



FACULDADE HORIZONTINA

PABLO DIEGO TONEL

**ANÁLISE DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE JUNTAS
SOLDADAS SOBRE O AÇO TMCP COM CONSUMÍVEIS
“UNDERMATCHING” E “OVERMATCHING”**

HORIZONTINA

2016

FACULDADE HORIZONTINA
Curso de Engenharia Mecânica

PABLO DIEGO TONEL

**ANÁLISE DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE JUNTAS
SOLDADAS SOBRE O AÇO TMCP COM CONSUMÍVEIS
“*UNDERMATCHING*” E “*OVERMATCHING*”**

Trabalho Final de Curso apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, pelo Curso de Engenharia Mecânica da Faculdade Horizontina.

ORIENTADOR: Rafael Luciano Dalcin, Mestre.

CO-ORIENTADOR: Guilherme Jost Beras, Mestre.

HORIZONTINA-RS

2016



**FAHOR - FACULDADE HORIZONTALINA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a monografia:

**“ANÁLISE DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE JUNTAS SOLDADAS SOBRE
O AÇO TMCP COM CONSUMÍVEIS “*UNDERMATCHING*” E “*OVERMATCHING*”**

Elaborada por:

Pablo Diego Tonel

**Aprovado em: 25/11/2016
Pela Comissão Examinadora**

**Mestre. Rafael Luciano Dalcin
Presidente da Comissão Examinadora - Orientador**

**Mestre. Guilherme Jost Beras
Co-Orientador – Faculdade Horizontina**

**Mestre. Cristiano Rosa dos Santos
FAHOR – Faculdade Horizontina**

**HORIZONTALINA- RS
2016**

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho em especial aos meus pais Teresinha Fátima e João Carlos Tonel, a minha namorada Mariana Jaeger e a todos meus amigos que de alguma forma direta ou indireta me ajudaram nessa caminhada.

AGRADECIMENTO

Em primeiro lugar gostaria de agradecer a Deus por permitir a conquista deste sonho, resultado de lutas e vitórias, sempre me indicando o melhor caminho!

Agradeço também aos meus Pais! Obrigado, por tudo, sempre, pela vida, pelos ensinamentos, pelos valores, por me apoiarem em todos os momentos e me ensinarem tanto. Esse sonho não é só meu, mas sim de vocês também. Amo muito vocês!

Aos meus amigos, obrigado pelas horas de compreensão, pelo ombro disponível para me ouvir durante todos esses anos, vocês realmente são os irmãos que a vida me permitiu escolher.

Agradeço a empresa John Deere Brasil que permitiu a realização deste trabalho, e as pessoas que me auxiliaram na construção deste trabalho, em especial ao Tiago Daniel pelo suporte nos testes laboratoriais.

Juntam-se a estes os agradecimentos aos mestres que me mostraram o caminho para chegar aqui. Em especial ao meu orientador Mestre Rafael Luciano Dalcin e meu Co-orientador Mestre Guilherme Jost Beras, pela sua dedicação e conhecimento.

Determinação, coragem e autoconfiança são fatores decisivos para o sucesso. Se estamos possuídos por uma inabalável determinação conseguiremos superá-los. Independentemente “das circunstâncias, devemos ser sempre humildes, recatados e despidos de orgulho” (Dalai Lama).

RESUMO

Nos dias atuais as empresas estão buscando colocar no mercado produtos de maior qualidade e melhor desempenho em componentes soldados, com isso estão empregando aços com maior resistência para redução de peso em produtos. A introdução dos aços produzidos por processo termomecânico controlado (TMCP) ocorre principalmente em situações onde é necessária a redução de peso, ou aumento da carga suportada por seus produtos. Esse aço caracteriza-se por ter grande limite elástico para a conformação a frio e boa soldabilidade. Este trabalho tem por objetivo obter dados referentes à eficiência mecânica de juntas soldadas pelo processo MAG robotizado, com diferentes energias de soldagem sobre chapas do aço TMCP. Três energias de soldagem e dois metais de adição foram utilizados (AWS ER70S-6 e AWS ER120S-G), o primeiro metal de adição apresenta resistência mecânica menor que a do metal base (*undermatching*), e o segundo com resistência mecânica maior que a do metal base (*overmatching*). Trinta corpos de prova foram soldados para a realização dos experimentos, sendo dezoito destinados para ensaios de tração, seis para ensaios de dobramento e seis para ensaios de microdureza e metalográfico. Comparando as juntas soldadas com a mesma energia, aquelas realizadas com o metal de adição *overmatching* apresentaram maior resistência à tração quando comparadas as soldadas com o metal de adição *undermatching*. Além disso, com o uso da energia de soldagem de 0,67 kJ/mm, as juntas soldadas com o metal de adição *undermatching* apresentaram os melhores resultados, entretanto nas juntas soldadas com o metal de adição *overmatching*, os melhores resultados foram com a energia 0,57 kJ/mm.

Palavras-chave: Aço TMCP. Soldagem MAG robotizada. Energia de soldagem. Resistência mecânica da junta soldada.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama de Graville.....	16
Figura 2 - Esquemática do processo de soldagem MAG.....	20
Figura 3 - Perfil típico de cordões de solda feitos com diferentes gases.....	21
Figura 4 - Corpo de prova utilizado.....	24
Figura 5 - Ensaio de dobramento.....	25
Figura 6 - Chapas montadas no dispositivo e posicionadas para a soldagem.	27
Figura 7 - Regiões de medição da microdureza.	31
Figura 8 - Corpos de prova metalografia.....	32
Figura 9 - Área da ZAC x área do metal de solda por energia de soldagem.....	33
Figura 10 - Perfil de microdureza nos corpos de prova 1 e 7.....	34
Figura 11 - Perfil de microdureza nos corpos de prova 3 e 9.....	34
Figura 12 - Perfil de microdureza nos corpos de prova 5 e 11.....	35
Figura 13 - Corpos de prova dobramento.....	36
Figura 14 - Energia de soldagem em cada corpo de prova (AWS ER70S-6).	ERRO!
INDICADOR NÃO DEFINIDO.	
Figura 15 - Energia de soldagem em cada corpo de prova (AWS ER120S-G).....	37
Figura 16 - Corpos de prova de tração (AWS ER70S-6).	38
Figura 17 - Corpos de prova de tração (AWS ER120S-G).	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química do metal base.	26
Tabela 2 - Propriedades mecânicas do metal base.	26
Tabela 3 - Composição química medida dos metais de adição.	27
Tabela 4 - Propriedades mecânicas dos metais de adição.	28
Tabela 5 - Parâmetros empregados para a realização dos cordões de solda.....	28
Tabela 6 - Variação dos parâmetros para cada corpo de prova de tração	29
Tabela 7 - Variação dos parâmetros para os corpos de prova de dobramento.	30
Tabela 8 - Variação dos parâmetros para os corpos de prova de metalografia.	30

LISTA DE SIGLAS

MB = Metal base.

MS = Metal de solda.

ZAC = Zona afetada pelo calor.

TMCP = Produzido por processamento termomecânico controlado.

MAG = Processo de soldagem com eletrodo consumível e com proteção por gás “ativo” (oxidante).

Metal de adição *undermatching* = Resistência mecânica menor que o MB.

Metal de adição *overmatching* = Resistência mecânica maior que o MB.

HV = Microdureza Vickers (HV 1).

U = Tensão média (V).

I = Corrente média (A).

v = Velocidade de soldagem (mm/s).

E = Energia de soldagem (kJ/mm).

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 TEMA.....	12
1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA.....	13
1.3 PROBLEMA DE PESQUISA	13
1.4 JUSTIFICATIVA	13
1.5 OBJETIVO GERAL	13
1.6 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
2 REVISÃO DA LITERATURA	15
2.1 PROCESSOS DE FABRICAÇÃO E ASPECTOS METALÚRGICOS DOS AÇOS TMCP.....	15
2.1.1 Características dos aços TMCP	15
2.1.2 Soldabilidade dos aços TMCP	16
2.1.3 Efeitos da energia de soldagem sobre a ZAC dos aços TMCP.....	17
2.1.4 Influência dos consumíveis sobre a resistência de juntas soldadas de aços TMCP.	18
2.2 PROCESSOS DE SOLDAGEM MAG.....	19
2.2.1 Gás de proteção.....	21
2.2.2 Modos de transferência metálica.....	22
2.2.3 Soldagem MAG robotizada	22
2.3 ENSAIOS MECÂNICOS.....	23
2.3.1 Ensaio de tração	23
2.3.2 Ensaio de Microdureza.....	24
2.3.3 Ensaio de dobramento.....	25

3 METODOLOGIA.....	26
3.1 MATERIAL E MÉTODOS.....	26
3.1.1 Metal base.....	26
3.1.2 Procedimento de soldagem	26
3.1.3 Caracterização das juntas soldadas	28
3.1.4 Procedimentos adotados para ensaio.....	29
4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	32
4.1 CARACTERIZAÇÕES DAS AMOSTRAS	32
4.1.1 Análise das macrofotografias	32
4.1.2 Análise dos perfis de Microdureza.....	33
4.1.3 Análise dos ensaios de dobramento.....	35
4.2 RESISTÊNCIAS DAS JUNTAS SOLDADAS	36
4.2.1 Efeitos da energia de soldagem e consumíveis sobre as juntas soldadas.....	36
4.2.2 Região de fratura dos corpos de prova.....	38
4.3 DISCUSSÕES SOBRE O RESULTADO DOS EXPERIMENTOS.....	39
CONCLUSÕES.....	41
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	42

1 INTRODUÇÃO

A procura por produtos de alta qualidade, mais resistentes e mais leves, impulsionou o desenvolvimento de aços produzidos pelo processo termomecânico controlado (TMCP). Os aços TMCP apresentam limite de escoamento e resistência à tração maior do que os aços doces, e conseqüentemente um alongamento menor. Em função destes fatores, é necessário um estudo mais aprofundado sobre as propriedades mecânicas das juntas soldadas utilizando esses aços. Outro fator determinante da resistência das juntas soldadas são os consumíveis utilizados, portanto o metal de adição a ser adicionado nas juntas deve ser compatível com o aço utilizado (BARBOSA, 2007).

Nos últimos anos o processo de soldagem MAG tem se destacado cada vez mais nas indústrias, devido esse processo apresentar cordões de solda com boa qualidade, alta produtividade e grandes possibilidades para automatização do processo. Os modos de transferência metálica dos metais de adição no processo de solda MAG podem ser por curto circuito, spray, globular e pulsado. A taxa de resfriamento do metal de solda é relativamente rápida, sendo possível aplicar os cordões em chapas finas e/ou chapas com espessuras mais elevadas (MODENESI, 2001).

A utilização de um metal de adição condizente com as propriedades mecânicas do aço faz-se cada vez mais necessária, devido à busca por juntas soldadas mais resistentes e de maior qualidade. Cada vez mais os produtos estão sendo fabricados próximos do seu limite de ruptura, pois o objetivo principal das indústrias é baixar os custos e aumentar a sua margem de lucro.

Tendo em vista este contexto, juntas soldadas com dois metais de adição em um mesmo MB, apresentarão propriedades mecânicas distintas?

1.1 TEMA

Tendo em vista a necessidade de obtermos juntas soldadas condizentes com as propriedades do MB, este trabalho tem como foco principal avaliar as propriedades mecânicas destas juntas soldadas, utilizando metais de adição com limite de resistência à tração menor do que a do MB “*undermatching*”; e metais de adição com limite de resistência à tração maior do que a do MB “*overmatching*”.

1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA

O estudo comparativo do trabalho em questão desconsidera as variações humanas no processo de soldagem, pois os testes foram feitos em um sistema robotizado. As variações consideradas no processo foram as seguintes:

- Metal base;
- Metal de adição;
- Parâmetros de soldagem.

1.3 PROBLEMA DE PESQUISA

Uma determinada empresa do ramo metal mecânico possui produtos soldados que utilizam aços TMCP e metal de adição *undermatching*. Devido ao metal de adição ter propriedades mecânicas inferiores à do aço em questão, pode estar gerando um problema grave de qualidade de seus produtos.

1.4 JUSTIFICATIVA

A soldagem de aços TMCP requer a adição de um metal de solda que seja condizente com o aço utilizado. As empresas desejam aumentar a resistência de seus produtos colocando aços de maior resistência em seus processos, mas por muitas vezes não são levados em considerações às propriedades mecânicas do aço e do metal de adição. Este trabalho se justifica pelo fato de existir consumíveis com as propriedades mecânicas condizentes ao aço utilizado, portanto, é possível eliminar a ocorrência de falhas causadas dos produtos se for utilizado corretamente os parâmetros e os consumíveis apropriados.

1.5 OBJETIVO GERAL

O trabalho em questão tem como objetivo geral fazer um estudo comparativo de juntas soldadas sobre aço TMCP (limite de resistência a tração entre 750 e 950 MPa) com um metal de adição “*undermatching*” (limite de resistência a tração de 480 MPa) e com um metal de adição “*overmatching*”, (limite de resistência a tração de 875 MPa).

1.6 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar os cordões de solda na posição plana em juntas topo, utilizando corpos de prova de aço TMCP com 4,5 mm de espessura e chanfro de 45°;
- Realizar a soldagem dos corpos de prova com os metais de adição AWS ER70S-6 “*undermatching*” e AWS ER120S-G “*overmatching*”, empregados individualmente;
- Fazer análise metalográfica da secção transversal dos corpos de prova, para avaliar a penetração da junta soldada;
- Fazer ensaios de resistência à tração dos corpos de prova para verificar as propriedades mecânicas da junta soldada com os dois tipos de metais de adição;
- Fazer perfis de microdureza nas juntas soldadas para verificar a dureza em diversos pontos da junta soldada;
- Realizar teste de dobramento para verificar a formação e trincas na junta soldada.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Nessa seção será descrito os principais fundamentos referentes à soldabilidade do aço TMCP pelo processo de soldagem MAG. Além disso, é apresentado um embasamento teórico sobre os principais modos de transferência metálica, soldagem robotizada, consumíveis (gás de proteção; metais de adição) e ensaios mecânicos.

2.1 PROCESSOS DE FABRICAÇÃO E ASPECTOS METALÚRGICOS DOS AÇOS TMCP

2.1.1 Características dos aços TMCP

Para Bhadeshia e Honeycombe (2006), a fabricação dos aços TMCP tem sido voltada para aperfeiçoar o efeito do refino de grão no aumento da resistência e da tenacidade, sendo assim a fabricação de aços endurecidos por transformação de fases, dá-se pela redução do teor de carbono e o aumento dos teores de manganês. Esses tipos de aços apresentam uma tensão de escoamento contínuo e um aumento significativo na resistência à tração quando comparados com aços comuns.

Os aços TMCP tem um conceito principal de garantir e melhorar as propriedades mecânicas com as mudanças de microestruturas durante o processo de deformação a quente. No processo de fabricação do aço a um rigoroso controle da austenita durante a etapa de laminação a quente, para que seus grãos se transformem em ferrita refinada ao final do processo (BHADESHIA; HONEYCOMBE, 2006).

Aços TMCP apresentam alto limite elástico para conformação a frio com boa soldabilidade. Com essas características esses aços são adequados para diversas aplicações estruturais, tais como, equipamentos para terraplanagem, chassis de implementos rodoviários, itens para a indústria automobilística, e guindastes. Através dessas aplicações a resistência elevada dos aços é utilizada para diminuir o peso das estruturas ou produtos e aumentar a carga suportada pelas estruturas feitas deste material (SSAB TUNNPLANT, 2004).

Os aços Domex de perfilagem a frio são aços laminados termomecanicamente em instalações modernas onde o aquecimento, laminagem e processos de refrigeração são cuidadosamente controlados. A análise química, consistindo de baixos níveis de carbono e manganês são precisas e adição de refinadores de grãos tais como nióbio, titânio ou vanádio (FRISK, 2007).

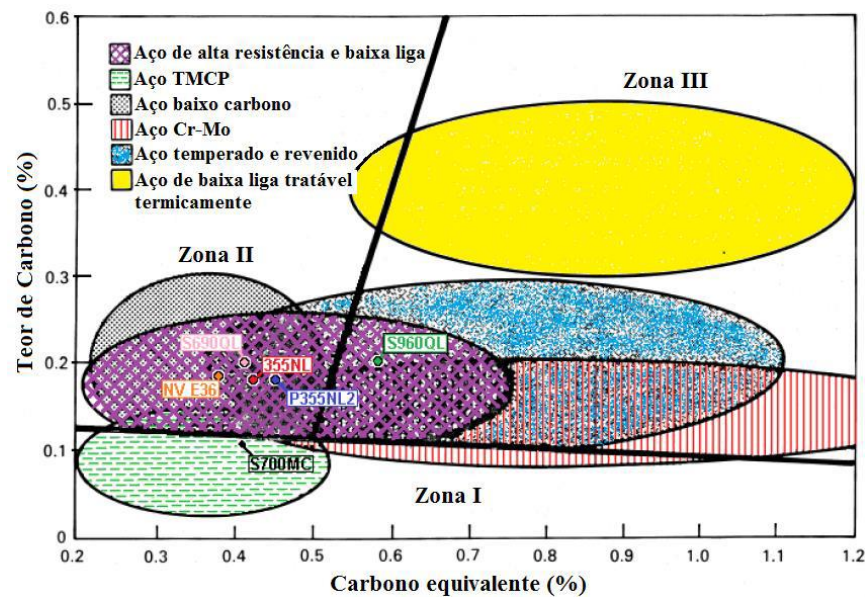
A soldabilidade do aço TMCP é boa, não sendo necessário o pré-aquecimento das chapas. Podem ser empregados no aço todos os tipos de soldas convencionais. Para a garantia de boa qualidade da solda, deve ser empregado um metal de adição que corresponda com as propriedades mecânicas deste aço (FRISK, 2007).

2.1.2 Soldabilidade dos aços TMCP

Para a SSAB Tunplatt (2004), a sensibilidade à formação de trincas está relacionada diretamente a soldabilidade de um aço. Existem diversas normas nas quais estabelecem valores máximos para o carbono equivalente para reduzir a formação de uma zona afetada pelo calor (ZAC) com dureza elevada e, conseqüentemente a fissuração a frio. Através do valor de carbono pode-se relacionar a composição química de um aço com a possibilidade de o mesmo apresentar estruturas frágeis. Nesses aços o teor de carbono é especificado pela *International Institute of Welding (IIW)*.

O diagrama de Graville mostra que os aços TMCP estão na Zona I, o que indica que estes aços têm baixo teor de carbono e baixa temperabilidade, assim não é necessário o pré-aquecimento dos mesmos antes da soldagem, pois eles não são sensíveis à fissuração a frio (DAVIS, 2006; DALCIN, 2016).

Figura 1 - Diagrama de Graville.



Fonte: Davis, 2006, p. 78.

Para aumentar à resistência a ruptura da ZAC dos aços TMCP, e evitar a formação de microestruturas que contenham grãos grosseiros de bainita, ferrita, é necessário adicionar elementos de liga como nióbio, titânio, vanádio e boro para suprir o aumento de grão austenítico durante o processo de soldagem. Os baixos teores de carbono e nitrogênio favorecem o aumento da ZAC nos aços TMCP (GLADMAN, 1997).

A resistência à fratura da ZAC diminui com o aumento dos teores de vanádio e nióbio. Esses elementos são frequentemente utilizados em aços avançados de alta resistência para que o processo de recristalização da austenita e o endurecimento por precipitação seja inibido. O processo de laminação controlado e do resfriamento acelerado em conjunto favorecem a soldabilidade dos aços TMCP (TAMURA *et al.*, 1988).

2.1.3 Efeitos da energia de soldagem sobre a ZAC dos aços TMCP

A quantidade de energia fornecida por determinada unidade de tamanho de cordão de solda pelo seu deslocamento de uma fonte de calor é denominada energia de soldagem. A energia de soldagem provoca alterações no metal base e no metal de adição, independente de sua origem. Os aspectos da junta soldada como a macroestrutura do metal de adição, o crescimento dos grãos e as transformações na microestrutura, são estabelecidos pelo fluxo térmico e tem grande influência nesses aspectos citados acima (MACHADO, 2000; DALCIN, 2016).

Equação utilizada para calcular a Energia de Soldagem.

$$E = \frac{U * I}{V}$$

E = Energia de Soldagem, I = Corrente, V = Tensão, U = Velocidade de Soldagem

Os elementos de ligas adicionados nos aços TMCP influenciam diretamente as propriedades do metal de adição e a junta soldada, pois o metal de adição é diluído a partir do MB, com isso as propriedades mecânicas do metal de adição são influenciadas pelos elementos de liga do metal de adição e do MB (AKBARNEJAD, 2012).

No processo de soldagem dos aços TMCP formam-se regiões de baixa dureza na ZAC devido às microestruturas sofrerem alterações. A dureza e a microestrutura podem sofrer alterações devido à composição química do MB e do metal de solda (SSAB TUNNPLAT, 2004; DALCIN, 2016).

Se a energia de soldagem for alta, a taxa de resfriamento será baixa, entretanto, as taxas de resfriamentos são altas quando a energia de soldagem for baixa. Com a energia de soldagem elevada a ZAC irá aumentar e a dureza será menor, portanto esses itens devem ser controlados durante o processo de soldagem (LANCASTER, 1999; SSAB TUNNPLAT, 2004; DALCIN, 2016).

2.1.4 Influência dos consumíveis sobre a resistência de juntas soldadas de aços TMCP

Um dos fatores de grande importância a se considerar na solda MAG é a escolha correta do metal de adição (arame de solda), pois o metal de adição em soma com o gás de proteção formará um depósito químico, no qual determinará as propriedades físicas e mecânicas da solda. Existem alguns fatores que influenciam a escolha do metal de adição para a soldagem MAG, dentre eles (ESAB, 2004):

- A composição química do MB;
- As propriedades mecânicas do MB;
- O gás de proteção empregado;
- O tipo de serviço ou os requisitos da especificação aplicável;
- O tipo de projeto de junta.

A grande experiência na soldagem industrial levou a *American Welding Society* — AWS — a simplificar a seleção. Foram desenvolvidos e fabricados arames que produzem os melhores resultados com metais base específicos. Embora não exista uma especificação aplicável à indústria em geral, a maioria dos arames está em conformidade com os padrões da AWS (ESAB, 2004).

AWS ER70S-6 é um arame maciço indicado para soldagem de aços carbonos e com baixos níveis de impurezas. Durante a soldagem mantém o arco estável, com baixos níveis de respingos, ótimo acabamento e adequado tanto para transferência curto circuito, spray e globular. Possui uma camada uniforme de revestimento de cobre e uma quantidade adequada de lubrificante que auxilia na alimentação (LINCOLN ELECTRIC, 2016) (1).

AWS ER120S-G é um arame maciço indicado para soldagem de aços carbonos e com baixos níveis de impurezas. Ótimo resultado a impacto a -40°C . Pode ser soldado por transferência spray, curto circuito, globular, pulsada e modos avançados (LINCOLN ELECTRIC, 2016) (2).

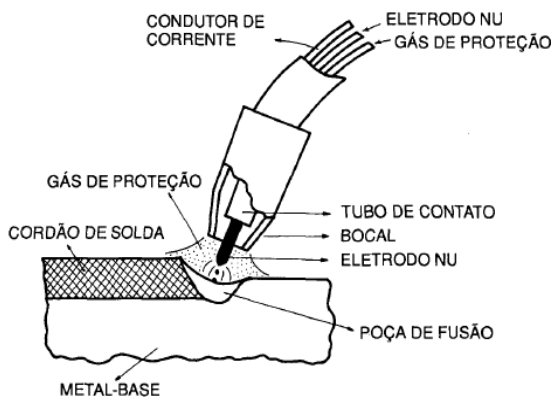
Com a utilização de metais de adição “*undermatching*” é possível diminuir a tendência à trinca, tanto no metal de adição, quando no MB, pois o metal de adição é mais dúctil. Estes metais de adição geralmente são usados para reduzir a concentração de tensão no metal base, e sua empregabilidade pode ser para todos os tipos de solda e carregamento, com exceção a juntas soldadas com penetração completa carregados em tração. Juntas soldadas com penetração completa em cisalhamento ou carregamento paralelo ao eixo longitudinal também podem ser soldadas com este consumível (MILLER 1994; MACHADO, 2012; DALCIN, 2016).

Utilizando metal de adição “*overmatching*” é possível reduzir a massa do metal de adição, porém, o uso deste metal de adição pode produzir indesejáveis e altas tensões residuais, podendo ocasionar trincas. A resistência do filete e das juntas soldadas sem penetração completa é controlada pela dimensão da garganta, comprimento de solda, e pela resistência mecânica do metal de adição. Entretanto, a resistência mecânica de uma junta soldada também depende da área da interface entre o metal de adição e o MB, ou seja, para uma carga igual quanto menor for esta área, maior será a tensão (cisalhamento ou normal), podendo gerar um esforço excessivo no MB. Em teoria, o metal de adição “*overmatching*” permite que os tamanhos das soldas sejam menores e com igual resistência mecânica àsquelas produzidas com consumível “*undermatching*” (MILLER 1994; MACHADO, 2012; DALCIN, 2016).

2.2 PROCESSOS DE SOLDAGEM MAG

O processo MAG é um dos processos de soldagem mais utilizados pelas indústrias, pois com esse processo tem-se um aumento de confiabilidade das juntas soldadas, um custo de produção baixo e uma alta produtividade (LIAO; CHEN, 1998). O processo de soldagem MAG é um processo aonde a união das chapas é produzida pelo aquecimento com um arco elétrico estabelecido entre o eletrodo metálico nu, consumível, e a peça de trabalho. A proteção do arco e do poço de fusão da solda contra a contaminação pela atmosfera e feita por um gás ou mistura de gases (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE 2005). A Figura 2 apresenta o esquemático do processo de soldagem MAG.

Figura 2 - Esquemática do processo de soldagem MAG.



Fonte: Brandi; Wainer; Mello, 2004, p. 31.

A soldagem MAG pode ser realizada por dois processos distintos, que se diferem pelo tipo de gás utilizado na proteção da poça de fusão. Em um deles o gás é inerte, ou seja, não exerce nenhuma atividade física na poça de fusão. Normalmente esse gás é monoatômico como, por exemplo: gás hélio e argônio. Enquanto que em outro o gás é ativo, ou seja, o gás tem uma interação com a poça de fusão. Neste caso normalmente; e utilizado o gás CO_2 (dióxido de carbono) e o oxigênio (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2005).

Para Barbosa (2007), o processo de soldagem MAG é um processo versátil e apresenta algumas vantagens:

- Custo mais baixo em relação a outros processos de soldagem;
- Maior velocidade de soldagem;
- Solda com boa qualidade;
- Bom acabamento dos cordões;
- Ausência de escórias;
- Facilidade de automação do processo (solda robotizada);
- Maior produtividade devido à alta taxa de deposição de material;
- Visibilidade total do ponto de fusão;
- Possibilidade de realizar soldas em várias posições.

O mesmo autor descreve que o processo de soldagem MAG também apresenta limitações, tais como:

- Resfriamento rápido pela ausência de escória, podendo ocasionar trincas;
- Equipamento de soldagem com custo elevado;
- Surgimento de respingos pelo processo de solda;
- Metais de adição imitados no mercado;

- Processo influenciado pelo ar;
- Grande emissão de raios ultravioletas.

2.2.1 Gás de proteção

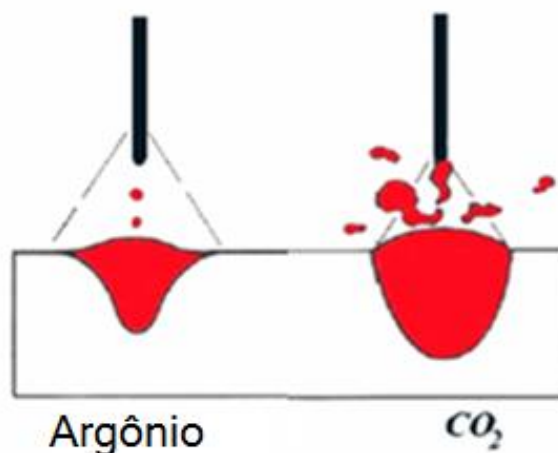
A escolha do tipo de gás influencia nas características do arco e a transferência de metal, a penetração, a largura e o formato do cordão de solda, a velocidade máxima de soldagem, a tendência ao aparecimento de mordeduras e o custo de operação, conforme ilustrado na Figura 3 (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2005). O ar atmosférico na região de soldagem é expulso pelo gás de proteção com o objetivo de que não haja a contaminação da poça de fusão. A contaminação é causada principalmente pelo nitrogênio (N_2), oxigênio (O_2) e vapor d'água (H_2O) presentes na atmosfera (ESAB, 2004).

Para a soldagem com gás inerte, o Argônio é o mais utilizado, e para a soldagem com gás ativo, o dióxido de carbono é o mais utilizado. Também dependendo da geometria do cordão desejado, pode-se usar uma mistura de gases inertes e ativos para atingir o objetivo (GIMENES; RAMALHO, 2005).

A mistura de gases ativos aos gases inertes tem como objetivo de gerar uma maior estabilidade do arco elétrico. A adição de pequenas quantidades de gases ativos tem as seguintes funções (BRANDI; WAINER; MELLO, 2004):

- Aumentar a penetração;
- Mudar o contorno na secção transversal;
- Reduzir mordeduras e respingos.

Figura 3 - Perfil típico de cordões de solda feitos com diferentes gases.



2.2.2 Modos de transferência metálica

Existem quatro formas principais de transferência de metal no processo de solda MAG: transferência por curto-circuito, transferência globular, transferência spray e transferência por arco pulsado (BRANDI; WAINER; MELLO, 2004).

Na transferência por curto circuito as menores faixas de correntes e os menores diâmetros de arames são utilizados nesse sistema de transferência. Esse tipo de transferência produz uma poça de fusão pequena, com resfriamento rápido, sendo geralmente indicada para soldagem de seções finas, soldagem fora da posição plana e uniões com abertura excessiva de raiz. Nesse processo, o metal é transferido do eletrodo para a poça somente durante o período em que gota faz o contato (BRANDI; WAINER; MELLO, 2004).

Na transferência globular as tensões são mais elevadas do que na transferência por curto-circuito. Neste tipo de transferência a força gravitacional faz a transferência das gotas de metal fundido para a poça de fusão, com isso limita-se esse tipo de transferência à posição plana. É comum ocorrer respingos, falta de fusão e penetração nesse tipo de transferência (QUITES, 2002).

A transferência por spray ocorre para maiores densidades de correntes e quando utilizado gás de proteção argônio ou mistura de argônio. Uma gota menor que o diâmetro do eletrodo é formada em sua ponta para que esse tipo de transferência possa acontecer. Neste processo a quantidade de calor transferida para a peça é elevada, sendo aconselhada a soldagem em chapas grossas (BRANDI; WAINER; MELLO, 2004).

Na transferência por arco elétrico pulsado, o equipamento de soldagem gera dois níveis de corrente. Na primeira não ocorre a transferência, somente inicia a fusão do arame, devido a corrente de base ser baixa. Na segunda é gerada a transferência de uma única gota, gota formada pela corrente de pico ser superior a corrente de transição. Com isso é possível obter-se uma transferência com algumas características de spray, mas com uma corrente média menor. Esse processo permite a soldagem em chapas finas e em todas as posições (BRANDI; WAINER; MELLO, 2004).

2.2.3 Soldagem MAG robotizada

A necessidade do aumento de produtividade, a falta de trabalho qualificado e o aumento das exigências de segurança no trabalho são fatores importantes para a demanda por processos automatizados (MERRIFIELD, 2005).

Para Barros (2006), o processo de soldagem MAG com proteção de um gás ativo, deposição de arame contínuo e eletrodo revestido é o mais utilizado na soldagem robotizada. Nesse processo o metal de adição e o MB sofrem aquecimento através do arco elétrico, onde seu fornecimento é de forma contínua, fundindo os dois metais e distribuindo o metal de adição através da tocha sobre a junta soldada.

Segundo Tung *apud* Alves (2009), a introdução de processos de soldagem robotizada acarretou em um nível mais elevado de qualidade para os produtos, pois com esse conceito é eliminado a variável operador do processo, ou seja, faz-se a programação de trajetória da tocha, *stick-out* constante e velocidade adição de arame constante, com isso tendo um ganho em produtividade, em qualidade da solda e nas condições de trabalho. Modelos matemáticos, equipamentos de visão e sensores estão cada vez mais interligados ao processo de soldagem robotizada, pois através deles tem-se um aumento de qualidade na soldagem, pois com esses recursos pode-se fazer a correção das variáveis do processo.

2.3 ENSAIOS MECÂNICOS

Para determinar as propriedades mecânicas de um material metálico são realizados vários ensaios. Geralmente esses ensaios são destrutivos, pois promovem a ruptura ou a inutilização do material. Existem ainda os ensaios chamados não destrutivos, utilizado para determinação de algumas propriedades físicas do metal, bem como detectar falhas internas do mesmo (SOUZA, 2000).

Na categoria dos ensaios destrutivos estão classificados os ensaios de tração, dobramento, flexão, torção, fadiga, impacto, compressão e outros. Os ensaios de dureza, que embora possa, em certos casos, não inutilizar a peça ensaiada, também está incluso nessa categoria. Dentre os não destrutivos, estão os ensaios com raios-X, raio gama, ultrassom, magna flux, elétricos e outros (SOUZA, 2000).

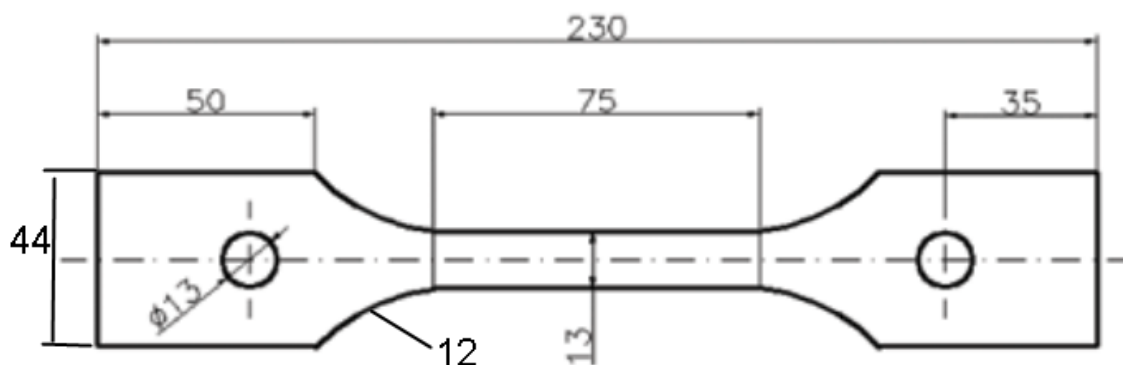
2.3.1 Ensaios de tração

O ensaio de tração consiste na aplicação de uma força uniaxial crescente em um corpo de prova específico até a sua ruptura. Esse tipo de ensaio é amplamente utilizado na indústria devido às vantagens de fornecer dados seguros quantitativos das características mecânicas dos materiais (GARCIA; SPIN; SANTOS, 2012).

Com esse tipo de ensaio, pode-se afirmar que praticamente as deformações promovidas no material são uniformemente distribuídas em todo o seu corpo, pelo menos até ser atingida uma carga máxima próxima do final do ensaio e, como é possível fazer com que a carga cresça numa velocidade razoavelmente lenta durante todo o teste, o ensaio de tração permite medir satisfatoriamente resistência do material. A uniformidade da deformação permite ainda obter medições precisas da variação dessa deformação em função da tensão aplicada. Essa variação é extremamente importante para o engenheiro, sendo determinada pelo traçado da curva tensão-deformação (SOUZA, 2000).

No ensaio de tração, o corpo de prova é fixado nas extremidades nas garras da máquina de ensaio e aplicado uma força crescente, durante a aplicação da força a máquina realiza medições de força e deformação do corpo de prova até o rompimento do mesmo (SOUZA, 2000). A Figura 4 ilustra uma imagem da geometria dos corpos de provas utilizados para a realização dos ensaios.

Figura 4 - Corpo de prova utilizado.



Fonte: Garcia; Spim; Santos, 1999, p. 71.

2.3.2 Ensaios de microdureza

A microdureza produz uma impressão microscópica no material, empregando uma carga menor que 1 kgf, com um penetrador de diamante. A carga pode chegar a até 10 kgf somente e a superfície do corpo de prova também pode ser plana. Quanto ao penetrador usado, há dois tipos de micro dureza: Vickers e Knoop (SOUZA, 2000).

Na microdureza Vickers o penetrador é uma pirâmide de diamante de base quadrada. Esse ângulo produz valores de impressões semelhantes a dureza Brinell, porque a relação ideal D/d da dureza Brinell sendo 0.375 para essa relação ideal, as tangentes à esfera partindo dos cantos da impressão fazem entre si um ângulo de 136° . Como o penetrador é de diamante,

ele é praticamente indeformável e como todas as impressões são semelhantes entre si, não importa o seu tamanho, a dureza é independente da carga, isto é, o número da dureza obtido é o mesmo qualquer que seja a carga usada para materiais homogêneos. Para esse tipo de dureza a carga varia de 1 a 100 ou 120 kgf (SOUZA, 2000).

2.3.3 Ensaio de dobramento

O ensaio de dobramento fornece uma indicação qualitativa da ductilidade do material. Esse ensaio consiste em dobrar um corpo de prova. Através da máquina é aplicada uma força perpendicular ao eixo do corpo de prova, até que seja atingido um ângulo desejado, que é geralmente 90,120 ou 180°. Ao atingir-se o ângulo especificado, examina-se a olho nu a zona dobrada, que não deve apresentar trincas, fissuras ou fendas. Caso contrário, o material não terá passado no ensaio (GARCIA; SPIN; SANTOS, 2012).

O ensaio de dobramento faz-se análise em segmentos retos com seções circulares, tubular, quadrada, retangular e em segmentos curvos. A grande utilização do ensaio de dobramento ocorre na indústria de fabricação e calhas, tubos tambores e de infinitos elementos de conformação plástica. Os parâmetros a serem analisados no dobramento são o encruamento do material e o raio mínimo em que esse pode ser dobrado sem que ocorra ruptura, e o retorno elástico após a retirada da carga e a formação dos defeitos na região dobrada (GARCIA; SPIN; SANTOS, 2012).

Figura 5 - Ensaio de dobramento.



Fonte: Garcia; Spim; Santos, 2012, p. 278.

3 METODOLOGIA

Nesta seção serão descritos os materiais e equipamentos utilizados, assim como os métodos e técnicas utilizadas para realização deste trabalho.

3.1 MATERIAL E MÉTODOS

3.1.1 Metal base

Chapas do aço DOMEX 700 MCTM (TMCP), com dimensões 115 mm × 200 mm e 4,5 mm de espessura de espessura, foram utilizados como MB. O método utilizado para análise química do MB foi espectrometria de emissão óptica. As propriedades mecânicas do MB foram medidas em três amostras na direção de laminação, entretanto, as amostras foram confeccionadas conforme recomendações da NBR ISO 6892 (2002). O percentual de elementos químicos é mostrado na Tabela 1 e na Tabela 2 as propriedades mecânicas.

Tabela 1 - Composição química do metal base.

Elementos Químicos (% massa) (Máximo).						
Fabricante	C	Mn	Si	P	Cu	Cr
	0,12	2,1	0,6	0,03	0,51	1,25
Medida	0,125	1,519	0,196	0,146	0,432	0,453

Fonte: O autor, 2016.

Tabela 2 - Propriedades mecânicas do metal base.

Fabricante	Limite de resistência a Tração (MPa)	Limite de Escoamento (MPa)	Alongamento (%)
	750	700	12
Medida	820	700	11

Fonte: O autor, 2016.

3.1.2 Procedimento de soldagem

Duas chapas do MB com chanfro em 45° foram soldadas na posição plana, através do processo MAG robotizado com gás de proteção argônio + CO₂ (18%) e vazão de 20 l/min. Todos os cordões de solda foram realizados com ângulos de trabalho e deslocamento de 0° e a distância bico de contato-peça de 20 mm. A Figura 6 mostra o dispositivo utilizado para garantir o posicionamento e fixação das peças na posição plana.

Figura 6 - Chapas montadas no dispositivo e posicionadas para a soldagem.



Fonte: O autor, 2016.

Para a soldagem, optou-se em utilizar uma fonte Miller Auto Axxess 450 inversora digital para os experimentos. Esta fonte possui capacidade de saída de corrente de até 450 A. A fonte em questão pode ser configurada para soldagem em curto circuito, spray e arco pulsado. Para a realização dos experimentos, a fonte foi configurada no modo de arco pulsado.

As soldas foram realizadas com os arames maciços AWS ER70S-G e AWS ER120S-G, ambos com diâmetro 1,2 mm e empregados individualmente. O primeiro consumível é definido como “*undermatching*” por apresentar resistência mecânica menor que o MB, e o segundo é “*overmatching*” por apresentar resistência mecânica maior que o MB (MILLER, 1994; MACHADO, 2012). A Tabela 3 apresenta o percentual de elementos químicos dos metais de adição, já a Tabela 4 expõem as propriedades mecânicas dos metais de adição utilizados, segundo indicação do fabricante (ESAB, 2016) e da (AWS D1.1, 2006).

Tabela 3 - Composição química medida dos metais de adição.

Metal de adição	Elementos Químicos (% massa)									
	C	Mn	Si	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V
AWS ER 70S-6	0,098	1,21	0,67	0,007	0,016	0,117	0,015	0,026	-	0,004
AWS ER 120S-G	0,113	1,39	0,45	0,005	0,0045	-	1,35	0,2	0,33	-

Fonte: O autor, 2016.

Tabela 4 - Propriedades mecânicas dos metais de adição.

	Limite de resistência a Tração (MPa)		Limite de Escoamento (MPa)		Alongamento (%)	
	Fabricante	AWS	Fabricante	AWS	Fabricante	AWS
AWS ER 70S-6	480	560	400	*	22	*
AWS ER 120S-G	875	830	835		18	

* Não é especificado; deve ser estabelecido entre o comprador e o fornecedor.

Fonte: O autor, 2016.

Três diferentes energias de soldagem foram produzidas através da variação da velocidade de soldagem, tensão e corrente. A Tabela 5 apresenta os parâmetros de soldagem utilizados.

Tabela 5 - Parâmetros empregados para a realização dos cordões de solda.

Nível	Tensão Média (V)	Corrente Média (A)	Velocidade de soldagem (mm/s)	Energia de Soldagem (kJ/mm)
1	25,0	200	8,8	0,57
2	25,7	220	8,8	0,64
3	27,2	262	8,3	0,85

Fonte: O autor, 2016.

3.1.3 Caracterização das juntas soldadas

Os corpos de prova para ensaio de tração passaram por um processo de fresagem para deixá-los nas medidas normatizadas para posteriormente serem encaminhados para o laboratório, onde foram tracionados para a obtenção dos resultados. Para verificar a macroestrutura do material e a microdureza, os corpos de prova passaram por um processo de preparação para posteriormente passar para a análise laboratorial. Os mesmos passaram por uma operação de limpeza que consistiu em uma escovação e, na sequência, foram retiradas as amostras e embutidas em resina, após, lixados, polidos e atacados com nital (3,5%).

Utilizaram-se os seguintes equipamentos para a preparação e análise:

- Máquina de corte STRUERS DISCOTOM-2;
- Máquina embutimento - BUEHLER SIMPLIMET 2000;
- Politriz - BUEHLER ECOMET 4;
- Microscópio Olympus BX51M – Capacidade 1000X;
- Máquina de tração – 40 toneladas.

A análise da ZAC e geometria ocorrem através da captura de uma imagem ampliada da região da junta soldada com o auxílio de um microscópio.

3.1.4 Procedimentos adotados para ensaio

Para a realização do ensaio de tração foram soldados 18 corpos de prova, sendo seis corpos de prova em cada nível. Três experimentos foram soldados com metal de adição AWS ER70S-6 (*undermatching*) e três com AWS ER120S-G (*overmatching*), conforme Tabela 6.

Tabela 6 - Variação dos parâmetros para cada corpo de prova de tração.

Nº Corpo de prova	Nível	Metal de adição
1	1	AWS ER70S-6
2		
3		
4	2	
5		
6		
7	3	
8		
9		
10	1	AWS ER120S-G
11		
12		
13	2	
14		
15		
16	3	
17		
18		

Fonte: O autor, 2016.

Seis corpos de prova foram soldados para realizar os ensaios de dobramento, sendo um corpo de prova com metal de adição AWS ER70S-6 (*undermatching*) e um com AWS ER120S-G (*overmatching*) em cada nível para a realização do ensaio de dobramento, conforme Tabela 7.

Tabela 7 - Variação dos parâmetros para os corpos de prova de dobramento.

Nº Corpo de prova	Nível	Metal de adição
2	1	AWS ER70S-6
4	2	
6	3	
8	1	AWS ER120S-G
10	2	
12	3	

Fonte: O autor, 2016.

Para realizar os ensaios de metalografia foram soldados seis corpos de prova, sendo um corpo de prova com metal de adição AWS ER70S-6 (*undermatching*) e um com AWS ER120S-G (*overmatching*) em cada nível para a realização do ensaio de metalografia, conforme Tabela 8.

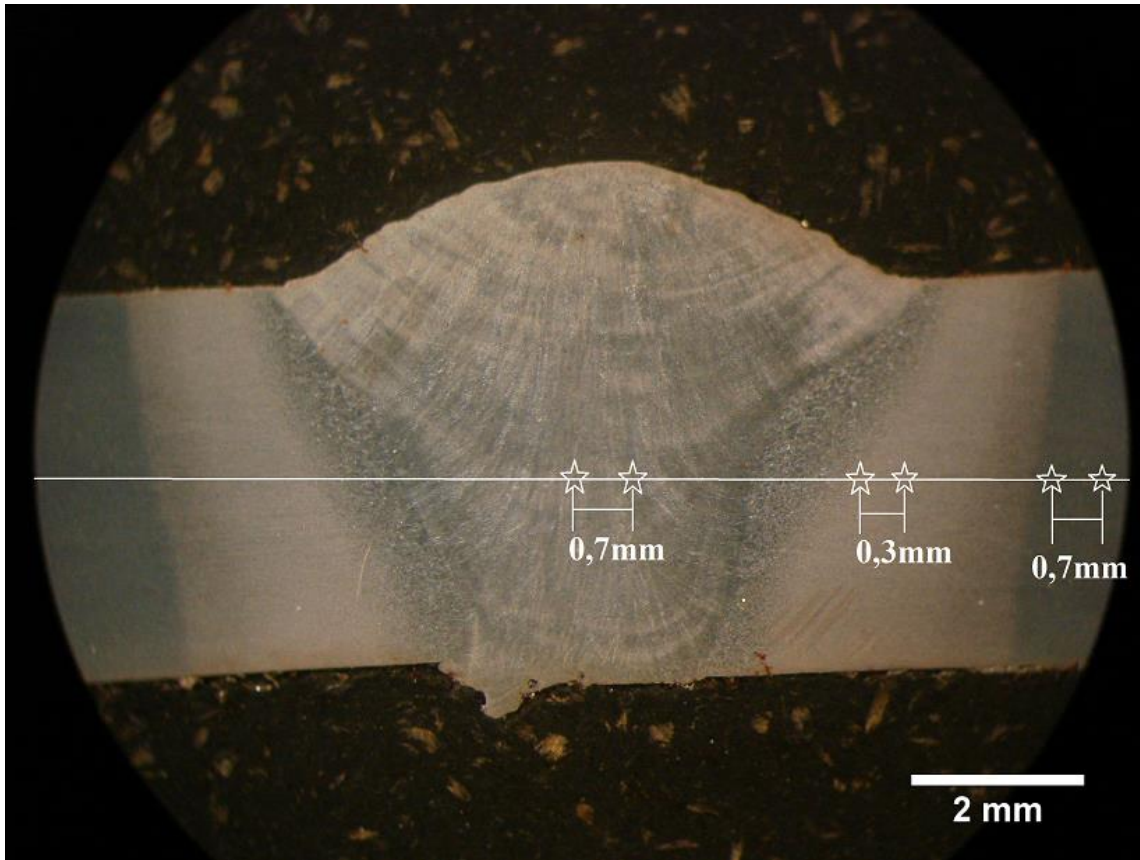
Tabela 8 - Variação dos parâmetros para os corpos de prova de metalografia.

Nº Corpo de prova	Nível	Metal de adição
1	1	AWS ER70S-6
3	2	
5	3	
7	1	AWS ER120S-G
9	2	
11	3	

Fonte: O autor, 2016.

Para a verificação da microdureza foi utilizado o microdurometro, as medições foram realizadas com carga de 1 kg a cada 0,7 mm no MB e no metal de solda, na ZAC a distância entre cada ponto foi de 0,3 mm de distância, medido a 2,25 mm da borda da chapa, com isso criando um perfil de microdureza. A medição da microdureza foi realizada em apenas uma das regiões seccionadas em cada corpo de prova, medições realizadas nos seis corpos de prova. A Figura 7 apresenta a localização das regiões onde foram medidos os perfis de microdureza do MB, da ZAC e do metal de solda.

Figura 7 - Regiões de medição da microdureza.



Fonte: O autor, 2016.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

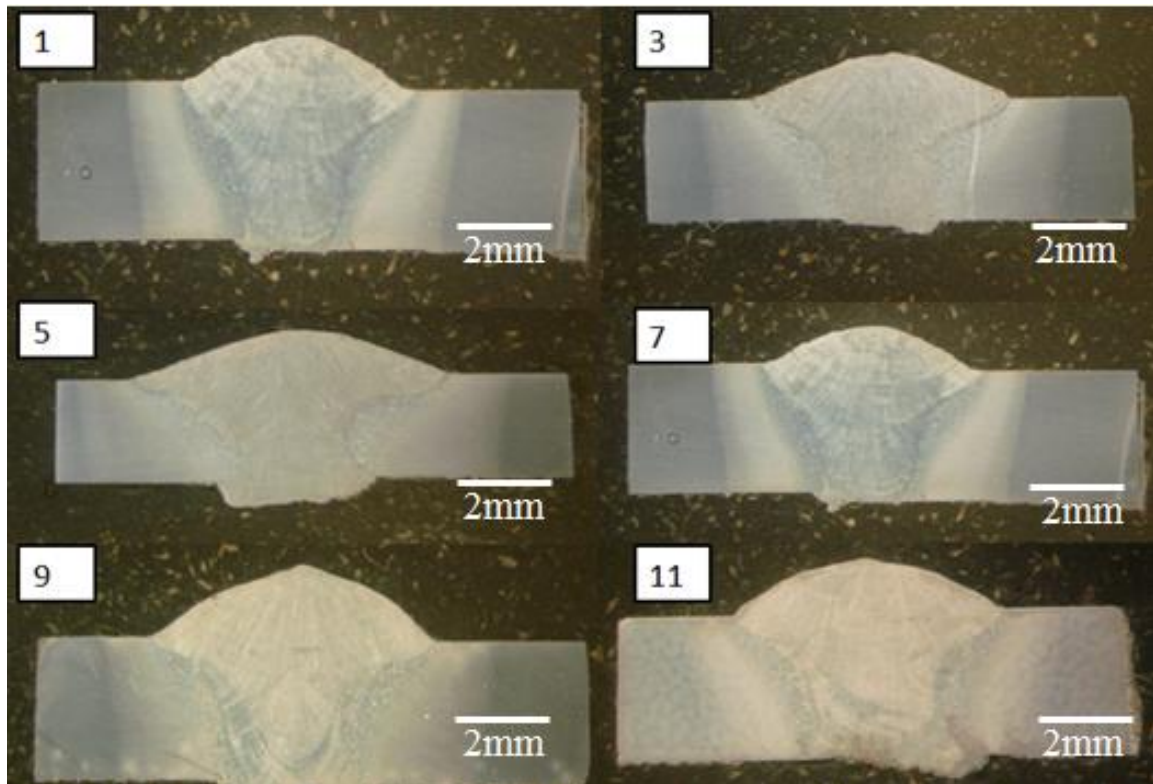
Após a soldagem dos corpos de prova, os mesmos passaram por uma inspeção visual para identificar a presença de algum defeito, como: mordeduras, trincas e porosidade, sendo que nenhum corpo de prova apresentou algum dos defeitos citados acima.

4.1 CARACTERIZAÇÕES DAS AMOSTRAS

4.1.1 Análise das macrofotografias

A Figura 8 apresenta as macrofotografias das juntas soldadas com os consumíveis AWS ER70S-6 e AWS ER120S-G. Verifica-se que todas juntas soldadas apresentaram penetração completa, entretanto as juntas soldadas com energia de soldagem menor (corpos de prova 1 e 7) tiveram a região da ZAC menor, e as juntas soldadas com energias de soldagem mais elevadas (corpos de prova 5 e 11) exibiram a região da ZAC maior, essa variação ocorreu com ambos os metais de adição.

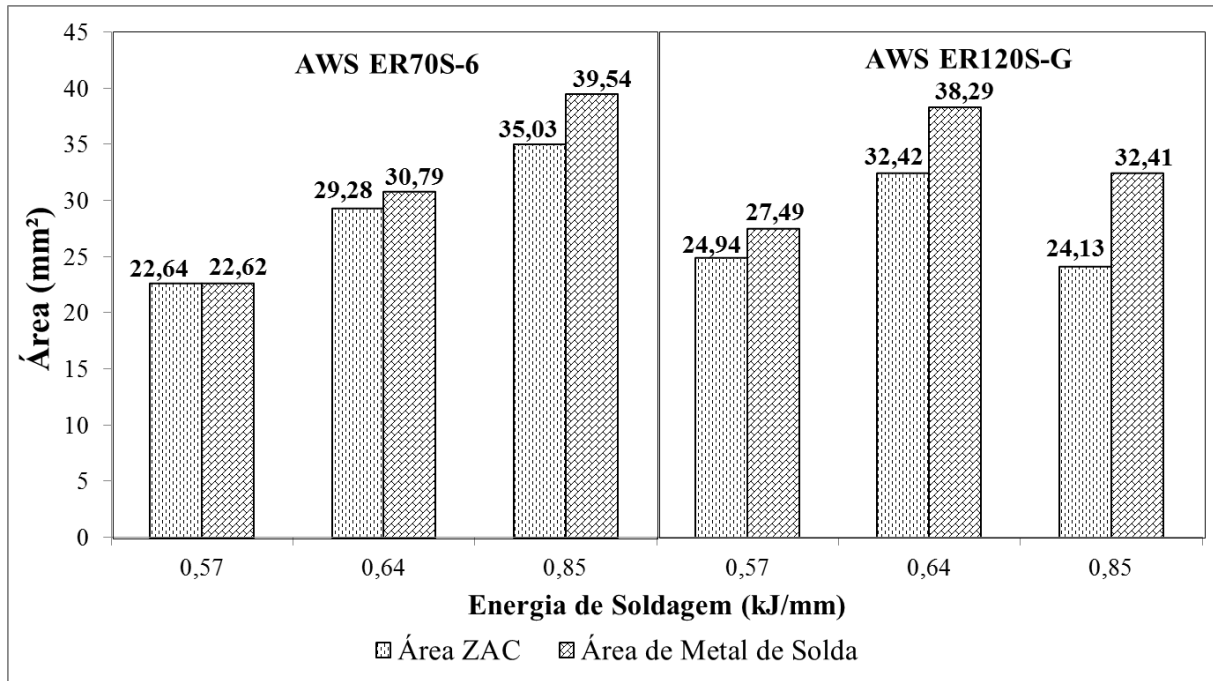
Figura 8 – Macrofotografias das juntas soldadas.



Fonte: O autor, 2016.

A Figura 9 apresenta os resultados comparativos de área entre a ZAC x metal de solda AWS ER70S-6 e AWS ER120S-G com cada energia de soldagem.

Figura 9 - Área da ZAC x área do metal de solda em função da energia de soldagem.



Fonte: O autor, 2016.

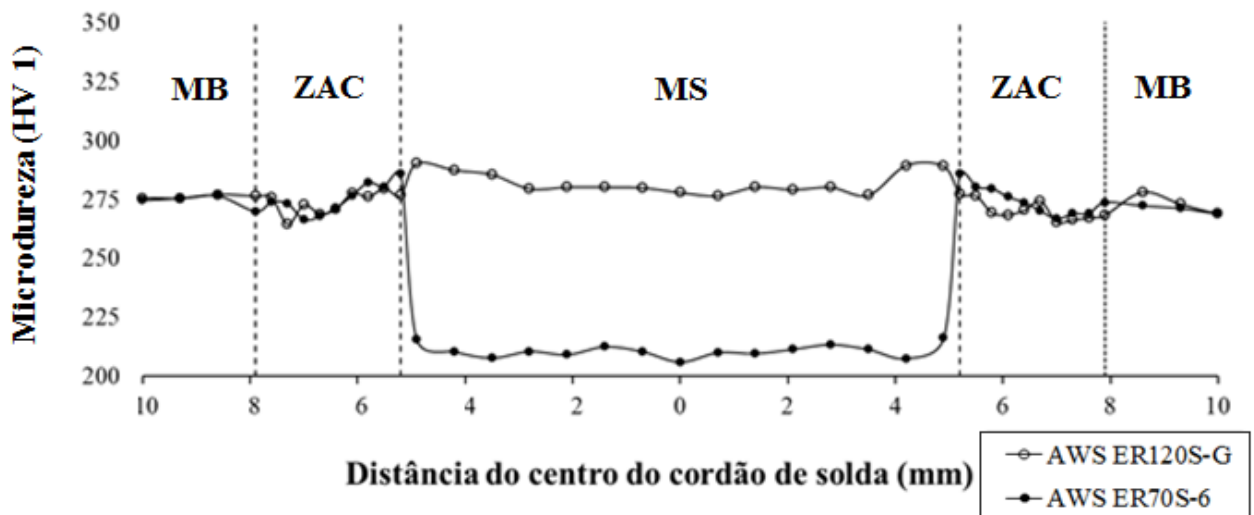
Observa-se na Figura 9 um comparativo da área da ZAC x área do metal de solda em cada energia de soldagem com os metais de solda AWS ER70S-6 e AWS ER120S-G. No metal de adição AWS ER70S-6 com a energia de soldagem de 0,57 kJ/mm as áreas foram praticamente iguais. Conforme a energia de soldagem foi incrementada, houve um aumento nas áreas da ZAC e do MS, sendo a energia de soldagem de 0,85 kJ/mm que obteve maior área e a maior diferença entre as áreas (ZAC x metal de adição). Para o metal de adição AWS ER120S-G a energia de soldagem 0,64 kJ/mm apresentou maior valor de área, já com a energia de soldagem de 0,85 kJ/mm os valores apresentados foram menores do que os da energia de soldagem de 0,64 kJ/mm, e foi a energia de soldagem que apresentou maior diferença entre as áreas (ZAC x metal de solda).

4.1.2 Análise dos perfis de microdureza

Os perfis de microdureza transversais aos cordões de solda foram medidos nas juntas soldadas longitudinais, com o metal de adição AWS ER70S-6 e AWS ER120S-G com

diferentes energias de soldagem. A Figura 10 apresenta os resultados da microdureza realizado nos corpos de prova 1 (AWS ER70S-6) e 7 (AWS ER120S-G), ambos com a energia de soldagem de 0,57 kJ/mm.

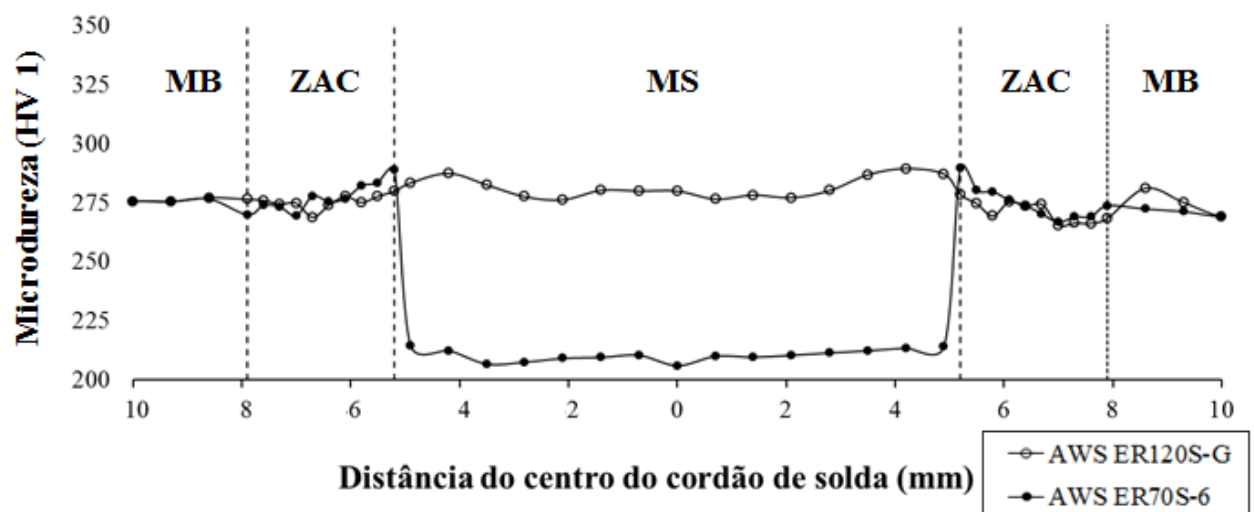
Figura 10 - Perfil de microdureza nos corpos de prova 1 e 7.



Fonte: O autor, 2016.

A Figura 11 apresenta os resultados da microdureza realizado nos corpos de prova 3 (AWS ER70S-6) e 9 (AWS ER120S-G), ambos com a energia de soldagem de 0,64 kJ/mm.

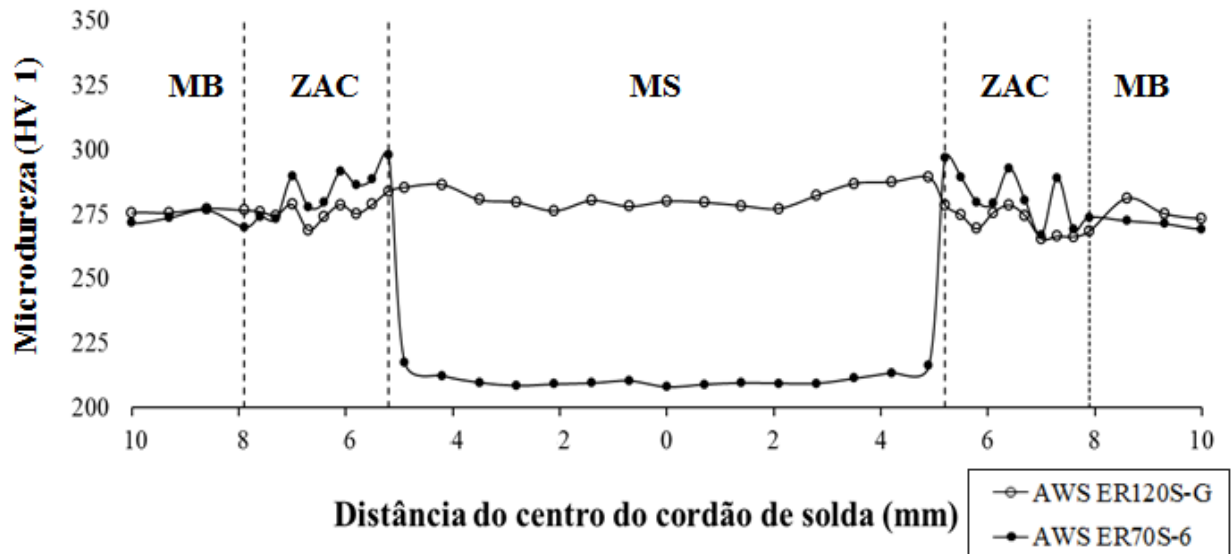
Figura 11 - Perfil de microdureza nos corpos de prova 3 e 9.



Fonte: O autor, 2016.

A Figura 12 apresenta os resultados da microdureza realizado nos corpos de prova 5 (AWS ER70S-6) e 11 (AWS ER120S-G), ambos com a energia de soldagem de 0,85 kJ/mm.

Figura 12 - Perfil de microdureza nos corpos de prova 5 e 11.



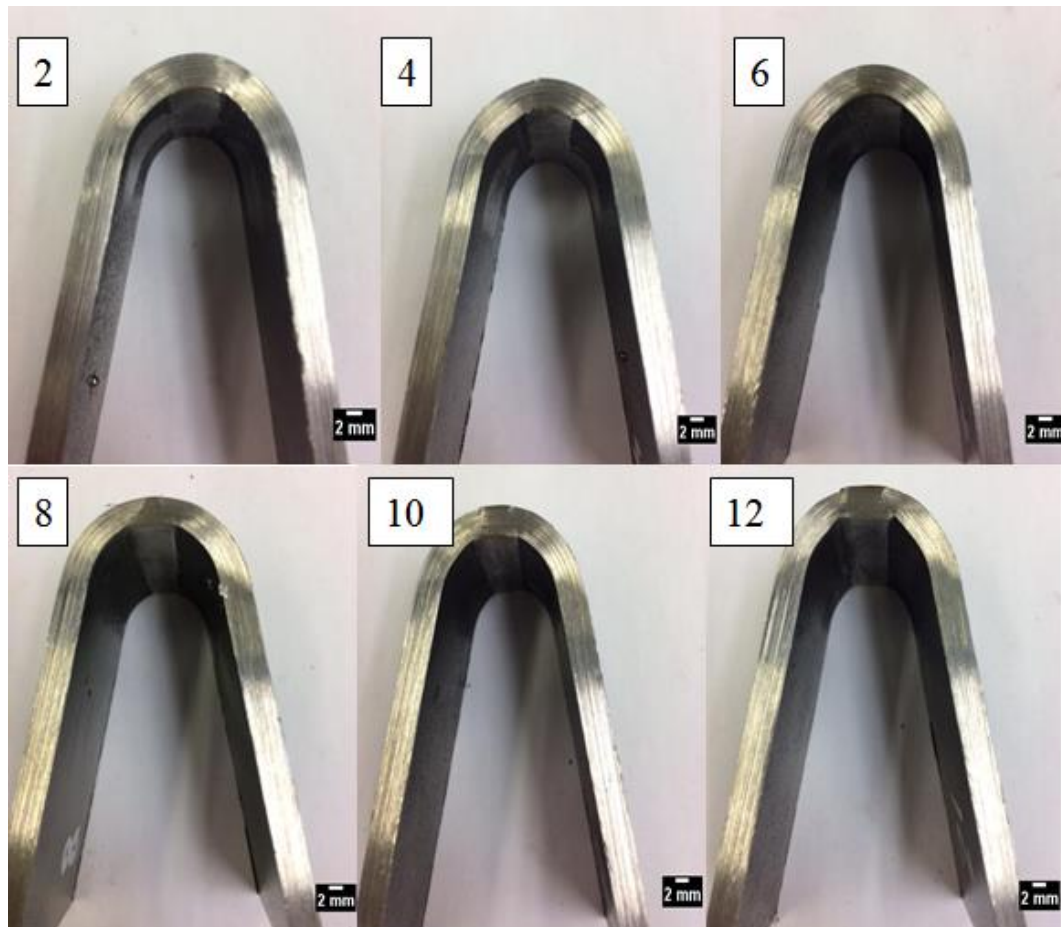
Fonte: O autor, 2016.

Pode-se observar que a microdureza no MB teve pouca variação em todos os corpos de prova, independente da energia de soldagem confirmando os dados levantados na revisão bibliográfica. Na região da ZAC a dureza estava instável em todos os corpos de prova soldados, apresentando uma pequena variação. No metal de adição a diferença de dureza foi maior, isso devido as propriedades mecânicas de cada um, conforme apresentado no referencial teórico. As durezas descritas acima no MB e na ZAC não variaram mais, devido as energias de soldagem terem uma escala próxima uma da outra.

4.1.3 Análise dos ensaios de dobramento

A figura 13 apresenta os corpos de prova soldadas com o metal de adição AWS ER70S-6 (2,4,6) e AWS ER120S-G (8,10,12) e submetidos ao ensaio de dobramento.

Figura 13 - Corpos de prova após o ensaio de dobramento.



Fonte: O autor, 2016.

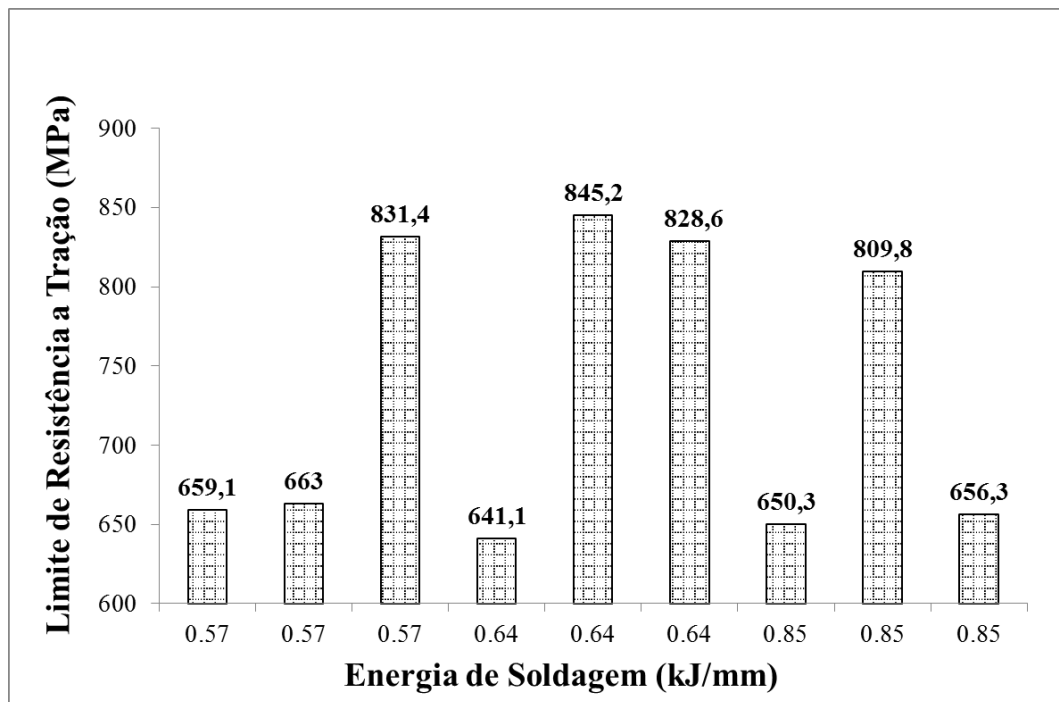
Após os ensaios de dobramentos, foi verificado cada corpo de prova, e feito uma inspeção visual em cada um dos mesmos. Os resultados encontrados foram satisfatórios, pois em todos os corpos de prova, tanto com metal de solda AWS ER70S-6 como com o AWS ER120S-G, onde se obteve cordões com penetração completa sem apresentar trincas e fissuras, independente da energia de soldagem utilizada.

4.2 RESISTÊNCIAS DAS JUNTAS SOLDADAS

4.2.1 Efeitos da energia de soldagem e consumíveis sobre as juntas soldadas

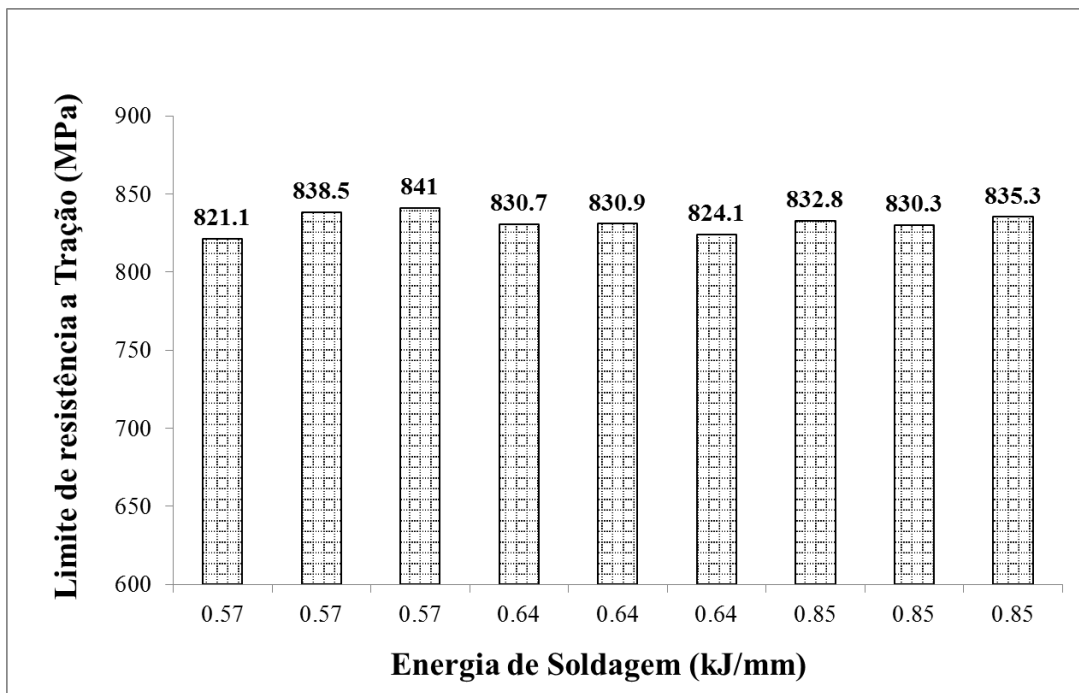
As Figuras 14 e 15 apresentam os resultados dos limites de resistência à tração com relação aos valores das energias de soldagem das juntas soldadas com consumíveis AWS ER70S-6 e AWS ER120S-G.

Figura 14 – Limite de resistência a tração X energia de soldagem das juntas soldadas com consumíveis AWS ER70S-6.



Fonte: O autor, 2016.

Figura 15 - Limite de resistência a tração X energia de soldagem das juntas soldadas com consumíveis AWS ER120S-G.



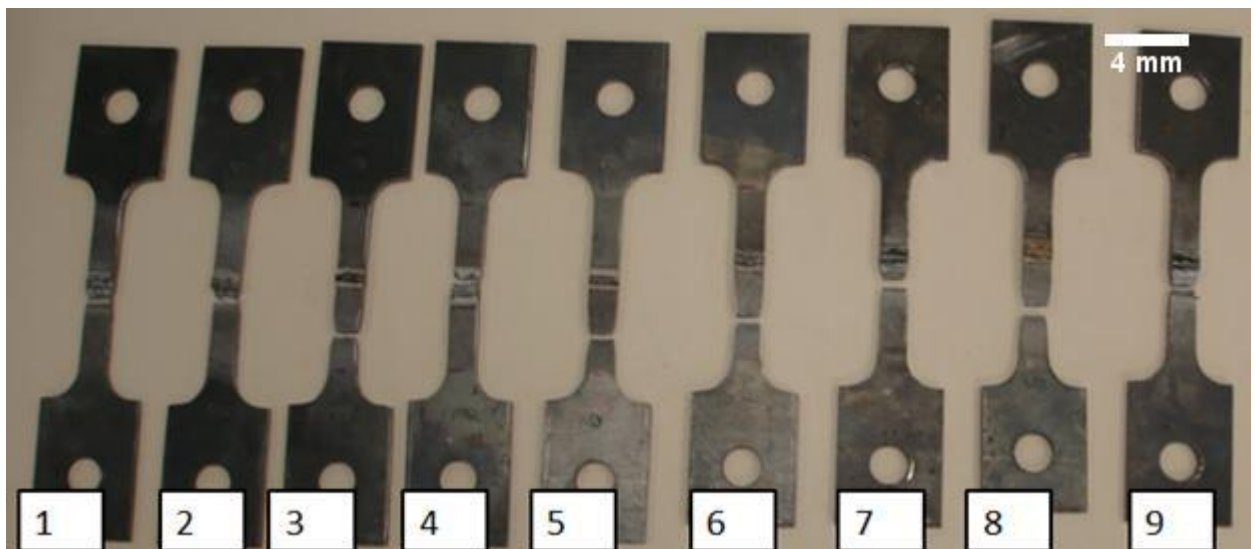
Fonte: O autor, 2016.

Os resultados apresentados nas Figuras 14 e 15 mostram que para o metal de adição AWS ER70S-6 a energia de soldagem teve influência no limite de resistência a tração. Em alguns corpos de prova, a energia de soldagem que melhor apresentou resultados para esse metal de adição foi o a de 0,64 kJ/mm. Já nos corpos de prova com o metal de adição AWS ER120S-G a energia de soldagem não teve influência em nenhum corpo de prova, pois as forças de ruptura mantiveram-se constantes.

4.2.2 Região de fratura dos corpos de prova

Na Figura 16 é possível observar os corpos de prova das juntas soldadas com metal de adição AWS ER70S-6 (1, 2, 4, 7 e 9) romperam próximo à solda, ou seja, a ruptura ocorreu na região da ZAC, pois nessa área a dureza apresentou valores muito elevados, com isso fragilizando a região. Já os corpos de prova 3, 5, 6 e 8 a ruptura ocorreu no MB.

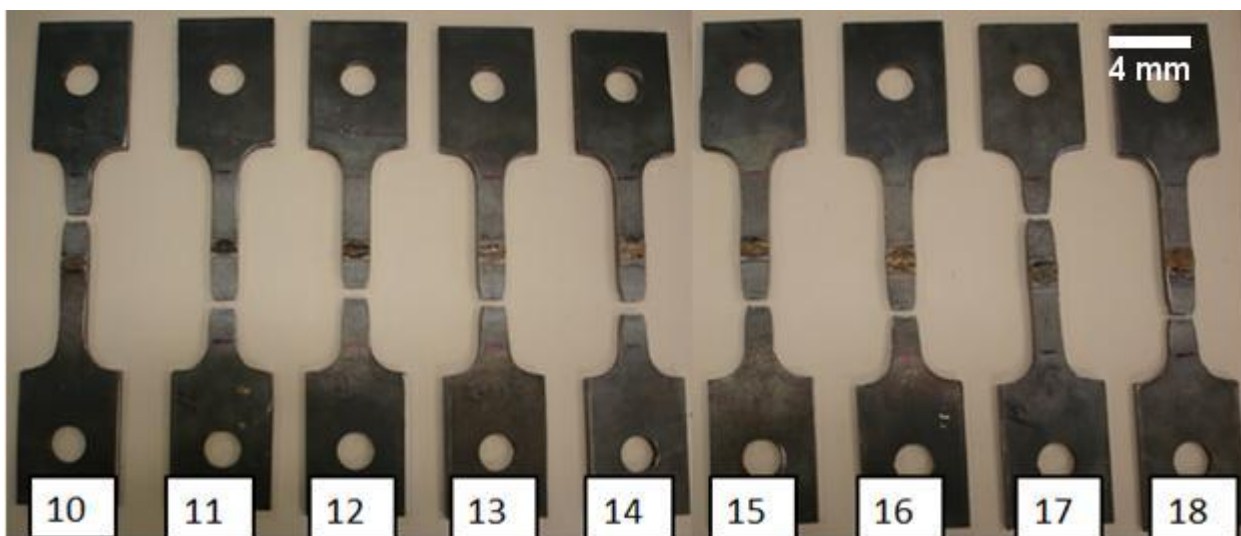
Figura 16 - Corpos de prova de tração (AWS ER70S-6).



Fonte: O autor, 2016.

Nos corpos de prova das juntas soldadas com o metal de adição AWS ER120S-G nenhuma ruptura ocorreu na ZAC, todas as rupturas ocorreram no MB, ou seja, os valores de dureza nessa região ficaram próximos as do MB, conforme pode-se ver na Figura 17.

Figura 17 - Corpos de prova de tração (AWS ER120S-G).



Fonte: O autor, 2016.

4.3 DISCUSSÕES SOBRE O RESULTADO DOS EXPERIMENTOS

Nos experimentos realizados nos tópicos anteriores, observou-se que alguns desses apresentaram uma diferença com a variação dos metais de adição, podendo ocasionar problemas de qualidade para produtos fabricados com esse tipo de MB se não for realizada solda com o metal de adição compatível.

No experimento macrofotográfico a diferença entre os dois metais de adição não apresenta grandes variações, porque ambos tiveram uma penetração completa do cordão de solda independente da energia de soldagem utilizada e do metal de adição, porém nos corpos de prova com energia de soldagem maior observa-se a região da ZAC maior.

Na análise dos perfis de microdureza observa-se uma discrepância grande entre os metais de adição AWS ER70S-6 e o AWS ER120S-G, essa diferença é grande na dureza dos metais de adição em relação ao MB, com isso tornando a junção soldada mais frágil, na região da ZAC a dureza apresentou variação maior entre com a energia de soldagem de 0,85 kJ/mm no metal de adição AWS ER70S-6, onde a dureza teve picos elevados em determinados pontos em relação ao MB, essa variação ocorre devido às propriedades químicas e mecânicas dos metais de adição.

Nos ensaios de dobramento as juntas soldadas com o metal de adição AWS ER70S-6 e AWS ER120S-G apresentaram uma penetração total do cordão de solda, e todos resistiram aos esforços de dobramento, não apresentando trincas e fissuras.

Os ensaios de tração apresentaram resultados condizentes com o descrito na revisão de literatura, pois nos corpos de prova com o metal de adição AWS ER70S-6 em alguns corpos de prova os resultados dos ensaios de tração e alongamento ficaram próximos aos valores do metal de solda e em outros os valores foram próximo ao valor do MB, onde se observou que a energia de soldagem que apresentou um melhor resultados foi a de 0,64 kJ/mm. Os corpos de prova com o metal de adição AWS ER120S-G os valores em todos os corpos de prova ficaram acima dos valores do MB e bem próximos aos do metal de adição.

A energia de soldagem apresentou influência apenas nos corpos de prova com o metal de adição AWS ER70S-6 onde houve uma variação nos valores nos ensaios de tração. Nos corpos de prova com metal de adição AWS ER120S-G a energia de soldagem não teve influência nos resultados.

As rupturas nos corpos de prova ocorreram na ZAC das juntas soldadas com o metal de adição AWS ER70S-6, já no caso das juntas soldadas com o metal de adição AWS ER120S-G, as rupturas ocorreram somente no MB.

CONCLUSÕES

Através dos resultados apresentados nesse trabalho, as seguintes conclusões podem ser obtidas:

- A soldagem MAG do aço TMCP com espessura 4,5 mm é viável, porém na situação investigada, as juntas soldadas com metal de adição *overmatching* apresentaram maior resistência à tração quando comparado às juntas soldadas com o metal de adição *undermatching*.
- Observou-se nos perfis de microdureza uma acentuada queda de dureza na ZAC em relação ao MB. Outro fator evidente foi que o metal de adição *overmatching* apresentou maior dureza do que o metal de adição *undermatching*.
- Em relação à energia de soldagem, constataram-se pequenas variações entre os experimentos realizados com ambos os metais de adição. Isso se justifica pelo fato da pequena variação da energia de soldagem.
- Com o aumento da energia de soldagem, conseqüentemente ocorreu um aumento considerável da área do metal de solda. Em virtude do aumento da área do metal de solda, houve certa tendência ao aumento da área da ZAC.
- As fraturas das juntas soldadas com o metal de adição *overmatching* ocorreram 100% no MB, enquanto que as fraturas das juntas soldadas com o metal de adição *undermatching* foram instáveis, ou seja, algumas ocorreram no MB e outras na ZAC.
- Através dos resultados apresentados, é de extrema importância analisar o MB e o metal de adição que será empregado em um conjunto soldado, para os conjuntos soldados não terem problemas de qualidade futuramente, tais como: quebra de conjuntos soldados quando submetidos a esforços mecânicos maiores.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AKBARNEJAD, S. **Investigation on static strength of welded joints**. Master of Science Thesis - Royal Institute of Technology. Stockholm, 2012.
- ALVES, V. J. **Desenvolvimento de envelopes operacionais para processo MIG/MAG robotizado com diferentes gases de proteção**. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.
- AMERICAN WELDING SOCIETY. AWS D1.1. **Structural welding code: steel**. Miami: AWS, 2006.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 6892. **Materiais metálicos: ensaio de tração à temperatura ambiente**. Rio de Janeiro: ABNT, 2002.
- BARBOSA, R. P. **Tecnologia Mecânica: metalurgia da soldagem, soldabilidade dos materiais**. Minas Gerais: Editado pelo autor, 2007.
- BARROS, M. R. A. **Estudo da automação de células de manufatura para montagens e soldagem industrial de carrocerias automotivas**. Dissertação de Mestrado. – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.
- BHADESHIA, H.K.D.H.; HONEYCOMBE, R.W.K. **Steel: microstructure and properties**. 3 ed. Cambridge: Elsevier LTD, 2006. 344 p.
- BRANDI, S. D.; WAINER E.; MELLO, F. D. H. **Soldagem: Processos e metalurgia**. 4 ed. São Paulo: Edgard Blucher LTDA, 2004. p. 99- 132.
- DALCIN. R. L. **Efeitos da energia de soldagem e consumíveis sobre a resistência à flexão de juntas “T” soldadas em perfis tubulares**. Dissertação de Mestrado. - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.
- DAVIS, J. R. **Corrosion of weldments**. ASM International: American Technical Publishers Ltd, 2006. 225 p.
- ESAB. **Soldagem MIG/MAG**. São Paulo: ESAB Soldagem e Corte, 2004. (Relatório técnico de soldagem).
- FRISK, K. **Thermodynamic modelling of multicomponent cubic Nb, Ti and V carbides/carbonitrides, Corrosion and Metals Research Institute (KIMAB)**. Drottning Kristinas, Stockholm, Sweden, 2007.
- GARCIA. A.; SPIN. J. A.; SANTOS. C. D. S. **Ensaio dos materiais**. 2 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.
- GIMENES JR, L.; RAMALHO, J. P. **Conceitos de soldagem MIG/MAG**. 1º ed, São Paulo: 2005, 65p

GLADMAN, T. **The physical metallurgy of microalloyed steels.** 1 ed. London: Institute of Materials, 1997. 363 p.

LANCASTER, J. F. **Metallurgy of welding.** 6 ed. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 1999. 446 p.

LIAO, M. T.; CHEN, W. J. **The effect of shielding gas compositions on the microstructure and mechanical properties of stainless steel weldments.** Materials chemistry and physics, Huwei: Elsevier. v. 55, p. 145-151, mar. 1998.

LINCOLN ELECTRIC DO BRASIL, (1) disponível em <[http://www.lincolnelectric.com.br/upload/merit-s-6\(1\).pdf](http://www.lincolnelectric.com.br/upload/merit-s-6(1).pdf)>. Acesso em: 09 de outubro de 2016

LINCOLN ELECTRIC DO BRASIL,(2) Disponível em <[http://www.lincolnelectric.com/engb/consumables/Pages/product.aspx?product=Products_ConsumableEU_MIGWires-LNM-LNMMoNiCr\(LincolnElectric_EU_Base\)](http://www.lincolnelectric.com/engb/consumables/Pages/product.aspx?product=Products_ConsumableEU_MIGWires-LNM-LNMMoNiCr(LincolnElectric_EU_Base))>. Acesso em: 09 de outubro de 2016

MACHADO, I. G. **Condução do calor na soldagem: fundamentos & aplicações.** 1 ed. Porto Alegre: Imprensa Livre Editora LTDA, 2000. 119 p.

MACHADO, I. G. **Novos paradigmas para especificação de juntas soldadas.** Soldagem & Inspeção, 17(3): 278-288, Jul/Set 2012.

MARQUES. P. V.; MODENESI. P. J.; BRACARENSE. A. Q. **Soldagem: Fundamentos e tecnologia.** 3 ed. Belo Horizonte, 2005.

MERRIFIELD, T. **Guidelines for Implementing Robotic Arc Welding.** Welding Journal, 84, n°4, p. 34-37, Apr, 2005.

MILLER, D. K. **Welding of steel bridges: highway structures design handbook.** The Lincoln Electric Company. USA, 1994. 88 p.

MODENESI. P. J. **Soldagem I: Descontinuidades e inspeção em juntas soldadas.** Belo Horizonte: Editado pelo autor, 2001.

QUITES, A. M. **Introdução à soldagem a arco voltaico.** Florianópolis: Soldasoft, 2002.

SSAB TUNNPLAT. **Sheet steel joining handbook: joining of high strength steels.** Sweden: SSAB Tunnplat AB, 2004.

SOUZA A. S. **Ensaio mecânicos de materiais metálicos.** 5 ed. São Paulo, 2000.

TAMURA, I.; SEKINE, H.; TANAKA, T.; OUCHI, C. **Thermomechanical processing of high-strength low-alloy steels.** 1 ed. Butterworth-Heinemann, 1988. 248 p.