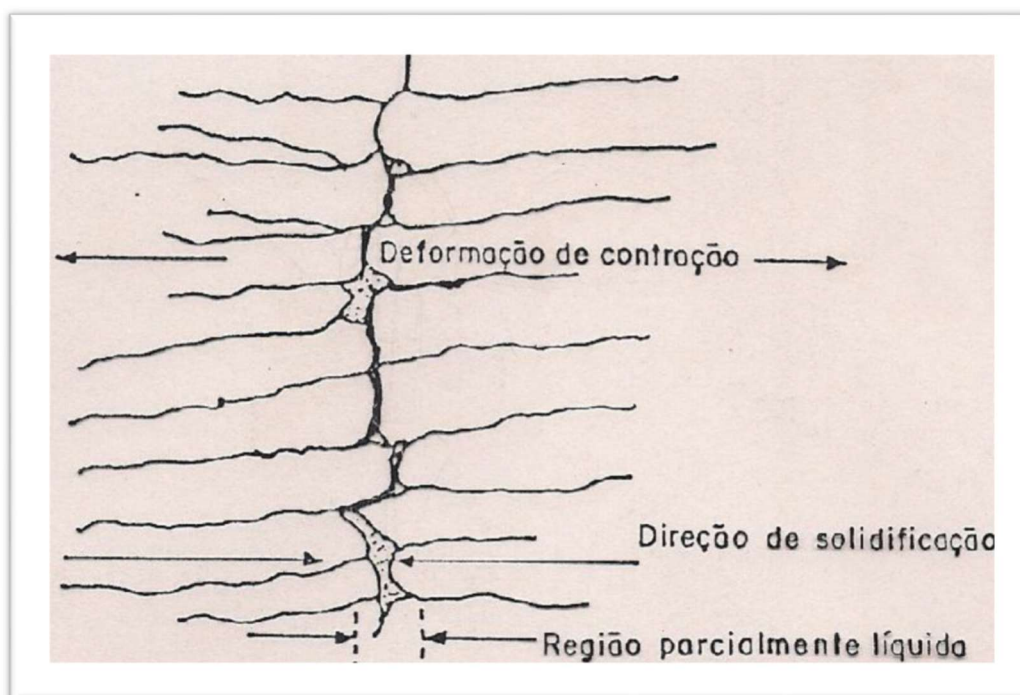


Figura 5 – Fragilização e Solidificação.
Fonte: (Fortes *et. al.* 2005).

A Figura 5 representa a esquematização da fragilização e solidificação.

A ocorrência da fissuração ou trincas a quente é fortemente influenciada pela direção de solidificação na solda, ou seja, se os grãos de lados opostos apresentam juntamente crescimento numa forma colunar, impurezas e constituintes de baixo ponto de fusão podem ser segregados na frente de solidificação na formação de uma linha fraca no centro da solda (Figura 6) (Fortes *et. al.* 2005; Campos, 2010; Novais, 2010).

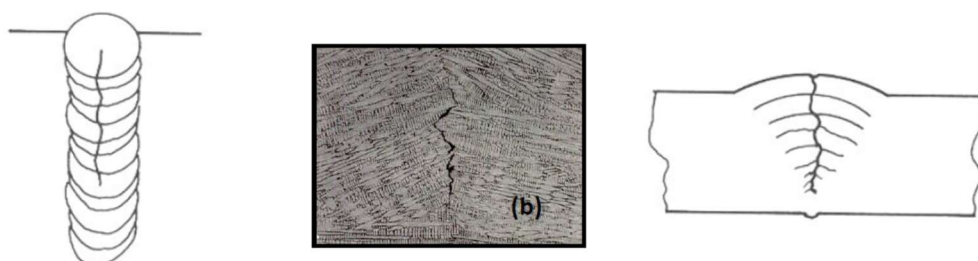


Figura 6 – Fissuração no centro da solda.
Fonte: (Fortes *et. al.* 2005).

3 MATERIAIS, EQUIPAMENTOS E MÉTODO

Neste capítulo ocorre uma breve descrição acerca de possibilidades de causas e de como de sanar os problemas de trincas a quente em aços de baixa liga.

3.1 Trincas a quente em aços de baixa liga

As trincas são frequentemente formadas em soldas e podem ser associadas basicamente a dois fatores onde o primeiro se refere a uma sollicitação, isto é tensões mecânicas de tração e, o segundo, a uma incapacidade (fragilização), muitas vezes momentânea, do material de acomodação desta sollicitação deformando-se plasticamente.

A fragilização da região da soldagem e de regiões adjacentes à solda pode ocorrer por diversos motivos, quer seja por formação de filmes de líquido em contornos de grão a alta temperatura, crescimento de grão, presença de hidrogênio dissolvido no material, precipitação, entre outros, ou durante e após a soldagem.

Em um processo de determinada empresa ocorre trincas a quente no processo de soldagem da chapa e da bucha.

A figura 7 demonstra um exemplo de ocorrência de trincas a quente no processo de soldagem da chapa e da bucha.



Figura 7 – Trinca na Soldagem da Chapa e da Bucha.

Neste caso o questionamento abrange acerca das causas da ocorrência da trinca com possibilidades acerca da composição química ou do gap como principais causas do problema.

A Figura 8 demonstra a tabela de composição química do material.

Bucha		Chapa	
C	0,020	C	0,0600
Si	0,020	Si	0,4580
Mn	0,100	Mn	1,7200
P	0,008	P	0,0110
S	0,007	S	0,0024
Al	0,034	Al	0,0390
N	0,005	Cu	0,0100
		Ni	0,0100
		Cr	0,5840
		Mo	0,0030
		V	0,0100
		Nb	0,0452
		N	0,0061
		Sn	0,0020
		AS	0,0150
		Ti	0,1490
		B	0,0004
		Ca	0,0024

Figura 8 – Tabela de composição química do material da Chapa e da Bucha.

De acordo com a tabela de composição química os elementos que poderiam causar os problemas de fissuração à quente, estão com valores muito baixos (CP e S).

Na realização da soldagem se o gap for realizado muito aberto fará com que o cordão tenha largura excessiva o que fará com que haja demora para a solidificação e assim, o cordão será tensionado e não terá a resistência mecânica suficiente para resistir.

Para o gap a solução será montar e soldar com abertura máxima de 3 mm e utilizar técnica filetada para rápido resfriamento.

3.2 Principais causas

Dentre a diversidade de mecanismos que ocasionam as trincas a quente em aços de baixa liga muitos estão relacionados a problemas do material e a problemas

de operação e operação subsequente onde o que causa mais impacto são as condições do serviço do que as operações de soldagem em si, apesar que o segundo pode causar significativo impacto no primeiro.

3.2.1 Tipos de Mecanismos

Os problemas de fissuração em soldagem podem ocorrer nos aços com as fissuras localizadas na ZF, na ZTA e no metal base e, pode ser macroscópicas ou microscópicas.

Estes diferentes mecanismos de fissuração associados a soldagem ocorrem para diferentes materiais e processos de soldagem e, outros mecanismos são mais comuns para determinado tipo particular de material.

A classificação dos diferentes tipos de mecanismos de fissuração possui alta complexidade e, portanto, de acordo com a literatura aplicada ocorre uma tentativa de sua classificação aplicável aos aços de baixa liga baseadas na temperatura e no momento da formação da descontinuidade.

Desta forma, de acordo com cada classe de problemas os mecanismos conhecidos são:

a. Problemas de fissuração que ocorrem durante a soldagem quando há submissão do material a altas temperaturas, o que significa que está superior a metade de sua temperatura liquidus, em graus Kelvin, ou mais comumente, próximas desta temperatura classificam três tipos:

- . Fissuração na solidificação (2) (4)
- . Fissuração por liquação na ZTA (3) (7)
- . Fissuração por perda de ductilidade (5)

Estas formas de fissuração são comumente referidas, principalmente a fissuração na solidificação como fissuração a quente.

b. Problemas de fissuração que ocorrem durante a soldagem ou logo após a operação quando há submissão do material a temperaturas inferiores a sua metade de temperatura liquidus se classificam em dois tipos:

- . Fissuração pelo Hidrogênio ou a frio (2) (3) (4)
- . Decoesão Lamelar (3)

c. Problemas de fissuração que ocorrem durante operações subsequentes de fabricação ou durante o serviço se classificam em quatro tipos:

- . Fissuração ao Reaquecimento
- . Decoesão Lamelar
- . Fissuração por corrosão sob tensão
- . Fadiga

Destes mecanismos, os dois últimos possuem mais relação com as condições de serviço do que com a operação embora esta exerça importante efeito.

A Figura 9 demonstra os principais tipos de mecanismos causadores da fissuração.

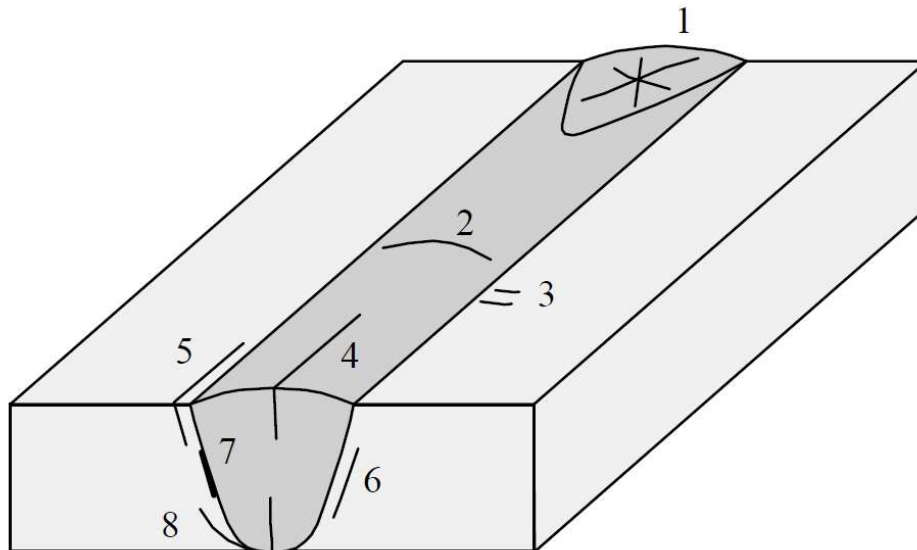


Figura 9 – Classificação do tipo de fissuração de acordo com a localização da trinca.

- (1) Fissuração na cratera.
- (2) Fissuração Transversal na ZF.
- (3) Fissuração Transversal na ZTA.
- (4) Fissuração Longitudinal na ZF.
- (5) Fissuração na margem da Solda.
- (6) Fissuração sob o cordão.
- (7) Fissuração na linha de fusão.
- (8) Fissuração na raiz da solda.

3.2.2 Líquidos intergranulares

Neste tipo de trinca ocorre a associação de presença de segregações formadoras de filmes líquidos intergranulares nas etapas finais de solidificação (Figura 10).

As resultantes apresentam características decorrentes de exposição a altas temperaturas, entre os contornos de grão, interdentríticos ou entre células (Figura 11) o que representa uma morfologia intergranular em relação á estrutura primária de solidificação.

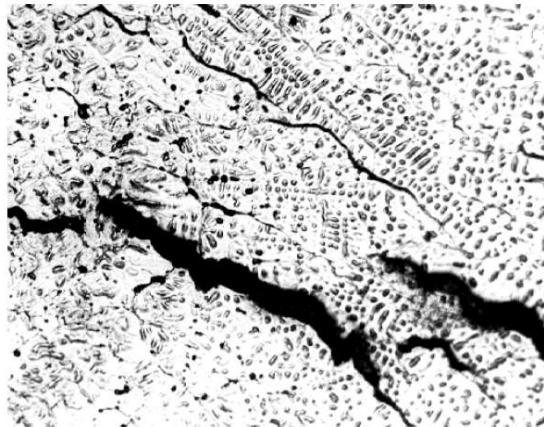


Figura 10 – Microtrincas de solidificação na ZF de uma liga Fe-Mn-Al-Si-C. 200x.

A alta temperatura de formação reflete no afloramento de trinca externa e superfície geralmente oxidada.

Comumente as trincas se caracterizam como longitudinais e superficiais ocorrendo com maior frequência no centro do cordão (Figura 11) e, ainda, podem ser transversais ou na cratera, radiais podendo originar trincas internas.

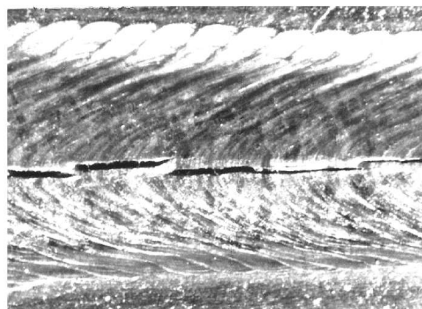


Figura 11 – Exemplo de trinca no centro do cordão.

O nível de restrição das juntas soldadas aumenta a ocorrência de formação das trincas, ou seja, as trincas ocorrem decorrentes de maior ou menor espaço de falta de liberdade das juntas no momento do movimento e acomodação das tensões da soldagem e, se tornam ainda maior, conforme a espessura da junta soldada e maior rigidez no processo de montagem (Figura 12).

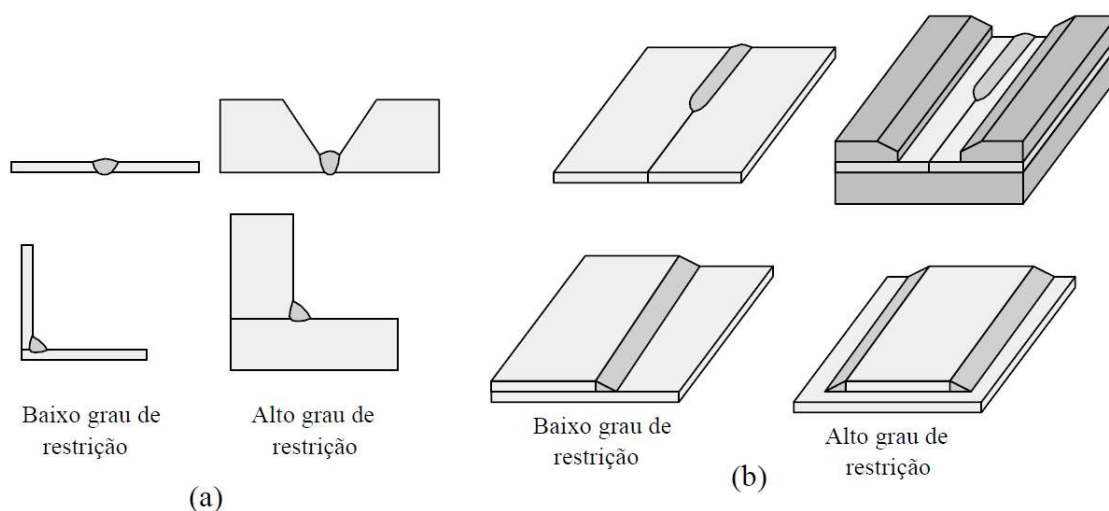


Figura 12 – Nível de restrição em função de (a) das dimensões da solda em relação a junta e, (b) da rigidez da montagem.

A sensibilidade da fissuração recebe também influência do padrão de solidificação e da forma da poça de fusão (Figura 13).

Desta forma, quando as condições de solidificação favorecem o crescimento dos grãos colunares, para o interior da poça se torna favorável ao aparecimento de trincas e, sua ocorrência é favorecida em cordões onde é elevada a penetração e a largura, com formato de sino ou com acabamento côncavo conforme mostra a Figura 13.

O princípio do efeito é similar ao da fundição onde há menor facilidade de partes da poça de fusão serem alimentadas por metais líquidos nas etapas finais da solidificação.

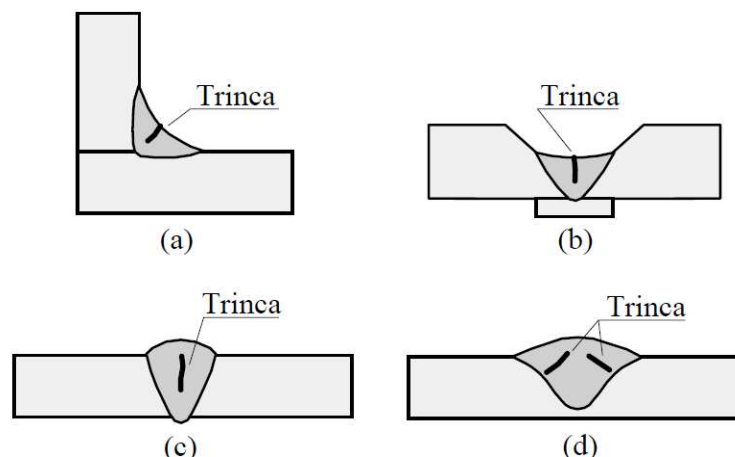


Figura 13 – Formação de Trinças de Solidificação em (a) cordões côncavos em soldas de filete, (b) cordões côncavos em passe de raiz, (c) soldas de topo com elevada razão penetração - largura e (d) em cordões em forma de sino.

3.3 Principais Possibilidades de Soluções

Neste capítulo será abordado as principais causas dos problemas que se forem evitados eliminam as possibilidades de ocorrência de trinças.

O conhecimento das informações acerca de seu processo se tornam essenciais a considerar que cada processo tem suas particularidades, portanto, serão elencadas abaixo as principais possibilidades de soluções para a ocorrência de trinças a quente.

1. **Intervalo de Fragilização:** O intervalo de fragilização corresponde ao intervalo de temperatura entre a temperatura adequada e entre a que passa a modificar a ductilidade do material em uso. Neste caso quando a temperatura do material em uso passa a aumentar rapidamente ocasiona no intervalo de fragilidade indicando a sensibilidade do material em relação a fissura na solidificação.
2. **Molhabilidade dos contornos dos grãos:** A menor ou melhor capacidade do líquido de molhar os contornos do grão, ou seja, a sua capacidade de se espalhar na forma de filmes finos pode ser amenizada e prevenida através

da utilização dos Manganês tendendo a globulizar os sulfetos e reduzir a molhabilidade.

3. **A redução da perda de tenacidade na zona fundida:** A redução do maior problema de soldabilidade envolvem a redução da perda de tenacidade na zona fundida onde esta associação favorece o surgimento do problema com a formação de estruturas de granulação grosseira, durante a soldagem com elevado aporte térmico ou com a formação de martensita na soldagem com baixo aporte térmico.
4. **Descontaminação das peças:** A descontaminação das peças deve ser realizada antes de realizado o processo.
5. **Redução ou controle da soldagem com aporte térmico elevado:** A redução ou controle da soldagem com aporte térmico elevado favorece a eliminação das trincas o que pode ser realizado através da padronização de parâmetros definidos.
6. **Seleção adequada de consumíveis:** a seleção adequada de consumíveis impacta diretamente no metal de base.
7. **Seleção adequada e correta do projeto de execução:** a seleção adequada de um projeto ou execução corretos formam uma padronização e eliminam o problema do processo.

A trinca a quente está associada com a presença de segregações que levam à formação de filmes líquidos intergranulares, nas etapas finais da solidificação.

A chance de formação de trincas aumenta com o nível de restrição da junta, ou seja, a maior ou menor falta de liberdade que os membros da junta possuem para realizar os movimentos de acomodação das tensões resultantes da soldagem.

Para minimizar esta criticidade se torna necessário reduzir a espessura da junta e a rigidez da montagem.

A minimização de condições de solidificação que levem ao crescimento dos grãos colunares para o interior da poça minimizam o aparecimento de trincas através da redução das condições que ocorrem em cordões de elevada relação penetração/largura, com formato de sino ou de acabamento côncavo.

O princípio está relacionado com o efeito como ocorre em fundição, à menor facilidade de partes da poça de fusão serem alimentadas com metal líquido nas etapas finais da solidificação.

Reduzir a incapacidade do material se deformar e a ocorrência da presença de esforços de tração reduzem a ocorrência de tensões que eventualmente podem ultrapassar a capacidade de resistência do material.

Se nas etapas finais do processo de solidificação, quando os grãos ainda estão largamente separados por filmes de material líquido, existindo apenas poucos pontos de contato entre os grãos, ocorrer a fragilização, o material será incapaz de se deformar, porém, apresenta alguma resistência mecânica.

A identificação da temperatura na qual o material passa a possuir resistência mecânica ao final da solidificação possibilita novas ações ao processo.

3.4 Método de Trabalho

O método de trabalho utilizado nesta pesquisa pode ser caracterizado como “Estudo Bibliográfico” porque a pesquisa científica realizada, foi a pesquisa, coleta, análise e utilização das informações pertinentes para redação do conteúdo.

4 DISCUSSÕES

Na Soldagem dos aços de baixa liga demonstrado na exemplificação diferentes mecanismos, tanto no processo, como no material podem ser os causadores das resultantes da descontinuidade de trincas a quente.

Diante a sua complexidade uma proposta de sugestões e tentativas podem ser recomendadas objetivando sanar este problema o que inclui uma possibilidade de classificação aplicável a estes materiais baseada na temperatura e no momento em que ocorre a formação da descontinuidade baseados em alguns mecanismos de fissuração conhecidos.

A temperatura é expressa em graus Kelvin, ou seja, o material está submetido a alta temperatura, superior a metade de sua temperatura líquida ou ainda próxima a esta ocasionando a trinca de solidificação ou trinca a quente.

Ainda, dentro das possibilidades existe a compreensão bibliográfica de que a caracterização da fissuração que podem ocorrer neste processo de soldagem incluem determinantes das diversas formas que se realizem a soldagem.

Dentre os principais aspectos incluem a influência da composição química da solda ou do metal base ou de ambos, dos parâmetros de soldagem e dos níveis de tensão que sofre o material.

A complexidade do evento de ocorrência de trincas e sua formação em um determinado componente, processo ou material em si depende de inúmeros fatores e de sua respectiva caracterização sendo específica a cada caso.

Como apoio os autores sugerem ainda a complementação e a utilização de ensaios que devem ser determinados conforme cada caso e suas particularidades.

A seleção do metal de adição utilizada influencia determinantemente nas propriedades mecânicas e no projeto deve ser analisada a sua utilização e comportamento no processamento funcional de acordo com os detalhes de sua composição química considerando que muitas vezes a ausência de análise do projeto resulta na complexidade de fatores críticos no processo.

Como exemplo é possível indicar que para os Aços de Baixa Liga ao Níquel a variação dos teores de carbono, de manganês, de silício e de níquel o pré-aquecimento não é necessário com exceção para juntas de grande espessura, porém, para maiores teores de carbono, um pré-aquecimento de até 260°C deve ser usado,

embora para juntas de menos de cerca de 7 mm, este possa ser dispensado e o alívio de tensões após soldagem é recomendável.

Para os Aços de Baixa Liga ao Manganês o pré-aquecimento não é necessário para os menores teores de C e Mn, porém, para $C > 0,25\%$, um pré-aquecimento entre 120 e 150°C é necessário e, quando ocorre maiores teores de C e Mn e para juntas de grande espessura, a temperatura de pré-aquecimento pode atingir 300°C, sendo recomendado o uso de alívio de tensões.

5 CONCLUSÕES

As existências de uma diversidade de mecanismos de fissuração podem ser associados ao processo de soldagem, porém, de acordo com o material utilizado e o processo realizado se torna possível a caracterização e a diferenciação deste mecanismos associados e aplicados comumente para cada caso como ocorre nos aços de baixa liga.

A complexidade da identificação destes mecanismos e da resolução dos problemas de trincas a quente especificamente neste caso dos aços de baixa liga é notória.

Apesar da complicação desta “missão” se fez possível classificar a maior parte destes diferentes mecanismos minimizando assim a ocorrência dos problemas de trinca a quente.

Dentre as principais características que impactam no estudo deste tema os principais pontos podem ser definidos como os parâmetros envolvidos na soldagem a estrutura metalúrgica obtida e o conjunto de propriedades resultantes no processo.

A variação da quantidade de energia fornecida na soldagem para um processo específico determina a ocorrência de modificações na estrutura da solda especificamente na zona termicamente afetada e no componente.

A composição química da liga, dos materiais de solda, as velocidades de aquecimento e resfriamento associados aos outros fatores característicos do processo geram modificações na microestrutura e em suas propriedades mecânicas.

A microestrutura determina as propriedades dos metais e, portanto, a variação de suas propriedades quando conhecidas possibilitam determinar as resultantes possíveis e desta forma, que ações necessárias devem ser realizadas.

A adição de elementos a um metal puro pode influenciar a forma cristalina da liga resultante e as transformações induzidas por elementos de liga dependem do aporte térmico e da taxa de resfriamento que como as demais características quando controlados permitem promover a melhoria do processo.

Concluindo nesta pesquisa que a existem uma diversidade de mecanismos de fissuração que podem ser associados ao processo de soldagem e não há como padronizar a sua ocorrência o que pode ser realizada é de acordo com cada

particularidade do processo elaborar através de tentativas as suas possíveis causas e, desta forma, planejar a execução do processo.

REFERÊNCIAS

AWS, Welding Handbook, **Materials and Applications** – Part 1, American Welding Society, 8a Edição, Vol. 3, 1996.

AWS, Welding Handbook, **Materials and Applications** – Part 2, American Welding Society, 8a Edição, Vol. 4, 1998.

ASM, Metals Handbook – **Welding and Brazing**, American Society for Metals, 8a Edição, Vol. 6, 1971.

CAMPOS, Halinson Faustino Dias. **Técnicas de Soldagem aplicadas à Indústria de Petróleo e Gás**: Introdução aos Materiais Aplicados no Segmento de Petróleo e Gás. ESAB S.A. Indústria e Comércio. Segmento de Óleo e Gás, maio de 2010.

FORTES, Cleber; ARAÚJO, Welerson. **Metalurgia da Soldagem**. ESAB BR S.A. Assistência Técnica de Consumíveis – Desenvolvimento e Pesquisa. Segmento de Óleo e Gás. Apostila. Maio de 2005.

MACHADO, I.G; KISS, J.F. **Mecanismo e natureza das trincas de solidificação nas soldas**, partes I e II, Tecnologia de Soldagem. Associação Brasileira de Soldagem, São Paulo, 1980.

NOVAIS, Paulo Rogerio Santos de. **Avaliação das principais descontinuidades encontradas nas juntas soldadas, causas e possíveis soluções**. Contribuição técnica nº9. ABCM – Associação Brasileira de Construção Mecânica, 2010.