

ELISANDRO DANIEL DA LUZ DA SILVA

**INFLUÊNCIA DA CORRENTE ELÉTRICA NO
PROCESSO DE SOLDAGEM TIG EM CHAPAS DE
AÇO INOXIDÁVEL AISI 304**

JARAGUÁ DO SUL, 2013

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E
TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA
CAMPUS JARAGUÁ DO SUL - GERALDO WERNINGHAUS
CURSO SUPERIOR DE TÉCNOLOGIA EM FABRICAÇÃO
MECÂNICA**

ELISANDRO DANIEL DA LUZ DA SILVA

**INFLUÊNCIA DA CORRENTE ELÉTRICA NO
PROCESSO DE SOLDAGEM TIG EM CHAPAS DE
AÇO INOXIDÁVEL AISI 304**

**Trabalho de conclusão de
curso submetido ao Instituto
Federal de Educação, Ciência
e Tecnologia de Santa
Catarina como parte dos
requisitos de obtenção do
título de Tecnólogo em
Fabricação Mecânica.**

**Professor Orientador:
Ivan Hubert, Esp.**

JARAGUÁ DO SUL, 2013

S586i

Silva, Elisandro Daniel da Luz da

Influência da corrente elétrica no processo de soldagem TIG em chapas de aço inoxidável AISI 304 / Elisandro Daniel da Luz da Silva; orientador Ivan Luiz Hubert. – Jaraguá do Sul : IFSC, 2013.

73 f. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (tecnólogo) – Instituto Federal de Santa Catarina. Tecnólogo em Fabricação Mecânica.

Inclui bibliografia.

1. Soldagem TIG. 2. Corrente de soldagem. 3. Parâmetros.
I. Hubert, Ivan Luiz. II. Instituto Federal de Santa Catarina.
III. Título.

CDD 671.52

Sistema de Bibliotecas Integradas do IFSC
Biblioteca - Campus Jaraguá do Sul – Geraldo Werninghaus
Catalogado por: Khrisna Vivianne da Silva CRB 14/1229

INFLUÊNCIA DA CORRENTE ELÉTRICA NO PROCESSO DE SOLDAGEM TIG EM CHAPAS DE AÇO INOXIDÁVEL AISI 304

ELISANDRO DANIEL DA LUZ DA SILVA

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do Título de Tecnólogo em Fabricação Mecânica e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do curso de Tecnologia em Fabricação Mecânica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Jaraguá do Sul, 10 de dezembro de 2013.

Banca Examinadora:



Edson Teixeira, Me.



Ivan Hubert, Esp.



Alexandre Galiotto, Me.



Miriam Hennig, Me.

Dedico este trabalho a todas as pessoas
que deram alguma contribuição para
que ele se concretizasse.

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter me dado a força para superar as dificuldades enfrentadas na realização deste trabalho.

A todos os meus colegas de turma que de forma mútua me auxiliaram nesta tarefa.

Aos professores do Instituto e Técnicos de laboratório pela orientação no trabalho e execução dos ensaios.

A minha namorada Thaina que, por muitas vezes, me deu o incentivo que precisei.

"Independentemente das circunstâncias, devemos ser sempre humildes, recatados e despidos de orgulho".

Dalai Lama

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo contribuir, através de testes práticos e ensaios, para o melhor entendimento dos efeitos da corrente elétrica na soldagem de chapas de aço inoxidável, quando a junta estiver submetida a esforços de tração, sendo que não há uma especificação precisa acerca deste parâmetro quando relacionado à espessura do material, ficando esta variável oscilante dentro de uma faixa recomendada. Os resultados da soldagem realizada em faixas de corrente distintas e que estejam situadas dentro da faixa de corrente recomendada terão diferentes resultados em uma aplicação específica. Num conjunto soldado, submetido a uma condição onde haja esforços de tração, é necessário que a junta tenha as características mecânicas que lhe proporcionem a máxima resistência. Para isto, foi utilizada como base a chapa AISI 304 de espessura 2mm, a faixa de corrente definida com base nas especificações da AWS, recomendações de fabricantes de equipamentos de soldagem e também através de experimentos práticos, ficando definida esta entre 50 e 70A. Dentro desta faixa de corrente, foi realizada a soldagem de topo nos corpos de prova, dividindo-se esta em cinco níveis e, em cada um destes níveis, executada a soldagem de dez corpos de prova. Nas amostras soldadas, foi realizada a avaliação da zona fundida e observou-se a sua variação, sendo que esta aumenta a sua área conforme é elevado o nível da corrente, chegando à penetração total na condição de soldagem em 70A. Também foi realizado o ensaio de tração para a avaliação da resistência da junta soldada, no qual foi possível verificar a variação desta, conforme ocorreu a variação do nível de corrente aplicado, no entanto, esta variação não foi significativa. Com base na análise da zona fundida e também nos resultados dos ensaios de tração concluiu-se que é necessária uma análise que proporcione resultados mais consistentes, sendo que a soldagem dos corpos de prova deverá ser realizada sem a influência de variáveis como a descontinuidade da velocidade de soldagem e alterações no comprimento do arco, para isto, a soldagem não deverá ser realizada manualmente sim através do uso de um dispositivo mecanizado.

Palavras-chave: Soldagem TIG; Corrente de Soldagem; Parâmetros.

ABSTRACT

This work aims to contribute through practical tests and trials, to better understand the effects of the current in the welding of stainless steel, where the joint is subjected to tensile stresses, with no precise specifications about this parameter when related to the thickness of the material, the latter being variable oscillating within a recommended range. The results of the welding performed in different current ranges, and located within the recommended range, will have different current results in a specific application. In welding subjected to a condition where there are tensile stresses, it is necessary that the junta has mechanical characteristics that provide you with the maximum strength. For this, it was used the base AISI 304, a plate thickness of 2mm, and the current range defined on the specifications of AWS recommendations of manufacturers of welding equipment and by practical experiments, this being defined between 50 and 70A. Within this range of current, welding was performed in the top specimens, dividing this into five levels, and in each level welding was performed ten specimens. In all welded samples, evaluation was made of fused area was observed and its variation, and this increases its area is high as the current level reaching the full penetration welding condition in 70A. The tensile test for evaluating the strength of the welded joint, in which it was possible to check the variation thereof, according to variation of the level of current was applied, however, this was not significant variation was also performed. Based on the analysis of the molten zone and also the results of tensile tests it was concluded that an analysis that provides more consistent results, and the welding of the test specimens shall be made without the influence of variables such as the discontinuity of velocity is required welding and changes in arc length so that the welding must be performed manually but not through the use of a mechanical device.

Keywords: TIG welding; Current Welding; parameters.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Sistema desenvolvido Bernardos e Olszewsky.....	26
Figura 2 - Termos principais no processo de soldagem	28
Figura 3 - Tipos de juntas.....	28
Figura 4 - Tipos de chanfro	29
Figura 5 - Combinação dos tipos de chanfros e juntas de soldagem	30
Figura 6 - Especificações do cordão de solda	31
Figura 7 - Processos de soldagem por fusão.	33
Figura 8 - Sistema de soldagem TIG patenteado por Russel Meredith .	37
Figura 9 - Processo de soldagem TIG	38
Figura 10 - Fontes convencionais de energia	40
Figura 11 - Tocha para soldagem TIG resfriada a ar.....	41
Figura 12 - Tocha de soldagem TIG com resfriamento a água	42
Figura 13 - Fluxo laminar, fluxi turbulento de gás e <i>gas lens</i>	43
Figura 14 - <i>Trailing shield</i>	43
Figura 15 - Regiões da zona termicamente afetada.....	52
Figura 16 - Exemplo de gráfico tensão-deformação	56
Figura 17 - Corpo de prova para soldagem	59
Figura 18 - Corpo de prova soldado e cortado para ensaio	59
Figura 19 - Fonte de energia e tocha de soldagem	60

Figura 20 - Processo de soldagem e corpos de prova soldados.....	61
Figura 21 - Variação da penetração nos corpos de prova.	62
Figura 22 - Largura e profundidade dos cordões de solda	63
Figura 23 - Resultados dos ensaios de tração por faixa de corrente.....	64
Figura 24 - Níveis de tensão por faixa de corrente.	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores de corrente para eletrodos de tungstênio.....	45
Tabela 2 - Composição química dos eletrodos de tungstênio	47
Tabela 3 - Especificações dos metais de adição TIG (AWS).....	48
Tabela 4 - Requisitos de composição química de eletrodos e varetas ...	49
Tabela 5 - Tipos de corrente e gases de proteção para diferentes ligas.	50
Tabela 6 - Variáveis envolvidas no processo de soldagem	61
Tabela 7 - Valores médios de tensão de ruptura e desvios padrão	65
Tabela 8 - Dados obtidos nos ensaios de tração	66
Tabela 9 - Resumo de dados Anova	67
Tabela 10 - Resumo de dados Anova.....	67

LISTA DE ABREVIATURAS E SIMBOLOS

AISI: American Iron and Steel Institute

ASME: American Society of Mechanical Engineers

AWS: American Welding Society

CA: Corrente alternada

CC: Corrente contínua

CC-: Corrente contínua com eletrodo ligado ao pólo negativo

CC+: Corrente contínua com eletrodo ligado ao pólo positivo

CuSO₄: Sulfato de cobre

E: Módulo de elasticidade

HCl: Ácido clorídrico

ISO: International Organization for Standardization

JIS: Japanese Industrial Standards

MAG: Metal Active Gas

MIG: Metal Inert Gas

n: Número de indivíduos da amostra

Ppm: Partes por milhão

TIG: Tungsten Inert Gas

U_r: Módulo de resiliência

ZTA: Zona térmicamente afetada

$Z_{\alpha/2}$: Valor crítico correspondente ao grau de confiança

σ_e : Limite de escoamento

σ_u : Limite de resistência à tração

σ : Desvio padrão populacional da variável estudada

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	23
1.1	JUSTIFICATIVA.....	24
1.2	DEFINIÇÃO DO PROBLEMA.....	24
1.3	OBJETIVO GERAL.....	25
1.4	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	25
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	26
2.1	FUNDAMENTOS DA SOLDAGEM.....	26
2.1.1	Terminologia de soldagem.....	27
2.1.2	O arco voltaico.....	31
2.1.3	Soldagem por fusão.....	33
2.1.4	Modos de transferência metálica.....	35
2.2	PROCESSO DE SOLDAGEM TIG.....	36
2.2.1	Histórico da TIG.....	37
2.2.2	Características do processo.....	37
2.2.3	Equipamentos necessários para a soldagem TIG.....	39
2.2.3.1	Fonte de energia elétrica.....	39
2.2.3.2	Tocha de soldagem.....	41
2.2.3.3	Fonte de gás protetor.....	44
2.2.4	Parâmetros de soldagem TIG.....	44
2.2.4.1	Corrente de soldagem.....	45
2.2.4.2	Influência da polaridade na soldagem.....	46
2.2.5	Consumíveis.....	47
2.2.5.1	Eletrodos de tungstênio.....	47
2.2.5.2	Metal de adição.....	48
2.2.5.3	Gases de proteção.....	49
2.2.6	Vantagens e limitações.....	51
2.3	ZONA TERMICAMENTE AFETADA.....	51
2.4	AÇOS INOXIDÁVEIS.....	53
2.4.1	Aplicação do aço inoxidável na indústria.....	54
2.4.2	Aço inoxidável austenítico AISI 304.....	54
2.4.3	Soldabilidade dos aços inoxidáveis austeníticos.....	55
2.5	ENSAIO DE TRAÇÃO.....	55
2.5.1	Corpos de prova.....	57
3	METODOLOGIA.....	58
3.1	EQUIPAMENTOS.....	60

3.2	PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM.....	60
3.3	ANÁLISE DA ZONA FUNDIDA.....	62
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	63
5	CONCLUSÃO.....	69
6	REFERÊNCIAS.....	71

1 INTRODUÇÃO

O aço inoxidável tem larga aplicação nos diversos setores da indústria. Isto se deve principalmente pela sua resistência a corrosão, que pode ser definida como a principal característica destes aços. Outras características como a boa soldabilidade e capacidade de conformação, baixas rugosidades obtidas e facilidade de limpeza merecem destaque e também são determinantes na escolha deste tipo de metal.

Nos diversos processos de produção onde o aço inoxidável é aplicado, faz-se necessário o emprego da soldagem, seja esta aplicada à união de peças, recobrimento ou até mesmo na recuperação de peças já desgastadas. Dentre os processos de soldagem, a TIG destaca-se em aplicações onde é necessária a união de chapas relativamente finas, haja o excelente controle da energia transferida pelo arco voltaico à peça. Este controle preciso da energia de soldagem se deve à evolução das fontes de soldagem que, nas décadas de 80 e 90 tiveram grande evolução no seu conceito e forma construtiva. A introdução de dispositivos eletrônicos de controle de tensão e corrente resultou no aumento do desempenho destas fontes em relação às fontes convencionais, permitindo a soldagem por pulsos, conexão com equipamentos periféricos, diminuição das dimensões das fontes e maior eficiência elétrica.

A definição dos parâmetros de soldagem nas diversas aplicações do aço inoxidável apresentado em forma de chapas relativamente finas, oscila dentro de uma faixa que pode chegar a 20A. A escolha da corrente ideal é definida, muitas vezes, em função da experiência do profissional soldador ou ainda através de testes práticos. A experiência deste profissional muitas vezes pode não indicar o melhor parâmetro para a aplicação específica.

O processo de soldagem realizado a uma taxa de corrente abaixo da ideal, pode trazer consequências como a falta de penetração, cordões com má aparência e dificuldade na abertura do arco. A corrente de soldagem muito alta também traz prejuízos ao processo, tais como mordeduras, aumento da distorção do conjunto ou peça e ainda pode causar alterações na microestrutura do material, afetada por causa dos efeitos térmicos que se acentuam com a elevação da corrente. Estas condições inadequadas resultam na baixa resistência do cordão de solda e da sua região circundante, podendo causar a falha do conjunto soldado.

Dos diversos tipos de junta aplicados nos processos de soldagem, a junta de topo merece destaque. Esta é uma das juntas mais empregadas, devido a sua facilidade de acabamento em função da sua condição geométrica.

Em conjuntos soldados como silos e reservatórios verticais, a junta soldada de topo é submetida a esforços de tração elevados e a sua resistência está diretamente relacionada com os parâmetros utilizados no processo de soldagem deste componente. No processo de soldagem TIG, as faixas de corrente são indicadas de acordo com a espessura do metal que será soldado e, em uma junta de topo, como em qualquer outra configuração de junta, é fato que a resistência de um cordão de solda submetido a um esforço de tração varia dentro da faixa de corrente recomendada, ou seja, uma junta soldada a uma corrente de 50A, não terá a mesma resistência de uma junta soldada a uma corrente de 70A, sendo esta a faixa recomendada para a espessura de chapa de 2mm.

1.1 JUSTIFICATIVA

Em aplicações específicas onde a junta soldada é submetida a esforços de tração, é de grande relevância a especificação do nível correto de corrente para que a junta soldada apresente as características mecânicas de maior resistência a estes esforços. A falta de precisão nestas especificações cria uma condição de empirismo e pode acarretar em uma definição errônea do nível de corrente e, por consequência, o cordão de solda obtido poderá ter a sua resistência prejudicada por esta condição.

1.2 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

No processo de soldagem TIG aplicado em chapas de espessura reduzida, os níveis da corrente de soldagem a ser aplicada no processo não tem uma definição precisa.

A questão a ser discutida, portanto, é a seguinte: em uma aplicação de soldagem onde se utiliza uma junta de topo e esta junta soldada é submetida a esforços de tração, qual é o nível de corrente, dentro da faixa indicada, que dará a junta soldada a maior resistência a estes esforços?

1.3 OBJETIVO GERAL

Determinar, dentro da faixa de corrente recomendada, o nível de corrente ideal para soldagem de chapas de aço inoxidável AISI 304 com espessura de 2mm, usando-se junta de topo, a fim de obter o melhor resultado em aplicações onde a junta soldada estará sujeita a esforços de tração.

1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Identificar os valores da corrente elétrica de soldagem recomendados pelos fabricantes de equipamentos e consumíveis de soldagem e também os valores descritos nas literaturas relacionadas a este assunto e, a partir destes dados, estabelecer a faixa de corrente média recomendada para a chapa de aço inoxidável AISI 304 de espessura 2mm.

Uma vez determinada a faixa de corrente recomendada para o referido material, realizar a soldagem de corpos de prova usando-se valores da corrente de soldagem que estejam localizados dentro desta faixa.

Obter, por meio de ensaio de tração, os valores da tensão de ruptura destes corpos de prova soldados em diferentes níveis de corrente elétrica e verificar se há diferença significativa entre estes resultados.

Com base nos resultados obtidos, identificar a influência da corrente no processo de soldagem TIG em chapas de aço inoxidável AISI 304, para que estas informações possam ser utilizadas onde haja esta aplicação específica.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 FUNDAMENTOS DA SOLDAGEM

A soldagem é um dos processos de fabricação mais utilizados industrialmente para a união de componentes a fim de transformá-los em uma peça única. Outros processos como a recuperação, recobrimento e a fabricação de peças e estruturas também podem ser denominados como soldagem (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

Na literatura, diferentes definições de soldagem podem ser encontradas, e entre elas se destacam as mais popularmente utilizadas:

- Operação que visa à união de duas ou mais peças, assegurando na junta a continuidade das propriedades químicas e físicas (QUITES, 2002).
- Processo de união de materiais usado para obter a coalescência localizada de metais e não metais (AMERICAN WELDING SOCIETY, 1991).
- Processo de união entre duas partes metálicas usando uma fonte de calor, com ou sem aplicação de pressão (WAINER; DUARTE; DE MELLO, 1992).

Nikolas Bernardos e Stanislav Olszewsky no ano de 1885, na Inglaterra, registraram a primeira patente de um processo de soldagem baseado em um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo de carvão e a peça a ser soldada (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009). Na figura 1 é possível visualizar o sistema de soldagem de acordo com a patente Bernardos e Olszewsky.

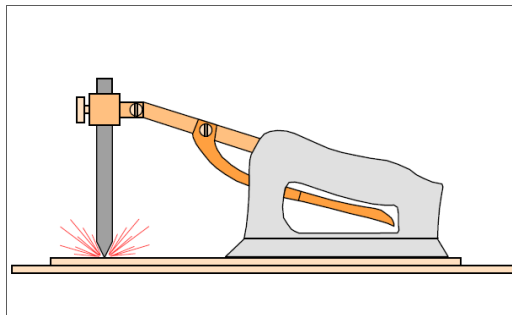


Figura 1 - Sistema desenvolvido Bernardos e Olszewsky
Fonte: (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009)

O arco elétrico foi desenvolvido no século XIX, mas o processo de soldagem teve seu maior avanço durante a II Guerra Mundial, devido à fabricação de navios e aviões soldados (WAINER; DUARTE; DE MELLO, 1992). O aperfeiçoamento dos processos de soldagem, bem como o desenvolvimento de materiais com boa soldabilidade possibilita a obtenção de juntas soldadas com características e propriedades cada vez mais idênticas às do material de base.

Para que a continuidade das propriedades químicas e físicas na região soldada seja garantida em alguns dos processos de soldagem, faz-se necessária a aplicação de material adicional na região das superfícies de contato das peças que serão unidas. A solubilização do material de adição, juntamente com o material de base, é fundamental para que se tenha uma soldagem de qualidade. Quando o material de adição que preenche a folga entre as superfícies de contato for uma porção do próprio material de base, a soldagem é denominada autógena (QUITES, 2002).

Para que haja a solubilização, é necessário o emprego de energia. Os processos de soldagem podem ser divididos em dois grupos principais, diferenciados entre si, principalmente pela fonte de obtenção da energia necessária para a solubilização. São classificados como processos de soldagem por fusão e soldagem por pressão. Uma abordagem sobre os processos de soldagem por fusão é feita no item 2.1.3.

2.1.1 Terminologia de soldagem

Nos processos de soldagem, pela sua grande abrangência nos diversos setores da indústria, muitos termos são utilizados para denominar as particularidades envolvidas no processo e estes têm o intuito de facilitar a interpretação dos requisitos necessários para cada solda em particular. Este grande grupo de termos e definições com significado relacionado ao processo de soldagem são denominados como Terminologia de Soldagem.

Segundo Marques (2009), os principais termos que são comuns à grande maioria dos processos de soldagem são:

- Metal de base - Material da peça ou das peças que estarão sendo soldadas.
- Metal de adição - Material adicional inserido para a formação da solda.

- Poça de fusão - Resultado da fusão do metal de base juntamente com o metal e adição.

A figura 2 ilustra os termos principais empregados nos processos de soldagem.

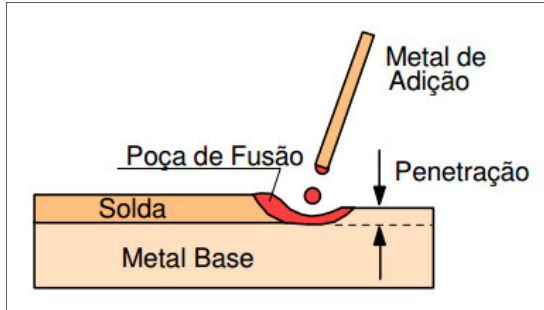


Figura 2 - Termos principais no processo de soldagem
Fonte: (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009)

Logo após os principais termos, podem ser destacados os tipos de juntas. Estas podem ser definidas como a região onde as peças que se deseja unir receberão a solda. Na figura 3 podem ser verificados os tipos de juntas mais usuais em peças para soldagem.

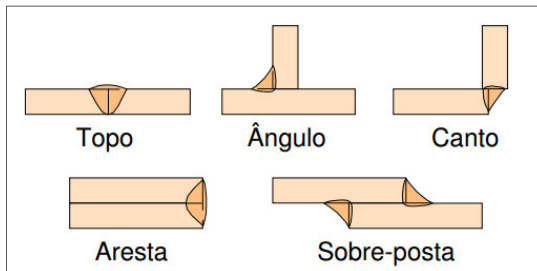


Figura 3 - Tipos de juntas
Fonte: (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009)

Quando a espessura da peça que se deseja soldar torna difícil a penetração desejada, se faz necessário o emprego de chanfros na superfície de contato.

Modenesi (2008) cita que o chanfro é realizado na junta para facilitar a penetração desejada e que o seu uso implica na necessidade de

usar metal de adição. Na figura 4 é possível verificar os tipos de chanfros empregados em soldagem.

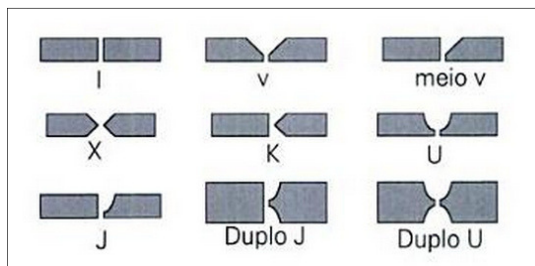


Figura 4 - Tipos de chanfro

Fonte: (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

A combinação dos tipos de chanfro e juntas de soldagem pode ser observada na figura 5.

Para que sejam definidas as características geométricas e técnicas do cordão de solda, e assim atendidos os requisitos de projeto acerca da resistência das juntas soldadas, alguns termos específicos para o cordão de solda deverão ser empregados. Estes termos servirão de referência, forma de representação gráfica, para o profissional da área no momento da execução do processo.

Os termos de identificação do cordão de solda são regidos por diferentes normas e tem a função de indicar, entre outros, dimensões e ângulo do chanfro, geometria das juntas e dimensões do cordão podendo ainda ser acrescentados dados adicionais que especificarão algumas peculiaridades do processo de soldagem.

No Brasil, o padrão de simbologia de soldagem mais usado é o da AWS – American Welding Society, através da sua norma 2.4, *Symbols for welding, brazing, and nondestructive examination*. Outros padrões de simbologia como os indicados nas normas ISO, JIS e ASME possuem semelhanças com os símbolos da AWS e também são usados no Brasil, porém com menor incidência.

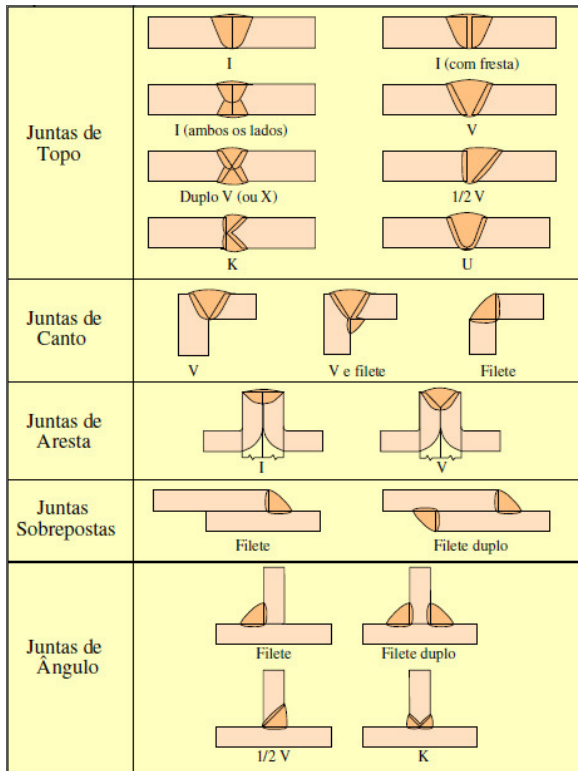


Figura 5 - Combinação dos tipos de chanfros e juntas de soldagem
Fonte: (MODENESI, 2008).

Os elementos de identificação da soldagem possuem uma localização específica definida no símbolo de soldagem. A utilização de todos os campos de identificação no símbolo de soldagem não é obrigatória caso estes não sejam pertinentes ao processo que estará sendo identificado (AMERICAN WELDING SOCIETY, 1998a).

A figura 6 ilustra as características relevantes do cordão de solda bem como os seus elementos de identificação em suas respectivas posições.

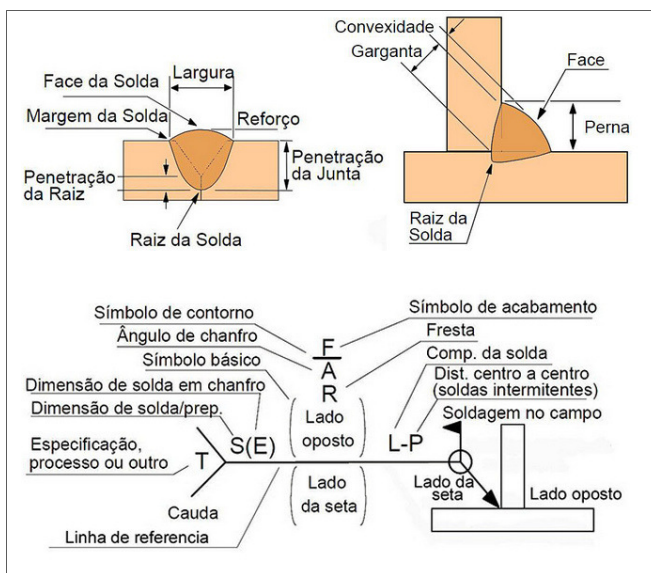


Figura 6 - Especificações do cordão de solda.
Fonte: Figura adaptada de Modenesi (2008).

2.1.2 O arco voltaico

Segundo Marques, Modenesi e Bracarense (2009), o arco voltaico consiste de uma descarga elétrica, sustentada através de um gás ionizado, o qual se denomina plasma. A denominação do fenômeno foi atribuída em função da sua forma que é caracterizada pela convecção dos gases aquecidos que são produzidos e dão a este um formato cônico e semelhante a um sino.

O registro do primeiro experimento onde foi possível observar o arco voltaico em condições controladas é datado do início do século XIX e atribuído ao químico e professor inglês Sir Humphrey Davy (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

Nos processos de soldagem elétrica com solubilização líquida, o arco voltaico é a solução mais empregada para que se obtenha a energia necessária para a fusão do metal de adição, juntamente com o metal de

base. Pode-se ainda realizar a fusão somente do metal de base quando a soldagem realizada for autógena.

A obtenção de altas temperaturas em um pequeno espaço pode ser vista como uma das grandes vantagens da sua utilização, obtendo assim uma zona de influência calorífica bem limitada (QUITES, 2002).

Para que o arco voltaico aconteça, uma fonte é necessária para fornecer a energia para o mesmo. As fontes utilizadas para estes processos podem ser transformadores de solda, conversores ou ainda um retificador de soldagem (QUITES, 2002). Uma diferença de potencial elétrico surge entre as partes a serem soldadas e o eletrodo, quando são conectados à fonte de energia, energizando-os e criando uma tensão em vazio entre eles.

O arco voltaico é iniciado quando o eletrodo energizado toca a peça também energizada, causando a queda da tensão e o aumento da corrente. Por efeito Joule, ocorre então a elevação da temperatura na região do eletrodo colocada em contato com a peça até o ponto de incandescência, permitindo neste momento a emissão de elétrons. O choque destes elétrons com os átomos da atmosfera local causa a ionização destes gases e faz com que estes passem para o estado de plasma, assim podendo conduzir energia elétrica (QUITES, 2002).

Após a abertura do arco e obtida a ionização térmica, mesmo afastando-se o eletrodo da peça alguns milímetros, o arco e conseqüentemente a condução de energia permanecem. Com a alta temperatura obtida, pode-se obter a fusão e a solubilização das peças juntamente com o eletrodo, assim obtendo-se a soldagem (QUITES, 2002).

A corrente elétrica no arco voltaico pode chegar a níveis muito altos na ordem de centenas de milhares de ampéres, sendo que o seu limite superior não é bem definido. Nos processos de soldagem, as correntes empregadas podem ter grande variação de intensidade, podendo ultrapassar a ordem de 1000 ampéres nos processos de soldagem a arco submerso e corrente da ordem de 1 ampére, ou até inferior nos processos de soldagem com microplasma (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

2.1.3 Soldagem por fusão

Segundo Quites (2002), nos processos de soldagem por fusão, a solubilização das partes que se deseja unir, juntamente com o metal de adição, ocorre na fase líquida seguida pela solidificação da junção.

Na maioria destes processos é necessário que se utilize algum tipo de proteção para que não ocorra nenhum tipo de reação entre o metal fundido e os gases existentes na atmosfera como o oxigênio e vapores de água. Estas reações dificultam a execução do processo de soldagem e comprometem a qualidade da junta soldada. Dentre as formas de proteção da poça de fusão, os gases de proteção são os mais comumente utilizados.

Os processos de soldagem por fusão podem ser divididos em grupos que se diferenciam pela forma de obtenção da energia (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009). Na figura 7 estão relacionados os principais processos de soldagem por fusão.



Figura 7 - Processos de soldagem por fusão

Fonte: (QUITES, 2002)

Dentre estes, os processos a arco voltaico são os de maior importância no meio industrial atualmente (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009). Podemos destacar os principais processos de

soldagem que utilizam o arco voltaico como fonte de obtenção de energia para a solubilização:

- Soldagem com eletrodos revestidos – Processo comumente usado na indústria na soldagem do aço. A energia para a fusão é proveniente do arco voltaico gerado entre a extremidade do eletrodo e a peça. A alimentação e o controle da velocidade de soldagem são manuais e dependem puramente da habilidade do soldador. A fusão do revestimento do eletrodo forma uma camada líquida que cobre a poça de fusão. Durante esta fusão também são liberados gases que, juntamente com a escória líquida, protegem a poça de fusão da contaminação.
- Soldagem MIG/MAG – Este processo de soldagem desenvolvido em 1948 permite a combinação de um arco voltaico suave, poça de fusão livre de escória e alta produção de metal de adição devido ao uso densidades mais elevadas de corrente (QUITES, 2002). A alimentação do arame consumível de diâmetro que varia de 0,8 a 1,6mm é automatizada e pode ser ajustada de acordo com a velocidade de deposição que se deseja. A proteção da poça de fusão se dá por meio da inserção de um gás ou de uma mistura de gases que é conduzido até a mesma. A diferenciação dos processos MIG e MAG depende do tipo de gás que estará sendo utilizado. Caso sejam aplicados gases ativos como dióxido de carbono e oxigênio, a soldagem é denominada MAG. Quando gases inertes como Hélio e Argônio são utilizados no processo, a soldagem é denominada MIG.
- Soldagem com arco submerso – Este processo de soldagem trabalha com correntes mais altas quando comparado aos outros processos que utilizam o arco voltaico, podendo ultrapassar 1000A. Existem algumas semelhanças com o processo MIG/MAG como as condições de abertura do arco e a alimentação do arame consumível. O diâmetro do arame pode variar de 1,6 a 6 mm, o que proporciona taxas altas de deposição. A proteção da poça de fusão se dá por meio da aplicação de um fluxo granulado diretamente sobre ela. Parte deste fluxo, em contato direto com a poça, se funde protegendo-a juntamente com o arco e depois se solidifica

formando uma camada de escória semelhante à gerada no processo de soldagem com eletrodos revestidos.

- Processo de soldagem TIG – Devido à sua importância e ao objetivo do trabalho, a este tipo de soldagem é dedicada uma abordagem mais detalhada no item 2.2 do trabalho, para que sejam explanadas as peculiaridades do processo.

2.1.4 Modos de transferência metálica

Segundo Barra (2002), as formas como o metal líquido superaquecido é transferido da ponta do arame consumível até a poça de fusão são denominados modos de transferência. Alguns fatores de grande importância nos processos de soldagem como a penetração do passe, quantidade de respingos, defeitos no cordão e transferência térmica para o metal de base estão diretamente relacionados aos fenômenos de transferência metálica. Para um melhor controle destes fatores, são necessários conhecimentos acerca dos fenômenos de transferência metálica.

Conforme a American Welding Society (1991), os fatores que determinam o modo pelo qual a gota de metal liquefeito será transferida nas condições diferenciadas de soldagem são:

- Tipo de gás de proteção e nível de vazão;
- Tipo de corrente empregada no processo (CC, CA ou pulsada) e também a sua magnitude.
- Diâmetro e composição química do eletrodo;
- Projeção do arame em relação ao bico de contato;
- Tensão de soldagem;
- Polaridade;
- Pressão ambiente.

Wainer (1992) comenta que apesar da existência de mais classes de transferência metálica, esta pode ser dividida em quatro tipos principais:

- Transferência globular – O metal liquefeito é transferido em forma de gotas com maior diâmetro, aproximado ao diâmetro da alma do eletrodo ou do arame consumível, por meio da influência da gravidade. Esse modo de transferência pode ocasionar maior número de respingos e não é recomendado para soldagens fora de posição.

- Transferência por curto-circuito – Este tipo de transferência é recomendado para soldagens de matérias de menor espessura em qualquer tipo de posição e também para materiais de maior espessura e maiores chanfros a fechar nas posições vertical e sobrecabeça. A transferência do metal de adição ocorre no momento do contato deste com a poça de fusão, assim entrando em curto-circuito. Este evento se repete a uma taxa que pode chegar a 200 vezes por segundo.
- Transferência por pulverização – A transferência do metal de adição ocorre na forma de pequenas gotas, com diâmetro inferior ao arame de soldagem ou a alma do eletrodo. O jato metal da adição liquefeito pode ter formato cônico na direção do eixo do arame ou eletrodo ou ainda rotacional em torno do eixo do eletrodo ou arame (WAINER; DUARTE; DE MELLO, 1992). Este método de transferência alcança altas taxas de deposição, sendo aplicado principalmente em materiais de espessura acima de 2,5mm.
- Transferência por arco pulsado – Aplicável para soldagem em todas as posições, a transferência por arco pulsado se assemelha a transferência por pulverização, diferindo-se apenas pelo fato da gota ser transferida por pulso. Para que seja possível a soldagem com este tipo de transferência, é necessário a que a fonte de energia possua recursos para determinar a dimensão da gota e também a frequência de projeção da mesma. Os equipamentos capazes de promover este tipo de transferência são do tipo Inversor.

2.2 PROCESSO DE SOLDAGEM TIG

No processo de soldagem TIG (Tungsten Inert Gas), a energia necessária para a fusão provem de um arco elétrico mantido entre um eletrodo não consumível de tungstênio e a peça a soldar (WAINER; DUARTE; DE MELLO, 1992). A proteção da poça de fusão se dá por meio de um fluxo de gás inerte, na maioria das vezes Hélio ou Argônio ou a mistura destes. Os processos de soldagem TIG na indústria são, na maioria das vezes manuais, mas é possível o emprego de dispositivos e sistemas auxiliares para a mecanização das operações.

2.2.1 Histórico da TIG

Durante a II Guerra Mundial, houve a necessidade de construir aviões de guerra mais leves e mais rápidos. Para isto, usando como matéria prima o alumínio e o magnésio (QUITES, 2002). No entanto, os processos de soldagem da época não eram adequados para a soldagem de materiais não ferrosos, haja vista que estes reagiam rapidamente com o ar, assim gerando porosidades e conseqüentemente soldas de baixa qualidade.

No ano de 1941, Russel Meredith, que trabalhava na fábrica de aviões Northrop Aircraft Company, patenteou um sistema então chamado de *Heliarc* (WAINER; DUARTE; DE MELLO, 1992). O novo processo foi assim denominado por usar um arco elétrico para a fusão do material de base e a inserção do gás Hélio como forma de proteção da poça de fusão. Também é de Russel Meredith a patente do primeiro modelo de tocha TIG, realizada no ano de 1942.

O sistema patenteado por Meredith pode ser observado na figura 8.

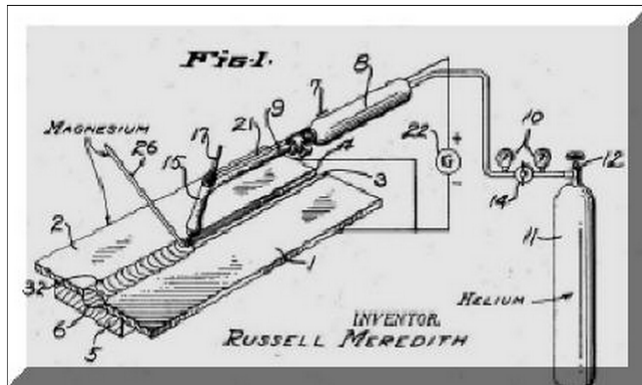


Figura 8 - Sistema de soldagem TIG patenteado por Russel Meredith
Fonte: (History of TIG (GTAW) Welding Invention and Development)

2.2.2 Características do processo

Nos processos de soldagem TIG, um arco elétrico é estabelecido entre um eletrodo não consumível de tungstênio e a peça a ser soldada.

A energia necessária para a solubilização do metal de base e também do metal de adição é fornecida através deste arco (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009). Para a proteção da poça de fusão, uma nuvem de gás inerte ou mistura de gases é aplicada sobre esta, evitando que haja a contaminação com a atmosfera e permitindo a soldagem de materiais de baixa soldabilidade.

Para que seja realizada a soldagem TIG, não necessariamente aplica-se o metal de adição, podendo esta ser realizada apenas com a fusão do metal de base nas superfícies que se deseja soldar. Quando não é aplicado o metal de adição, a soldagem é denominada autógena. Em situações onde o metal de adição não está disponível comercialmente, partes do próprio metal de base, na forma de finas tiras, poderão ser usados para preenchimento na soldagem manual (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009). Na figura 9 é possível observar o processo TIG.

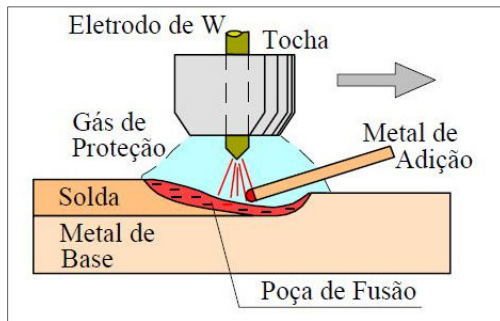


Figura 9 - Processo de soldagem TIG

Fonte: (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009)

A soldagem TIG aplica-se com muita eficiência na união de chapas relativamente finas, isto se dá pelo excelente controle da energia que é transferida pelo arco voltaico à peça (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009). Com o controle pleno da energia, um arco suave e estável é obtido, sendo possível a execução de soldagens com boa aparência e elevada qualidade.

A obtenção de uma soldagem limpa e livre de escória possibilita uma boa visibilidade ao soldador no momento da soldagem, pois não há reação do metal fundido com a escória e conseqüentemente a geração de fumos é baixa.

Este processo pode ser aplicado à maioria dos metais, em várias faixas de espessura. Porém, pelo fato do custo ser relativamente alto, a sua aplicação mais comum é em aços inoxidáveis e ligas não ferrosas (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

2.2.3 Equipamentos necessários para a soldagem TIG

Os equipamentos básicos necessários para a execução da soldagem TIG, assim como os equipamentos auxiliares diversos, seja ela manual ou mecanizada, para que se obtenha um melhor controle do processo serão apresentados nas seções a seguir.

2.2.3.1 Fonte de energia elétrica

Para realização da soldagem a arco se faz necessária a utilização de uma fonte geradora de energia. Esta deverá fornecer tensão e corrente adequadas para este processo, geralmente na faixa de 10 a 40V e 10 a 1200A (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

A fonte geradora deverá fornecer a corrente elétrica de forma constante, podendo esta ser um gerador, retificador, transformador ou inversor, conforme as características do material a ser soldado (WAINER; DUARTE; DE MELLO, 1992). Os valores de saída de corrente devem ser passivos de ajuste, para que seja possível a operação na forma de corrente contínua, alternada e em alguns casos a corrente poderá ainda ser pulsada. As fontes, pela sua forma construtiva, poderão ser convencionais ou eletrônicas (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

As fontes convencionais de soldagem foram as primeiras a serem desenvolvidas e também, por um longo período, as únicas fontes de soldagem disponíveis. Pela sua concepção, podem usar energia elétrica fornecida por uma rede ou converter outra forma de energia, geralmente energia mecânica, em energia elétrica para a realização da soldagem (MODENESI, 2009).

Quando uma fonte convencional usa a energia fornecida por uma rede de alimentação, é preciso que esta seja convertida para uma forma mais adequada para a soldagem, ou seja, reduzir os seus valores de tensão, geralmente pelo uso de um transformador. Nos casos em que é necessário que a corrente de saída seja contínua, deverá ser usado um banco de resistores na saída do transformador (MODENESI, 2009). A

classificação das fontes convencionais de acordo com a obtenção da energia pode ser observada na figura 10.

Nas décadas de 80 e 90 novos conceitos de fontes de energia com a introdução de dispositivos eletrônicos para a soldagem foram desenvolvidos (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009). As fontes inversoras apresentam desempenho superior em relação às fontes convencionais, principalmente em processos automatizados, pela sua precisão no controle da corrente por meio de resposta dinâmica, permitindo assim uma reprodutibilidade superior e também a soldagem por pulsos.

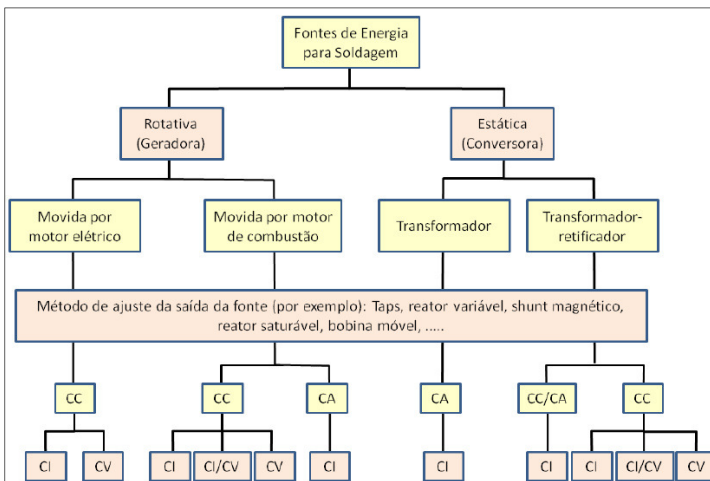


Figura 10 - Fontes convencionais de energia
Fonte: (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009)

Segundo Marques, Modenesi e Bracarense (2009), outras vantagens das fontes inversoras quando comparadas as convencionais são:

- Múltiplas funções - Permite mudança na saída da fonte e na sua curva característica durante a operação, podendo adequá-la a eventos que ocorram no arco.
- Conexão e programação - Permite a comunicação com equipamentos periféricos por meio de troca de sinais com sensores. Através do uso de memória interna, podem ser

armazenadas informações e parâmetros de soldagem preestabelecidos.

- Dimensões reduzidas - O desenvolvimento das fontes inversoras e o uso de corrente alternada de alta frequência acarretou na diminuição das dimensões do transformador e conseqüentemente a diminuição significativa no peso e dimensões da fonte, o que lhe confere ótima portabilidade.
- A digitalização dos circuitos, anteriormente analógicos, permite maior eficiência elétrica do equipamento e baixo consumo de energia.

2.2.3.2 Tocha de soldagem

No processo de soldagem TIG, a tocha tem por função suportar o eletrodo de tungstênio, conduzir e distribuir o gás de proteção na região da poça de fusão (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009). Dependendo da intensidade da corrente que será usada na soldagem, a tocha deve ser equipada com um sistema de refrigeração com uso de água, geralmente em processos onde a corrente variar de 150A até 500A. Em aplicações com corrente abaixo desta faixa, a refrigeração da tocha ocorre pela circulação do gás de proteção. Este modelo de tocha é empregado mais comumente em processos manuais de soldagem.

Nas figuras 11 e 12 podem ser observadas as tochas com e sem refrigeração, bem como os seus diversos componentes.

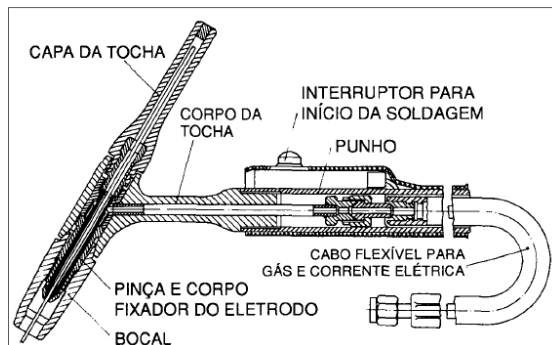


Figura 11 - Tocha para soldagem TIG resfriada a ar.
Fonte: (WAINER; DUARTE; DE MELLO, 1992)

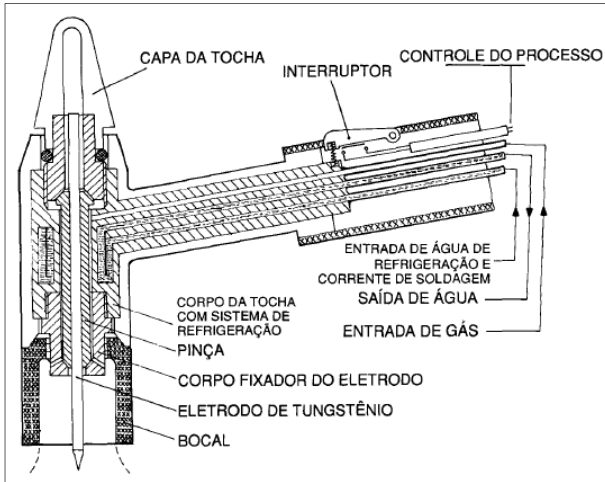


Figura 12 - Tocha de soldagem TIG com resfriamento a água
Fonte: (WAINER; DUARTE; DE MELLO, 1992)

O eletrodo de tungstênio é fixado no interior da tocha por meio de uma pinça e esta deverá ter o seu tamanho compatível com o diâmetro do eletrodo, uma vez que a pinça também é responsável pelo contato elétrico.

O direcionamento do fluxo de gás se dá por meio do bocal, que poderá ser cerâmico ou metálico e o seu dimensionamento, bem como o eletrodo, dependerá da espessura da chapa a ser soldada (WAINER; DUARTE; DE MELLO, 1992). Para que se obtenha um fluxo de gás mais eficiente, alguns acessórios poderão ser usados. As *gas lens* são telas de uma fina malha que são acopladas entre o eletrodo e o bocal, com a finalidade de garantir um fluxo laminar do gás (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

O fluxo laminar de gás na soldagem TIG caracteriza-se pela ausência de turbulência na sua distribuição. Esta condição permite uma distribuição uniforme do gás em torno do tungstênio e sobre a região da poça de fusão. Desta forma o eletrodo de tungstênio pode ter uma maior distância de exposição para fora do bocal, proporcionando melhor visibilidade do arco pelo soldador, aumenta a proteção contra contaminações e ainda reduz as descontinuidades na soldagem, dando a esta uma maior consistência. Na figura 13 pode ser observa a diferença entre um fluxo laminar e turbulento de gás, assim como a *gas lens*.

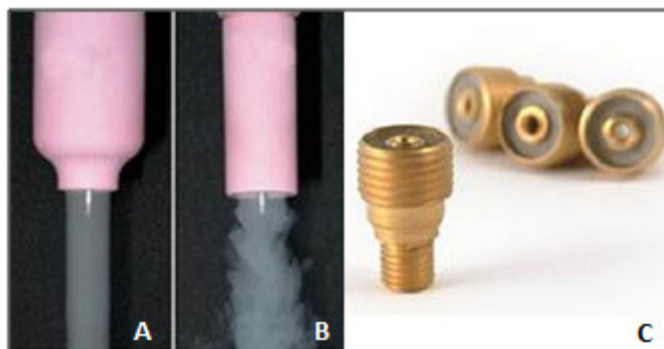


Figura 13 - A - Fluxo laminar, B - fluxo turbulento de gás, C - gas lens
Fonte: (ZEEMANN, 2006)

Para a proteção do cordão durante o resfriamento, um acessório chamado *trailing shield* pode ser usado. Este consiste em um segundo bocal para a saída de gás que é posicionado atrás da tocha. Na figura 14 pode ser visualizado este acessório.



Figura 14 - Trailing shield
Fonte: (ZEEMANN, 2006)

2.2.3.3 Fonte de gás protetor

Para a proteção da poça de fusão, um sistema de alimentação de gás protetor se faz necessário. Composto geralmente por um ou dois cilindros de gás, reguladores de pressão, reguladores de vazão e mangueiras para condução do gás ou mistura de gases até a tocha.

Em determinados processos onde se faça necessário o uso de dois tipos de gases, poderão ser usados misturadores. Estes dispositivos poderão ser fabricados de acordo com as peculiaridades de cada processo específico, mas também são encontrados no mercado em modelos com diferentes padrões e modelos.

2.2.4 Parâmetros de soldagem TIG

Os resultados de uma operação de soldagem, ou seja, aparência visual, resistência do cordão, penetração e zona termicamente afetada estão diretamente ligados aos parâmetros de soldagem. O conhecimento de todas as variáveis envolvidas neste processo é fundamental para que este seja realizado da forma adequada para cada caso particular.

As variáveis do processo de soldagem TIG que serão fundamentais para a correta parametrização são:

- Comprimento do arco - Corresponde à distância entre a superfície da peça a ser soldada e a ponta do eletrodo. Aumentando-se esta distância, aumenta-se também a tensão do arco voltaico (MODENESI, 2012). O comprimento do arco influenciará diretamente no cordão de solda, sendo que a sua variação acontece enquanto o fluxo de gás se mantém permanente e a tensão instável. Esta condição favorece o surgimento de defeitos no cordão de solda como poros, fusão insuficiente e mordeduras.
- Vazão do gás de proteção - A eficácia da proteção da poça de fusão está diretamente relacionada à vazão do gás. Esta deverá ter vazão suficiente para que o ar presente na região da poça seja deslocado e desta forma não ocorram reações com o metal fundido ou descontinuidades. A vazão excessiva gera turbulência no fluxo, tendo como consequências um arco instável, descontinuidades no cordão, além de elevar o custo do processo (INFOSOLDA, 2013).

- Velocidade de soldagem - A penetração está diretamente relacionada com a velocidade com que a junta é solubilizada. Aumentando-se a velocidade, tem-se um maior rendimento no processo, porém a penetração e a largura do cordão serão reduzidas (INFOSOLDA, 2013).
- Corrente de soldagem - Dada a relevância deste parâmetro, uma descrição detalhada é realizada no item 2.2.4.1.

2.2.4.1 Corrente de soldagem

A soldagem a arco voltaico tem como base o calor que é gerado pela passagem da corrente elétrica através do gás ionizado (QUITES, 2002).

Marques, Modenesi e Bracarense (2009) citam que quanto maior for a corrente de soldagem, maior será a penetração e a largura do cordão de solda. O ajuste da corrente é feito diretamente na fonte de energia e seus valores estão relacionados com o diâmetro e a composição química do eletrodo não consumível de tungstênio, conforme pode ser observado na Tabela 1.

Tabela 1 - Valores de corrente para eletrodos de tungstênio
Fonte: (AMERICAN WELDING SOCIETY, 1998b)

Diâmetro do eletrodo (mm)	Corrente (A) e polaridade							
	CC-		CC+		CA balanceada		CA não balanceada	
	EWX-X	EWX-X	EWP	EWX-X	EWP	EWX-X		
0,3	Até 15	*	Até 15	Até 15	Até 15	Até 15		
0,5	5 – 20	*	10 – 20	5 – 20	5 – 15	5 – 20		
1,0	15 – 80	*	20 – 60	15 – 80	10 – 30	20 – 60		
1,6	70 – 150	10 – 20	50 – 100	70 – 150	30 – 80	60 – 120		
2,4	150 – 250	15 – 30	100 – 160	140 – 235	60 – 130	100 – 180		
3,2	250 – 400	25 – 40	150 – 200	225 – 325	100 – 180	160 – 250		
4,0	400 – 500	40 – 55	200 – 275	300 – 400	160 – 240	200 – 320		
4,8	500 – 750	55 – 80	250 – 350	400 – 500	190 – 300	290 – 390		
6,4	750 – 1000	80 - 125	325 – 450	500 – 630	250 – 400	340 – 525		

Em aplicações voltadas à soldagem, a corrente elétrica pode ser classificada em contínua e alternada.

- Corrente contínua - Designada pela sigla CC, é definida como a corrente obtida a partir de uma diferença de potencial elétrico entre dois terminais que não sofrerão variação de polaridade no tempo (QUITES, 2002). Quando não houver variação da intensidade da corrente, esta é dita como corrente contínua constante. Quando houver variação periódica da intensidade da corrente entre um nível de pico e um nível de base no tempo, esta é dita como corrente contínua pulsada.
- Corrente alternada - Segundo Quites (2002), identificada pela sigla CA, é a corrente obtida a partir de uma diferença de potencial elétrico entre dois terminais, onde a polaridade é alternada ciclicamente entre positiva e negativa. Dessa forma, o sentido do fluxo dos íons e dos elétrons também muda a cada inversão da polaridade. A corrente alternada é indicada à soldagem de materiais não ferrosos como alumínio e magnésio.

2.2.4.2 Influência da polaridade na soldagem

Na soldagem TIG em corrente contínua de polaridade direta ou normal, o eletrodo é ligado à polaridade negativa e identifica-se pela abreviatura CC-. Neste caso, ocorre um fluxo de elétrons na direção da peça e um fluxo de íons na direção do eletrodo, portanto, o aquecimento da peça será maior (QUITES, 2002). Esta condição propicia um cordão de solda esbelto e de penetração mais profunda.

Usando-se corrente contínua de polaridade reversa, ou seja, o eletrodo é ligado à polaridade positiva, identifica-se pela abreviatura CC+. Nesta condição, ocorre um fluxo de íons positivos no sentido da peça e um fluxo de elétrons na direção do eletrodo, o que provocará maior aquecimento deste em relação à peça (QUITES, 2002). Isto requer que o eletrodo tenha maior diâmetro se comparado com um eletrodo usado no processo CC-. Esta condição propicia um cordão de solda mais largo, porém a penetração será pequena.

2.2.5 Consumíveis

São assim denominados os materiais empregados na deposição e na proteção do processo de soldagem. No processo TIG, os principais consumíveis são os metais de adição na forma de varetas ou arames e os gases de proteção. Os eletrodos de tungstênio, embora não sejam ditos consumíveis, degradam na operação, necessitando recondicionamento ou troca (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

2.2.5.1 Eletrodos de tungstênio

Os eletrodos usados na soldagem TIG são compostos de tungstênio puro ou com adição de outros metais como tório, cério, zircônio ou lantânio (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009). O tungstênio é um ótimo emissor de elétrons e possui alto ponto de fusão (3.422 °C). A função do eletrodo é conduzir a corrente elétrica até o arco, sendo que a intensidade da corrente será proporcional ao diâmetro do eletrodo (TEIXEIRA, 2011). Os eletrodos de tungstênio puro são usados em corrente alternada. Em corrente contínua são usados os eletrodos de tungstênio com adição de tório, lantânio e cério.

A AWS através da sua norma 5.12, *Tungsten Electrodes for Arc Welding and Cutting*, indica a composição química dos eletrodos de tungstênio e também as faixas de corrente usuais para estes, conforme pode ser observado nas tabelas 2 e 3 a seguir.

Tabela 2 - Composição química dos eletrodos de tungstênio
Fonte: (AMERICAN WELDING SOCIETY, 1998b)

Classificação AWS	Composição química (% peso)					
	Tungstênio (mín)	CeO ₂	La ₂ O ₃	ThO ₂	ZrO ₂	Outros (máx)
EWP	99,5	–	–	–	–	0,5
EWCe-2	97,3	1,8 a 2,2	–	–	–	0,5
EWLa-1	98,3	–	0,8 a 1,2	–	–	0,5
EWLa-1,5	97,8	–	1,3 a 1,7	–	–	0,5
EWLa-2	97,3	–	1,8 a 2,2	–	–	0,5
EWTh-1	98,3	–	–	0,8 a 1,2	–	0,5
EWTh-2	97,3	–	–	1,7 a 2,2	–	0,5
EWZr-1	99,1	–	–	–	0,15 a 0,4	0,5
EWG	94,5	#	#	#	#	#

- Não especificado

Tabela 3 - Especificações dos metais de adição TIG (AWS)**Fonte: (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009)**

Especificação	Metal de adição
AWS A 5.7	Especificação for Bare Cooper Welding Electrodes and Rods
AWS A 5.9	Especificação for Bare Stainless Steel Welding Electrodes and Rods
AWS A 5.10	Especificação for Bare Aluminium Welding Electrodes and Rods
AWS A 5.14	Especificação for Níquel Bare Welding Electrodes and Rods
AWS A 5.15	Especificação for Welding Rods and Covered Electrodes for Cast Iron
AWS A 5.16	Especificação for Titanium Welding Electrodes and Rods
AWS A 5.18	Especificação for Carbon Steel Electrodes and Rods for Arc Welding
AWS A 5.19	Especificação for Magnesium Alloy Welding Electrodes and Rods
AWS A 5.21	Especificação for Composite Surfacing Welding Rods and Electrodes
AWS A 5.22	Especificação for Stainless Steel Electrodes for Flux Cored
AWS A 5.24	Especificação for Bare Zirconium Welding Electrodes and Rods
AWS A 5.28	Especificação for Low-Alloy Steel Electrodes and Rods

O ângulo da ponta do eletrodo está relacionado diretamente com a penetração e a largura da solda, sendo que quanto mais aguda a ponta, maior também será a penetração da solda e mais estreito será o cordão. Nos processos de soldagem automatizada, o ângulo da ponta do eletrodo é de suma importância, pois não há a ação do soldador para o controle da poça de fusão (WAINER; DUARTE; DE MELLO, 1992). Os eletrodos normalmente são apontados de forma química ou mecânica antes de ser iniciada a soldagem.

2.2.5.2 Metal de adição

Na soldagem TIG manual, o metal de adição é apresentado em varetas de aproximadamente 1m de comprimento e em processos automatizados, apresenta-se na forma de fio enrolado em bobinas (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009). A faixa de diâmetro dos fios e varetas varia entre 0,5 e 5mm, sendo este diâmetro é definido em função da espessura das peças que serão soldadas.

A seleção do metal de adição a ser usado num processo de soldagem dependerá do tipo de metal de base que estará sendo soldado e

também das características mecânicas desejadas na junta. Geralmente a composição do metal de adição será similar à do metal de base, com o acréscimo de alguns elementos específicos para garantir a soldabilidade. Não é necessário que a composição seja idêntica, porém deverá ser considerada a compatibilidade dos metais (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009)

A gama de materiais de adição de diversas ligas é bem ampla e a composição química destes metais, comparada ao metal de base, tem limites de tolerância inferiores (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009). A AWS através de diversas normas, classifica os metais de adição de acordo com as suas propriedades mecânicas e composição química. Na tabela 3 estão relacionadas as normas da AWS que classificam os metais de adição para soldagem TIG.

A AWS, através da norma 5.9, determina a composição dos eletrodos e varetas aplicados à soldagem dos aços inoxidáveis, sendo que estes deverão ter um teor de cromo mínimo de 10,5%. Para exemplificar a classificação de um tipo de eletrodo usado na soldagem TIG, será apresentada a composição do eletrodo ER308L, que será usado na soldagem dos corpos de prova durante o desenvolvimento do trabalho, onde:

ER – Consumível apresentado na forma de eletrodo ou vareta.

308L – Referente à composição química do metal segundo a norma AISI, ou seja, aços austeníticos da serie 300. A composição deste metal de adição pode ser observada na tabela 4.

Tabela 4 - Requisitos de composição química de eletrodos e varetas

Fonte: (AMERICAN WELDING SOCIETY, 1992)

Composição química									
AWS	C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	P	S	Cu
ER308L	0,03	19,5 - 22,0	9,0 - 11,0	0,75	1,0 - 2,5	0,3 - 0,65	0,03	0,03	0,75

2.2.5.3 Gases de proteção

Quites (2002) indica que a principal função dos gases é proteger a poça de fusão da contaminação dos gases presentes na atmosfera, como oxigênio, nitrogênio e hidrogênio. Gases inertes como hélio e argônio são os mais utilizados em soldagens, em razão de serem os gases encontrados com facilidade e em volumes suficientes para a demanda

industrial. Misturas de gases também poderão ser usadas em algumas operações como na soldagem TIG em cobre, onde o nitrogênio poderá ser usado como opcional para que maiores velocidades de soldagem possam ser alcançadas (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

Na soldagem TIG, os gases de proteção deverão ter níveis de pureza mínimos de 99,99% e a presença de vapor d'água deverá ser mantida no valor máximo de 11 ppm por volume. A seleção correta do gás de proteção dependerá do metal que se deseja soldar, posição de soldagem, espessura das peças que serão soldadas.

A AWS através da norma 5.32 - *Especification for Welding Shielding Gases* trata das especificações e aplicações dos gases para soldagem, conforme pode ser observado na tabela 5.

Tabela 5 - Tipos de corrente e gases de proteção para diferentes ligas
Fonte: (AMERICAN WELDING SOCIETY, 1997)

Material	Espessura (mm)	Gás de proteção e tipo de corrente	
		Soldagem manual	Soldagem mecanizada
Alumínio e suas ligas	<3,2	Ar, CA	Ar, CA ou He, CC-
	>3,2	Ar, CA	Ar-He, CA ou He, CC-
Aço Carbono	<3,2	Ar, CC-	Ar, CC-
	>3,2	Ar, CC-	Ar-He, CC- ou He, CC-
Aço Inoxidável	<3,2	Ar, CC-	Ar-He, CC- ou Ar-H ₂ , CC-
	>3,2	Ar-He, CC-	He, CC-
Níquel e suas ligas	<3,2	Ar, CC-	Ar-He, CC- ou He, CC-
	>3,2	Ar-He, CC-	He, CC-
Cobre e suas ligas	<3,2	Ar-He, CC-	Ar-He, CC-
	>3,2	He, CC-	He, CC-
Titânio e suas ligas	<3,2	Ar, CC-	Ar, CC- ou Ar-He, CC
	>3,2	Ar-He, CC-	He, CC-

2.2.6 Vantagens e limitações

De acordo com as variáveis do processo de soldagem TIG em operações manuais e automatizadas, as vantagens e limitações do processo são descritas a seguir.

Vantagens:

- Soldagem de ligas reativas, metais não ferrosos e aços inoxidáveis.
- Controle do calor fornecido à peça, minimizando a ZTA e distorções.
- Produz solda e passe de raiz de alta responsabilidade.
- Pode ser realizado em qualquer posição.
- Soldagem de chapas finas, a partir de 0,3mm.
- Possibilidade de soldagem de ligas com baixo ponto de fusão.
- Isenção de respingos e escória.

Limitações:

- Produz baixas taxas de deposição.
- Dificuldade na soldagem em locais onde haja corrente de ar.
- Possibilidade de inclusão de tungstênio na solda.
- Altas emissões de radiação.
- Em operações manuais, requer habilidade e conhecimento do soldador.
- Processo mais caro quando comparado a outros processos a arco.

2.3 ZONA TERMICAMENTE AFETADA

A ZTA pode ser descrita como a região do metal de base onde não houve fusão, mas teve as suas propriedades alteradas em função da alta temperatura da poça de fusão (MARQUES; MODENESI;

BRACARENSE, 2009). O calor gerado pelo processo de soldagem, seguido pelo rápido resfriamento faz com que haja alterações nas propriedades do metal de base na região que circunda o cordão de solda.

A magnitude destas alterações vai depender de variáveis como metal de base, metal de adição, velocidade de soldagem, quantidade de calor gerado pelo processo de soldagem e severidade dos ciclos térmicos.

Segundo Ballesteros (2009), nos aços soldados em processos por fusão, a ZTA comumente é dividida em quatro regiões, de acordo com a temperatura atingida no ciclo térmico da soldagem, conforme pode ser observado na figura 15.

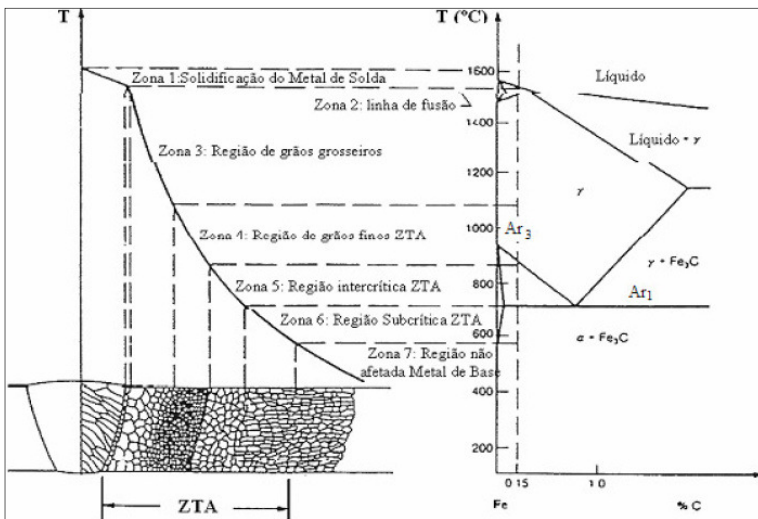


Figura 15 - Regiões da zona termicamente afetada
Fonte: (ZEEMANN, 2006)

Zona de grãos grosseiros - Região onde o crescimento do grão austenítico tem início. A temperatura desta região oscila entre 1100 e 1450 °C e o tamanho deste grão dependerá da natureza do ciclo térmico, sendo que, quanto maior for a energia de soldagem, mais grosseiro será o grão formado. A granulação maior dificulta a ocorrência de transformação no resfriamento, aumentando a temperabilidade nesta região (BERTOL, 2009). Esta região pode ser considerada como a

região mais suscetível à formação de trincas, haja vista a falta de tenacidade.

Zona de grãos finos - Nesta região a temperatura entre Ar_3 e 1100°C e o crescimento dos grãos austeníticos é considerado lento e, por consequência, grãos pequenos são formados. Devido ao alto número de contornos de grão, pode ocorrer a formação de ferrita nestes contornos, enriquecendo a desta forma a austenita excedente em carbono (BALLESTEROS, 2009).

Zona intercrítica - A temperatura desta região encontra-se entre Ar_1 e Ar_3 , sendo esta uma região estreita. É caracterizada pela transformação parcial da estrutura original do metal de base, sendo somente uma parte austenizada. Em soldagens executadas em vários passes, constituintes de alta dureza poderão ser formados nesta região (BERTOL, 2009).

Zona subcrítica - Nesta zona, a temperatura é menor que Ar_1 e comumente não existe alteração microestrutural observável, exceto uma degradação da perlita lamelar a partículas de cementita (BERTOL, 2009).

2.4 AÇOS INOXIDÁVEIS

Segundo Carbó (2001), são considerados aços inoxidáveis aqueles cujas ligas de ferro (Fe) e cromo (Cr) possuam um mínimo de 10,5% de cromo, sendo que outros elementos também são integrantes destas ligas, porém o responsável pela resistência a corrosão é o cromo.

A descoberta do aço inoxidável é datada do início do século XIX. Harry Brearley trabalhava em uma produtora de aço na cidade de Sheffield na Inglaterra e a pesquisava ligas metálicas resistentes para a indústria de armamentos (OZORIO, BASTIAN-PINTO, *et al.*, 2013).

A pesquisa de Brearley visava o desenvolvimento de uma liga de maior resistência ao desgaste. Em um de seus testes, constatou que uma de suas ligas não reagiu ao ataque químico com ácido nítrico. A primeira aplicação do aço inoxidável foi na indústria de talheres, que até então eram produzidos em aço carbono (OZORIO, BASTIAN-PINTO, *et al.*, 2013).

2.4.1 Aplicação do aço inoxidável na indústria

A principal característica dos aços inoxidáveis é a ótima resistência a corrosão, mas outras características como a sua boa capacidade de conformação, boa soldabilidade e excelentes propriedades mecânicas são responsáveis pela sua ampla aplicação nos mais variados segmentos da indústria. O aço inoxidável pode ser usado desde a fabricação de peças simples, aplicação na indústria de equipamentos hospitalares e em aplicações de grande responsabilidade (CARBÓ, 2001).

Uma das aplicações dos aços inoxidáveis que merece destaque está relacionada com a produção de alimentos e bebidas. Nos diversos setores como fabricação, processamento, estocagem, preparo e distribuição, o aço inoxidável é a principal matéria prima para a fabricação destes equipamentos, haja vista as suas excelentes propriedades citadas aliadas a facilidade de limpeza, o que lhe confere uma aparência higiênica em função da sua baixa rugosidade. Esta é uma característica relevante neste segmento, pois esta condição evita o acúmulo de resíduos provenientes dos processos de produção.

2.4.2 Aço inoxidável austenítico AISI 304

Adicionando-se o níquel em determinadas quantidades como elemento de liga, tem-se a transformação da estrutura de ferrítica para austenítica (CARBÓ, 2001). Esta alteração na estrutura promove mudanças nas propriedades do material, como excelente ductilidade, resistência mecânica a quente e boa soldabilidade (FERNANDES; SILVA; MARIANO, 2009).

O aço inox AISI 304 é o mais popular entre os aços inoxidáveis austeníticos, sendo possível encontrá-lo em aplicações simples em nossa casa e em aplicações com grande responsabilidade. Trata-se de um aço cromo-níquel 18-8 (18%Cr-8%Ni), não temperável e também não magnético. Tem resistência à corrosão até 850 °C, porém até 300 °C é resistente à corrosão intercrystalina. Possui boa conformabilidade a frio, porém maiores esforços de conformação serão necessários se comparados aos necessários para aços não ligados (CARBÓ, 2001).

2.4.3 Soldabilidade dos aços inoxidáveis austeníticos

Os aços inoxidáveis austeníticos, principalmente o AISI 304, são amplamente utilizados nos mais variados setores da indústria. Nestas diversas aplicações, em grande parte aplica-se a soldagem, que é o principal processo de união dos metais. Além da união, a soldagem também é aplicada na recuperação e revestimento de superfícies metálicas desgastadas.

Dentre as principais características dos aços inoxidáveis austeníticos está a boa soldabilidade.

A ausência de transformação martensítica e sua boa tenacidade implicam na sua insensibilidade à fissuração pelo hidrogênio. A sensibilidade à formação de porosidades também é baixa e a zona fundida tem propriedades que se assemelham à do metal de base (MODENESI, 2001).

A escolha do processo de soldagem adequado ao material, bem como o metal de adição, é fundamental para a correta execução da soldagem. Deverão ser levados em consideração os princípios da metalurgia da soldagem do metal de base e as condições de serviço da peça ou conjunto soldado (MODENESI, 2001).

Geralmente as operações de soldagem podem ser executadas sem pré-aquecimento das peças e tratamentos térmicos pós-soldagem não são necessários. Como forma de prevenção de uma possível diminuição da resistência à corrosão, deve-se remover a carepa formada pela soldagem e também em processos de conformação a quente (MODENESI, 2001).

2.5 ENSAIO DE TRAÇÃO

Em algumas aplicações da soldagem na indústria, faz-se necessário conhecer o comportamento mecânico e as características da junta soldada. A variação dos parâmetros de soldagem pode acarretar em mudanças nas propriedades mecânicas da junta, ou seja, alteração do fator determinante na resistência da solda (SOUZA, 1982).

Para que estas propriedades mecânicas e também o comportamento da junta soldada sejam conhecidos, e assim um projeto possa ser viabilizado, faz-se necessário o ensaio de tração (GARCIA; SPIN; DOS SANTOS, 2000).

Os ensaios de tração são amplamente utilizados na indústria, onde um corpo de prova com geometria definida é submetido a esforços no

sentido axial do mesmo, até que haja a ruptura. Por meio deste ensaio é possível conhecer dados quantitativos das características mecânicas dos materiais (GARCIA; SPIN; DOS SANTOS, 2000).

Segundo Souza (1982), quando um corpo de prova é submetido a um ensaio de tração, um gráfico tensão-deformação pode ser construído, conforme a figura 16, usando-se os valores da carga e da deformação. Este gráfico é traçado pela máquina de tração através de leituras da deformação e da carga aplicada. Estes valores aumentam continuamente durante o ensaio, até que haja a ruptura do corpo de prova.

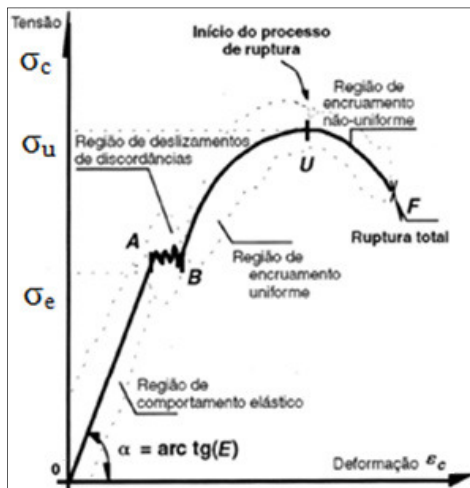


Figura 16 - Exemplo de gráfico tensão-deformação

Fonte: (GARCIA, SPIN e DOS SANTOS, 2000)

Das diversas características do material ensaiado que podem ser quantificadas, podemos destacar: limite de resistência à tração (σ_u), limite de escoamento (σ_e), módulo de resiliência (U_r) e o módulo de elasticidade (E).

Quando o ensaio for realizado em materiais soldados, somente a carga de ruptura poderá ser registrada, haja vista a heterogeneidade deste corpo de prova (SOUZA, 1982). Nestes casos o alongamento é afetado pela solda, tornando difícil de duvidosa a determinação da parte que sofre o escoamento.

2.5.1 Corpos de prova

Souza (1982) cita que a forma ideal para se determinar as características mecânicas de um metal, é por meio de ensaio de um corpo de prova que tenha sido retirado da peça. O corpo de prova tem a sua geometria normalizada por diversas associações de normas técnicas e a sua seção poderá ser circular ou retangular, dependendo da forma que terá o produto final, do qual é extraída a amostra.

Os corpos de prova que, porventura tenham sido extraídos de lâminas ou chapas, terão a sua espessura igual a da chapa ou lâmina de onde tenham sido extraídos. Caso o corpo de prova tenha sido extraído de uma peça com seção circular, ou ainda de peças fundidas, terá a sua seção circular.

O controle das dimensões dos corpos de prova é importante para que seja respeitada a capacidade dos equipamentos de ensaio, a forma de fixação destes corpos ao equipamento e também sejam asseguradas as dimensões de área de seção transversal, sendo que este valor de entrada tem influência direta no resultado do ensaio. Em casos onde a peça tenha dimensões reduzidas, os métodos de ensaio fornecem opções de corpos de prova com dimensões reduzidas (SOUZA, 1982).

A ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, através da sua norma NBR 6152 - *Materiais metálicos - Ensaio de tração à temperatura ambiente* - estabelece as geometrias que deverão ser seguidas para a confecção dos corpos de prova dos diversos formatos de peças, além de especificar os métodos de ensaio de tração e também as propriedades mecânicas que poderão ser determinadas.

3 METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho consiste na aplicação da soldagem TIG em chapas de aço inox AISI 304 em diferentes níveis de corrente. As faixas de corrente recomendadas para este tipo de soldagem são bem amplas e a regulagem desta tem variações dependendo do profissional soldador que estará executando o processo. A variação da intensidade da corrente tem influência no resultado final do cordão de solda, ou seja, pode alterar as características relativas à resistência deste cordão.

Por meio do ensaio de tração dos corpos de prova soldados em diferentes níveis de corrente, dentro da faixa definida, é possível conhecer as características relacionadas à tração em cada nível. Estas informações são importantes para que se identifique a corrente ideal e que dará a junta soldada o melhor resultado em aplicações onde estará sujeita a esforços de tração.

A escolha do material a ser soldado neste trabalho (AISI 304), se deve ao fato deste ser o mais popular entre os aços inoxidáveis, sendo comumente encontrado na indústria. Trata-se de um aço cromo-níquel 18-8 (18%Cr-8%Ni). O teor máximo de carbono neste aço é de 0,08%, sendo este um aço não temperável e não magnético (MODENESI, 2001).

A utilização do processo de soldagem TIG no desenvolvimento deste trabalho se deve a eficiência deste na soldagem de chapas finas. Apesar de este processo ter o seu custo considerado relativamente alto quando comparado aos outros processos de soldagem, é o processo mais utilizado industrialmente na soldagem de aços inoxidáveis e ligas não ferrosas (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

O argônio foi utilizado como gás de proteção durante a soldagem. A especificação do gás de proteção é definida de acordo com a aplicação, observando-se o metal de base e também a sua espessura. A AWS, através da norma 5.32 - *Especification for Welding Shielding Gases*, trata destas especificações, conforme descrito na tabela 5.

O metal de adição utilizado na soldagem foi o ER308L, na forma de vareta de 1,6mm de diâmetro, sendo este definido em função do metal de base. A composição deste tipo de eletrodo, aplicado a soldagem de aços inoxidáveis, é especificada pela AWS, através da norma 5.9 - *Especification for Bare Stainless Steel Welding Electrodes and Rods*. A composição química deste eletrodo pode ser observada na

Tabela .

Os corpos de prova foram fabricados a partir de chapas de 2mm de espessura, observando-se o sentido de laminação. A medida dos corpos de prova é de 30 x 50mm, conforme ilustrado na figura 17, sendo a solda localizada na face de medida 30mm. Após a soldagem, foi realizado o corte por meio de eletroerosão a fio no sentido transversal à solda e também no topo da peça soldada, extraindo-se uma peça de 20 x 90mm, conforme ilustrado na figura 18.



Figura 17 - Corpo de prova para soldagem

Fonte: Autor, 2013

A escolha do método de corte por eletroerosão a fio se deve a este ser um processo onde o aporte térmico é mínimo, não influenciando nas propriedades mecânicas do material na região onde o corte é realizado. Outra característica importante deste processo é o bom acabamento obtido nas faces onde o corte é realizado, sendo que esta condição favorece a preparação que se faz necessária para a análise da zona fundida.



Figura 18 - Corpo de prova soldado e cortado para ensaio

Fonte: Autor, 2013

Foi definido um número de dez corpos de prova a serem ensaiados em cada nível de corrente, sendo que corpos com cordão irregular ou que apresentaram trincas observadas através do ensaio de líquido penetrante foram descartados. Desta forma buscou-se diminuir a influência da variável humana nos resultados, sendo que este é um processo manual e esta se torna inevitável.

Os corpos de prova, já no formato final, foram submetidos ao ensaio de tração, para que seja identificada, dentre outras características, a resistência das soldas realizadas em diferentes níveis de corrente, e assim identificar o parâmetro ideal de soldagem para este tipo de chapa, submetido a esforços de tração.

3.1 EQUIPAMENTOS

Foi utilizada uma fonte inversora Sumig, modelo WS-180 para a realização da soldagem de forma manual. Trata-se de uma fonte com capacidade de executar soldas com corrente variando de 10 a 180A.

A tocha de soldagem acoplada à fonte é de modelo refrigerado pelo gás de proteção e bocal cerâmico de tamanho 5 (8mm). A tocha de soldagem, bem como a fonte utilizada, podem ser observadas na figura 19.



Figura 19 - Fonte de energia e tocha de soldagem
Fonte: Autor, 2013

3.2 PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM

O processo de soldagem foi realizado usando-se corrente contínua de polaridade direta (CC-), sendo o eletrodo ligado ao polo negativo da fonte. A realização dos cordões de solda foi na posição plana, usando-se juntas de topo sem abertura ou fresta. A faixa de

corrente foi definida entre 50 e 70A, sendo que estes valores são resultado dos valores médios das especificações da AWS - *Welding Handbook*, experimentos práticos e também recomendações de fabricantes de equipamentos e de metais de adição.

A variação da corrente foi de 5A, portanto a soldagem ocorreu em níveis de 50, 55, 60, 65 e 70A sucessivamente e, para que o nível de corrente estivesse correto, haja vista o controle analógico da fonte de soldagem, foi usado alicate amperímetro para conferência da corrente em circulação durante a soldagem. Os dados relevantes acerca das variáveis envolvidas neste processo de soldagem estão relacionados na tabela 6.

Tabela 6 - Variáveis envolvidas no processo de soldagem
Fonte: Autor, 2013

Espessura metal	Tipo de junta	Eletrodo W	Metal de adição	Corrente	Gás de proteção	Vazão
2 mm	Topo	EWTh 2%	ER308L	50 - 70	Argônio	7 l/min.

Na figura 20 pode ser observada a operação de soldagem, bem como os corpos de prova após a soldagem.



Figura 20 - Processo de soldagem e corpos de prova soldados
Fonte: Autor, 2013

O procedimento de soldagem foi realizado pelo soldador Cássio Carvalho, colaborador da empresa Raumak Máquinas. Os valores referentes aos corpos de prova e soldagem foram por mim custeados.

3.3 ANÁLISE DA ZONA FUNDIDA

Para que a zona fundida possa ser analisada, faz-se necessária a preparação dos corpos de prova e posterior revelação por meio de ataque químico. A preparação consiste na realização de lixamento nas faces do corpo de prova soldado. Para isto, inicialmente utilizou-se uma lixa de granulometria 320 para a remoção das maiores imperfeições deixadas pelo processo de corte. Após esta, foi realizado lixamento com lixa de granulometria 600, sendo que após esta operação a região já apresenta as condições de acabamento necessárias para a revelação da zona fundida.

A revelação é realizada através de ataque químico, onde a diferença na composição química dos metais de base e de adição torna-se visível e permite a mensuração da zona fundida. Para isto foi utilizado o reagente denominado Marble, sendo este composto de sulfato de cobre e ácido clorídrico ($\text{CuSO}_4 + \text{HCl}$). Este reagente é indicado para a revelação de regiões soldadas em aços inoxidáveis. A variação da penetração da solda pode ser observada na figura 21.

Após a revelação da zona fundida foi realizada a sua medição. Para isto foi utilizado o software de mensuração de imagens Klonk, sendo este um recurso que torna possível a medição de área e comprimento em imagens que possuam geometrias complexas.

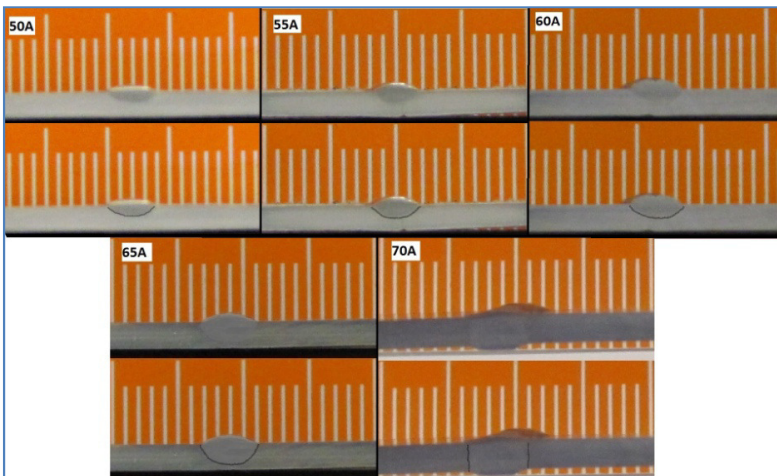


Figura 21 - Variação da penetração nos corpos de prova.

Fonte: Autor, 2013

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na soldagem a arco voltaico, a energia necessária para que haja a solubilização dos metais de base e de adição, é proveniente da passagem da corrente elétrica pelo gás ionizado. Variando-se esta corrente, há também a variação desta energia e consequentemente a variação da solubilização.

Aplicando-se esta variação de corrente na soldagem dos corpos de prova, estes apresentaram diferentes resultados relacionados à penetração dos cordões. Marques, Modenesi e Bracarense (2009) citam que quanto maior for a corrente de soldagem, maior será a penetração e também a largura do cordão de solda. Esta afirmação foi evidenciada através da análise da zona fundida nos corpos de prova e pode ser observada na figura 21. Nos níveis mais baixos de corrente, tem-se uma menor penetração, sendo esta aumentada conforme se aumentou a corrente de soldagem, chegando à penetração total na faixa de corrente de 70 A. Através da medição da zona fundida foi possível mensurar esta variação, sendo representada na figura 22.

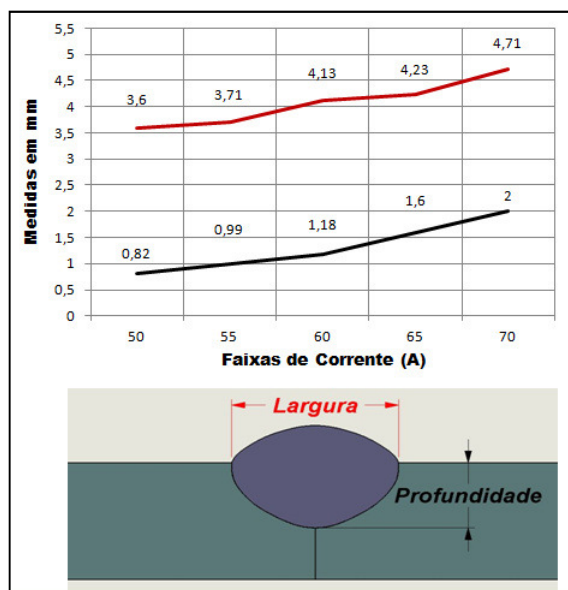


Figura 22 - Largura e profundidade dos cordões de solda.
Fonte: Autor, 2013

Em contrapartida, o aumento da energia de soldagem traz consequências sobre as propriedades mecânicas encontradas na ZTA, mais precisamente na região de grãos grosseiros. Nesta região, o tamanho do grão dependerá da natureza do ciclo térmico, sendo que, quanto maior for a energia de soldagem, mais grosseiro será o grão formado. A granulação maior dificulta a ocorrência de transformação no resfriamento, aumentando a temperabilidade nesta região (BERTOL, 2009).

Esta condição foi evidenciada quando os corpos de prova soldados foram submetidos individualmente ao ensaio de tração e a variação da resistência da solda foi percebida. Os resultados dos ensaios referentes ao limite de tensão de ruptura suportado por cada corpo de prova individualmente são apresentados na figura 23.

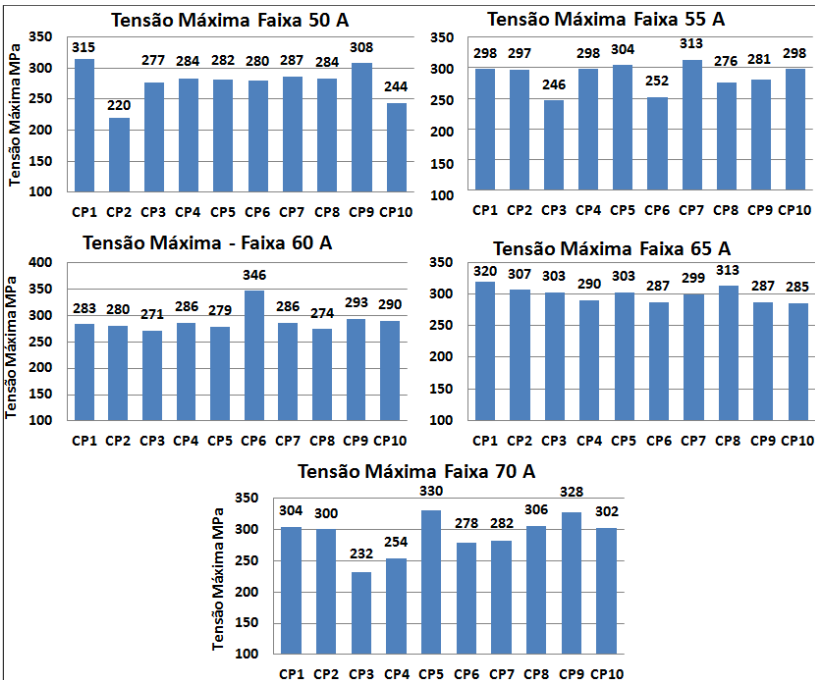


Figura 23 - Resultados dos ensaios de tração por faixa de corrente

Fonte: Autor, 2013

A partir de uma análise estatística dos valores obtidos através dos ensaios de tração, foi percebida uma dispersão relativamente alta nos valores de tensão, ou seja, depois de calculada a média destes resultados notou-se que os valores mínimo e máximo em cada nível de corrente tinham diferenças significativas em relação a esta média. Para quantificar esta dispersão foi calculado o desvio padrão. Este valor é de grande relevância na interpretação dos dados, uma vez que os valores médios podem omitir características como o afastamento do valor da tensão de ruptura de um ou mais corpos de prova em relação à média de cada nível de tensão. Os valores do desvio padrão, bem como os valores médios de tensão obtidos são representados na tabela 7.

Tabela 7 - Valores médios de tensão de ruptura e desvios padrão.

Fonte: Autor, 2013

Resumo de dados					
Faixas de corrente	50 A	55 A	60 A	65 A	70 A
Tensão de ruptura (média)	277,8	286,3	288,8	299,5	291,7
Desvio padrão	28	22	21	12	31

Para uma visualização da variação da tensão de ruptura os resultados dos ensaios de tração dos corpos de prova soldados em diferentes níveis de corrente foram compilados em um único gráfico. Neste foram comparados os valores médios obtidos em cada nível de corrente, bem como os desvios padrão para cada nível, sendo que estes dados podem ser observados na figura 24.

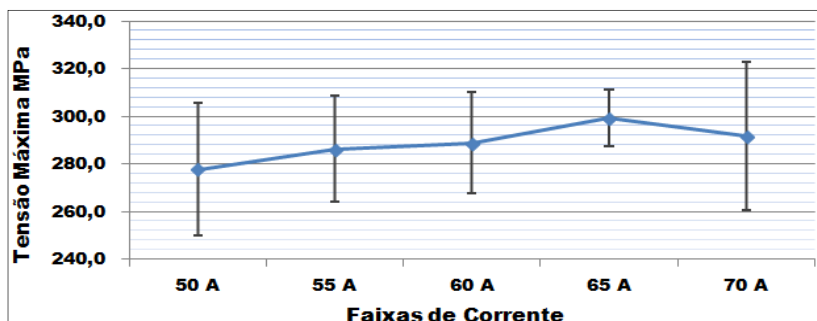


Figura 24 - Níveis de Tensão por Faixa de Corrente

Fonte: Autor, 2013

Através do gráfico, foi verificado um aumento na tensão de ruptura até o valor de corrente 65 A, porém além desta faixa é observada uma queda nesta tensão. Em todos os níveis de corrente é verificado um valor de desvio padrão relativamente alto, evidenciando assim a irregularidade dos valores obtidos em cada nível de corrente.

Para verificar se há diferença significativa entre os valores de tensão de ruptura obtidos no ensaio de tração, foi aplicada a análise de Variância (ANOVA), sendo que esta foi realizada utilizando-se um nível de significância de 0,05 (5%), ou seja, um nível de confiança na análise de 95%. Abaixo é apresentada a tabela 8 com os dados dos testes realizados com os 10 corpos de prova em cada faixa de corrente e que terão a sua variância analisada.

Tabela 8 - Dados obtidos nos ensaios de tração.
Fonte: Autor, 2013

Corpos de prova	Faixas de corrente				
	50 A	55 A	60 A	65 A	70 A
CP1	315	298	283	320	304
CP2	220	297	280	307	300
CP3	277	246	271	303	232
CP4	284	298	286	290	254
CP5	282	304	279	303	330
CP6	280	252	346	287	278
CP7	287	313	286	299	282
CP8	284	276	274	313	306
CP9	308	281	293	287	328
CP10	244	298	290	285	302

Os resultados obtidos através da análise Anova são apresentados nas tabelas 9 e 10 a seguir:

Tabela 9 - Resumo de dados Anova
Fonte: Autor, 2013

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
50 A	10	2778,31	277,83	778,05
55 A	10	2862,59	286,25	493,84
60 A	10	2887,89	288,78	453,77
65 A	10	2994,84	299,48	141,88
70 A	10	2916,71	291,67	962,47

Tabela 10 - Resumo de dados Anova
Fonte: Autor, 2013

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	2491,57	4	622,893	1,100505	0,368005	2,578739
Dentro dos grupos	25470,3	45	566,006			
Total	27961,8	49				

Verifica-se pela análise, que o *valor-p* calculado na Anova, é maior que o valor *p* teórico ($0,368 > 0,05$), o que significa que a diferença entre os resultados obtidos nos diferentes níveis de corrente não é significativa, ou seja, não há diferença nos valores da tensão de ruptura nos corpos de prova.

Isso pode ser explicado pelo fato de haver variáveis externas que não foram controladas, podendo ser a causa da variabilidade nos dados, como por exemplo, o comprimento do arco e a velocidade de soldagem. Observa-se ainda, que embora existam diferenças entre as médias encontradas, a variância em praticamente todos os tratamentos é alta, o que mostra que há grande variabilidade nas medições encontradas nos diferentes corpos de prova.

Outro fato que merece atenção é o tamanho da amostra. No experimento realizado foram utilizados 10 corpos de prova por faixa de corrente, ou seja, uma amostra do tamanho $n=10$. Verificando-se este tamanho de amostra, observa-se que a análise resultou em um intervalo de confiança para a tensão máxima de aproximadamente ± 14 MPa, o que contribui para que as diferenças entre as médias observadas não sejam significativas. O cálculo do intervalo de confiança pode ser observado a seguir.

$$n = \left(\frac{Z_{\alpha/2} \cdot \sigma}{E} \right)^2$$

n: Número de indivíduos da amostra

$Z_{\alpha/2}$: Valor crítico correspondente ao grau de confiança.

Geralmente utiliza-se 95% de confiança, logo $Z_{\alpha/2} = 1,96$.

σ : Desvio padrão populacional da variável estudada.

E: Margem de erro ou erro máximo de estimativa. Identifica a diferença máxima entre a média amostral e a verdadeira média populacional.

Assim, considerando " σ " a média dos desvios padrão encontrados para os 5 níveis de corrente, têm-se:

$$10 = \left(\frac{1,96 \cdot 22,87}{E} \right)^2$$

$$E = 14,18$$

Partindo-se para um erro amostral tolerável menor, em torno de ± 10 MPa, o tamanho da amostra seria de aproximadamente 20 elementos, conforme calculado a seguir:

$$n = \left(\frac{Z_{\alpha/2} \cdot \sigma}{E} \right)^2$$

$$n = \left(\frac{1,96 \cdot 22,87}{10} \right)^2$$

$$n = 20,09$$

5 CONCLUSÃO

A partir do trabalho de pesquisa bibliográfica sobre o assunto, juntamente com a análise dos ensaios práticos aqui apresentados, é possível concluir que:

Para a soldagem de chapas de aço inoxidável de espessura 2mm, não há especificação precisa do valor da corrente de soldagem, sendo que este valor oscila dentro de uma faixa de 20A. A variação de corrente para o referido material esta situada entre 50 a 70A.

O ajuste de corrente, dentro das faixas recomendadas, muitas vezes depende da experiência do profissional soldador, ou ainda é definido através de testes práticos, podendo não ser o parâmetro correto. Esta condição de empirismo pode não apresentar o melhor resultado acerca das características mecânicas desejadas na peça ou conjunto soldado.

A zona fundida teve significativa variação conforme variaram os valores de corrente, aumentando a sua área conforme se aumentaram estes valores. A zona fundida exerce influência na resistência da peça ou conjunto soldado. Esta condição foi evidenciada através dos ensaios práticos que tem base na literatura consultada durante a fundamentação teórica.

Os valores de tensão de ruptura da junta soldada de topo no referido material, obtidos a partir dos ensaios de tração dos corpos de prova tiveram variação conforme variaram os valores de corrente aplicados na soldagem. Embora a variação na tensão de ruptura não seja significativa, considerando-se os valores médios da tensão de ruptura, pode-se observar um aumento desta tensão até a faixa de 65A e posteriormente uma queda desta tensão de ruptura para o valor de corrente de 70A.

A área da zona fundida teve o maior valor nos corpos de prova soldados na faixa de corrente de 70A, porém essa condição apresentou resistência inferior se comparado ao nível de 65A. Com base nesse resultado, conclui-se que o aumento da energia de soldagem traz consequências sobre as propriedades mecânicas da zona fundida, sendo que esta se torna frágil e suscetível à formação de trincas se não for respeitado o aporte térmico máximo aplicado na operação de soldagem.

A partir de uma análise estatística dos resultados expressos na figura 25, onde os valores dos desvios padrão calculados em cada faixa de corrente são representados, foi verificada a irregularidade nos valores obtidos nos ensaios de tração, podendo esta variação estar relacionada

ao comprimento do arco e conseqüente variação da tensão na soldagem. Esta condição está diretamente relacionada ao processo de soldagem manual, onde não há um controle preciso do comprimento do arco de soldagem. Para uma análise visando-se obter diferenças significativas nos valores da tensão de ruptura, o processo de soldagem deverá ser realizado sem a variação no comprimento do arco e velocidade da soldagem, para isto, não deverá ser realizado manualmente e sim usando de mecanismos que inibam esta variável, sendo que o tamanho da amostra a ser soldada e ensaiada deverá ser aumentado conforme os cálculos apresentados.

Para aplicações de soldagem TIG, utilizando a corrente elétrica dentro da faixa de 50 a 70A, em chapas de aço inoxidável AISI 304 de espessura 2mm, onde a junta soldada for de topo e a peça ou conjunto soldado seja submetido a esforços de tração, com base nos resultados dos ensaios realizados, não foi observada diferença significativa na tensão de ruptura dos corpos de prova, sendo necessária uma análise que busque resultados mais consistentes, conforme descrito neste trabalho.

6 REFERÊNCIAS

AMERICAN WELDING SOCIETY - AWS: **Welding Handbook; Welding process**. Miami: AWS, v. 2, 8a edição, 1991.

_____. **Especification for Bare Stainless Steel Welding Electrodes and Rods**. Miami: AWS, v. , 1992.

_____. **Especification for Welding Shielding Gases**. Miami: AWS, 1997.

_____. **Symbols for welding, brazing, and nondestructive examination**. Miami: AWS, v. A 2.4, 1998a.

_____. **Tungsten Electrodes for Arc Welding and Cutting**. Miami: AWS, 1998b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6152: Materiais Metálicos - Ensaio de tração à temperatura ambiente**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2002. 2 p.

BALLESTEROS, A. F. **Avaliação da Resistência de Juntas Soldadas Circunferenciais de Aço API 5L X-80 à Corrosão sob Tensão na presença de Sulfetos e Susceptibilidade à Fragilização por Hidrogênio**. Tese Doutorado (Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro). Rio de Janeiro. 2009.

BARRA, S. R. **Influência do Processo MIG/MAG Térmico Sobre a Microestrutura e a Geometria da Zona Fundida**. Tese Doutorado (Universidade Federal de Santa Catarina - Departamento de Engenharia Mecânica). Florianópolis. 2003.

BERTOL, H. C. **Determinação de Critérios para Aceitação de Medições de Dureza Realizadas com Durômetros Portáteis em Regiões de Soldas**. Dissertação de Mestrado (Universidade Federal do Rio Grande do Sul). Porto Alegre. 2009.

CARBÓ, H. M. **Aço Inoxidável - Aplicações e Especificação**. Acesita. Itabira. 2001.

FERNANDES, M. A.; SILVA, M. C.; MARIANO, N. A. **Avaliação da Tenacidade ao Impacto do Aço Inoxidável AISI 304 em Juntas Soldadas**. Univeridade São Francisco. São Paulo. 2009.

GARCIA, A.; SPIN, J. A.; DOS SANTOS, C. A. **Ensaio dos Materiais**. Campinas: LTC, 2000.

HISTORY of TIG (GTAW) Welding Invention and Development. **WA TECHNOLOGY**. Disponível em: <http://www.netwelding.com/History_TIG_Welding.htm>. Acesso em: 10 set 2013.

INFOSOLDA. **Processo TIG - Parâmetros**, 2013. Disponível em: <<http://www.infosolda.com.br/biblioteca-digital/livros-senai/processos/169-processo-tig-parametros.html>>. Acesso em: 19 set 2013.

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem - Fundamentos e Tecnologia**. Belo Horizonte: UFMG, 2009.

MODENESI, P. J. **Soldabilidade do Aços Inoxidáveis**. SENAI - Coleção Tecnologia de Soldagem. Osasco. 2001.

MODENESI, P. V. **Terminologia Usual de Soldagem e Símbolos de Soldagem**. Belo Horizonte. 2008.

MODENESI, P. V. **Fontes de Energia para Soldagem a Arco**. Belo Horizonte. 2009.

MODENESI, P. V. **Introdução à Física do Arco Elétrico**. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2012.

OZORIO, L. D. M. et al. **Avaliação de opções de troca de produto em siderúrgicas integradas**. Brazilian Business Review. Vitória. 2013.

QUITES, A. M. **Introdução à Soldagem a Arco Voltaico**. Florianópolis: Soldasoft, 2002.

SOUZA, S. A. **Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos - Fundamentos Teóricos e Práticos**. 5. ed. São Paulo: Blucher, 1982.

TEIXEIRA, G. S. **Análise da Influência dos Parâmetros de Soldagem Sobre a Geometria do Cordão de Solda Depositado pelo Processo TIG-MAG em Tandem**. Dissertação de Mestrado (Universidade Federal do Rio Grande do Sul). Porto Alegre. 2011.

WAINER, E.; DUARTE, S. D.; DE MELLO, S. D. H. **Soldagem - Processos e Metalurgia**. São Paulo: Edgar Blucher Ltda., v. 2a Edição, 1992.

ZEEMANN, A. **Soldagem de Tubos**. TECMETAL. Rio de Janeiro. 2006.