

NICHOLAS MICHAEL CAESAR SENE E SILVA

Influência da velocidade e posição de soldagem nas propriedades de juntas soldadas pelo processo de eletrodo revestido.

Guaratinguetá - SP
2017

Nicholas Michael Caesar Sene e Silva

Influência da velocidade e posição de soldagem nas propriedades de juntas soldadas pelo processo de eletrodo revestido.

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador (a): Prof. Dr. Peterson Luiz Ferrandini
FEG/UNESP

Guaratinguetá - SP
2017

S586i Silva, Nicholas Michael Caesar Sene e
Influência da velocidade e posição de soldagem nas propriedades de juntas soldadas pelo processo de eletrodo revestido / Nicholas Michael Caesar Sene e Silva – Guaratinguetá, 2017.
40 f : il.
Bibliografia: f. 40

Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2017.
Orientador: Prof. Dr. Peterson Luiz Ferrandini

1. Soldagem. 2. Propriedades mecânicas 3. Microestrutura. I. Título.

CDU 621.791



Luciana Máximo

Bibliotecária/CRB-8 3595

NICHOLAS MICHAEL CAESAR SENE E SILVA

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
“GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA”

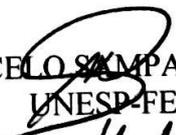
APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM NOME DO CURSO

Prof. Dr. MARCELO SAMPAIO MARTINS
Coordenador



BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. PETERSON LUIZ FERRANDINI
Orientador/UNESP-FEG


Prof. Dr. MARCELO SAMPAIO MARTINS
UNESP-FEG


Prof. MSc. EVERTON COELHO DE MEDEIROS
UNESP-FEG

Dezembro de 2017

DADOS CURRICULARES

NICHOLAS MICHAEL CAESAR SENE E SILVA

NASCIMENTO 01.04.1986 – São Paulo / SP

FILIAÇÃO José Roberto da Silva
Jormari de Sene

2012/2017 Curso de Graduação em Engenharia Mecânica
Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”
Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá
FEG / UNESP

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus pela minha vida, pela proteção e pelas graças recebidas neste período de graduação!

À minha mãe *Jormari* e à minha família (avó, tios, tias, irmã, primos, família de minha esposa), que apesar das dificuldades enfrentadas, sempre incentivaram meus estudos com muito carinho e apoio, não medindo esforços para que eu chegasse até esta etapa de minha vida,

à minha esposa *Jannine*, que com sua paciência e amor suportou toda minha ausência em função deste trabalho e de todos estes anos de graduação,

ao meu orientador, *Prof. Dr. Peterson Luiz Ferrandini* que jamais deixou de me incentivar. Sem a sua orientação, dedicação, auxílio e paciência, o estudo aqui apresentado seria praticamente impossível,

à todos os professores da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá – FEG/UNESP pela importante contribuição na minha formação acadêmica,

aos amigos da turma de Engenharia Mecânica (noturno) 2012, que juntos passamos por muitos momentos de estudos e dúvidas,

aos funcionários da Biblioteca do Campus de Guaratinguetá pela dedicação, presteza e principalmente pela vontade de ajudar,

aos funcionários da Faculdade de Engenharia do Campos de Guaratinguetá pela dedicação e alegria no atendimento.

“Gratidão gera gratidão, lamúria gera lamúria. Coração
agradecido, comunica-se com Deus (...). Quem vive
agradecendo, caminha para a Felicidade (...)”

Meishu-Sama

RESUMO

A soldagem pelo processo de eletrodo revestido é uma das mais utilizadas na indústria metal mecânica. O conhecimento das propriedades mecânicas e microestruturais de uma junta soldada, em função dos parâmetros de soldagem, é de grande importância nas aplicações de engenharia. Sendo assim, este trabalho procura avaliar a influência da posição e velocidade de soldagem sobre as características de uma junta soldada de aço baixo carbono, pelo processo de eletrodo revestido. Para tornar possível esta análise, foram soldados 4 corpos de prova, sendo 2 na posição plana e 2 na posição vertical ascendente; para cada posição foram utilizadas duas velocidades de soldagem diferentes. A análise metalográfica de uma amostra de cada corpo de prova foi realizada a fim de se comparar as microestruturas de cada junta soldada. O perfil de dureza Vickers para cada amostra foi obtido, para a avaliação da influência dos parâmetros de soldagem estudados. Notou-se que, considerando a velocidade de soldagem, a microestrutura da zona fundida comportou-se como observado na literatura. No entanto, os perfis de dureza das juntas soldadas apresentaram comportamento contrário ao esperado, o que foi atribuído ao número de passes diferente para cada corpo de prova soldado.

PALAVRAS-CHAVE: Soldagem. Parâmetros de Soldagem. Propriedades Mecânicas. Microestrutura. Dureza.

ABSTRACT

Shielded metal arc welding is usually used in the metal-mechanical industry and, controlling microstructure as well as mechanical properties of a welded joint, based on welding parameters, is definitively important in engineering applications. Therefore, the purpose of this work is to evaluate the influence of both position and welding velocity on the properties of a low carbon steel weld joint, obtained using shielded metal arc welding. Four welded joints were obtained, two of them in the flat position and two in the vertical up position; two different welding velocities were used for each position. Conventional metalographic analysis was performed in order to compare the obtained microstructures for each welded joint as well as the micro Vickers hardness profile was determined in order to evaluate the influence of the welding parameters under study. It was observed that microstructures behave just like expected while the hardness profiles revealed the opposite response to that expected, which was attributed to different number of beads in each sample.

KEYWORDS: Welding. Welding Parameters. Mechanical Properties. Microstructure. Hardness.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Exemplos de elementos de fixação mais utilizados na indústria	14
Figura 2 – Posições de Soldagem	14
Figura 3 – Características do processo por eletrodos revestidos	17
Figura 4 – Circuito elétrico do processo por eletrodos revestidos	18
Figura 5 – Caracterização de uma junta soldada	21
Figura 6 – Eficiência da fonte de calor de alguns processos de soldagem	24
Figura 7 – Detalhe da junta soldada	24
Figura 8 – À esquerda, forno de embutimento AROTEC. À direita, amostras preparadas para ensaio metalográfico. (A) Amostra n° 1. (B) Amostra n° 2. (C) Amostra n° 3. (D) Amostra n°4.....	28
Figura 9 – À esquerda, micro durômetro utilizado para ensaio de dureza das amostras. À direita, desenho esquemático das medidas de microdurezas efetuadas.	29
Figura 10 – Aspectos visuais dos cordões de solda obtidos. (A) CP n° 01. (B) CP n° 02. (C) CP n° 03. (D) CP n° 04.....	30
Figura 11 – Metal de Base: (A) aumento de 500X. (B) aumento de 1000X.	31
Figura 12 – Amostra n° 01. (A) ZTA, aumento de 200X. (B) Zona Fundida, aumento de 200X	32
Figura 13 – Amostra n° 01. (A) Transição entre passes na ZF, aumento de 100X. (B) Passe de solda final na ZF, aumento de 100X.....	32
Figura 14 – Amostra n° 2. (A) Transição ZTA / ZF, aumento de 100X. (B) ZF, aumento de 100X	33
Figura 15 – (A) ZTA do cp n° 03, com aumento de 100X. (B) ZF do cp n° 03, com aumento de 100X.	33
Figura 16 – (A) ZTA do cp n° 04, com aumento de 100X. (B) ZF do cp n° 04, com aumento de 100X.	34
Figura 17 – (A) CP n° 01, com aumento de 100X. (B) CP n° 02, com aumento de 100X. (C) CP n° 03, com aumento de 100X. (D) CP n° 04, com aumento de 100X.....	35
Figura 18 – Perfil de Microdureza Vickers	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados de soldagem CP n° 01: posição plana	27
Tabela 2 – Dados de soldagem CP n° 02: posição plana	27
Tabela 3 – Dados de soldagem CP n° 03: posição vertical ascendente.....	28
Tabela 4 – Dados de soldagem CP n° 04: posição vertical ascendente.....	28
Tabela 5 – Resumo comparativo dos parâmetros de soldagem estudados	30

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AWS	<i>American Welding Society</i>
ASM	<i>American Society for Metals</i>
MB	Metal de Base
ZF	Zona Fundida
ZTA	Zona Termicamente Afetada
CP	Corpo de Prova
LBW	<i>Laser Beam Welding</i>
PAW	<i>Plasma Arc Welding</i>
GTAW	<i>Gas Tungsten Arc Welding</i>
SMAW	<i>Shielded Metal Arc Welding</i>
GMAW	<i>Gas Metal Arc Welding</i>
SAW	<i>Submerged Arc Welding</i>
EBW	<i>Electron Beam Welding</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

η	rendimento do processo de soldagem
Q	energia absorvida pelo processo de soldagem
V	tensão
I	corrente elétrica
HI	<i>Heat Input</i>
v	velocidade de soldagem

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	MOTIVAÇÃO	13
1.2	OBJETIVOS	15
2	REVISÃO DA LITERATURA	16
2.1	SOLDAGEM	16
2.2	O PROCESSO DE ELETRODO REVESTIDO	16
2.2.1	Vantagens e desvantagens do processo.....	17
2.2.2	Equipamentos	18
2.2.3	Consumíveis.....	18
2.2.4	Parâmetro elétricos e operacionais	19
2.2.4.1	Diâmetro do eletrodo	19
2.2.4.2	Corrente de soldagem.....	19
2.2.4.3	Tipo e polaridade da corrente de soldagem	20
2.2.4.4	Tensão de soldagem.....	20
2.2.4.5	Comprimento do arco.....	20
2.2.4.6	Velocidade de soldagem.....	21
2.3	A JUNTA SOLDADA	21
2.3.1	Zona Fundida (ZF)	21
2.3.2	Zona Termicamente Afetada (ZTA)	22
2.4	SOLDABILIDADE DOS AÇOS COM BAIXO TEOR DE CARBONO	22
2.5	CICLO TÉRMICO DA SOLDAGEM.....	23
2.6	MECANISMOS QUE INTERFEREM NA MICROESTRUTURA DA SOLDA	23
2.6.1	Aporte térmico.....	23
2.6.2	Natureza dos materiais da junta	24
2.6.3	Crescimento epitaxial.....	25
3	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	26
3.1	CORTE DE CHAPAS E PREPARAÇÃO PARA SOLDAGEM.....	26
3.2	SOLDAGEM	26
3.3	PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS	28
3.4	ENSAIO DE MICRODUREZA VICKERS	29
4	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	30
4.1	PARÂMETROS DE SOLDAGEM AVALIADOS	30
4.2	MICROESTRUTURA DO METAL DE BASE	31
4.3	MICROESTRUTURA – POSIÇÃO PLANA.....	31
4.4	MICROESTRUTURA – POSIÇÃO VERTICAL ASCENDENTE.....	33
4.5	COMPARATIVO DAS MICROESTRUTURAS DA ZF	34
4.6	MICRODUREZA VICKERS.....	35
5	CONCLUSÃO.....	37
5.1	SUGESTÃO PARA PROSSEGUIMENTO DO TRABALHO.....	37
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	38

1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO

O sucesso ou falha de um projeto pode depender da seleção apropriada e uso de fixadores na união de partes. O processo e manufatura de juntas é um negócio grande e representa parte significativa da nossa economia. (NORTON, 2013)

Segundo Quintão (2017), em matéria publicada no jornal Valor Econômico em 4 de agosto de 2017, a produção de estruturas de aço em 2016 foi de 694.000 toneladas, o que representa 43% da capacidade instalada no Brasil, atualmente de 1,62 milhão de Ton. A indústria e mineração consumiu 46% desta produção, seguida pelo setor de infraestrutura com 32%, projetos comerciais com 18% e projetos residenciais com 4%. Comparado ao ano de 2015, houve uma redução de 44%, atribuída principalmente, a queda da demanda na infraestrutura de portos, aeroportos e indústrias siderúrgicas. Espera-se que a retomada da produção ocorra em 2019.

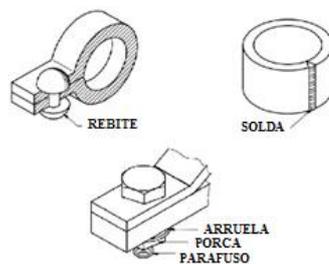
Os métodos de união dos metais podem ser divididos em duas categorias principais: primeiro, aqueles baseados na ação de forças macroscópicas entre as partes a serem unidas tais como a parafusagem e rebiteagem, nos quais a resistência da junta unida é dada pela resistência ao cisalhamento do elemento de fixação mais as forças de atrito entre as superfícies em contato. Segundo, aqueles baseados nas forças microscópicas – interatômicas e intermoleculares – por exemplo a soldagem, brasagem e colagem, nos quais a união é obtida pela aproximação dos átomos ou moléculas das peças a serem unidas, ou destes e de um material intermediário adicionado à junta, até distâncias suficientemente pequenas para a formação de ligações químicas, em particular, ligações metálicas e de Van der Waals. (MARQUES, MODENESI, BRACARENSE, 2009)

Na indústria metal-mecânica, em qualquer montagem ou fabricação de um determinado componente mecânico, é provável que se considere um destes processos de união, representados pela Figura 1.

A soldagem é um dos mais importantes processos de união de metais utilizados industrialmente. É utilizada em muitas aplicações, desde a união de pequenos conjuntos e peças, até a construção de estruturas e componentes de máquinas, edifícios, pontes, navios, veículos, equipamentos de construção (pás carregadeiras, motoniveladoras, etc.) e muitos outros sistemas com elevado grau de responsabilidade, como nas indústrias químicas, petrolífera e nuclear.

Como a operação de soldagem exige calor, há sempre a possibilidade de ocorrer mudanças na estrutura do material próximo à área de soldagem. Sendo assim, alguns mecanismos interferem na formação da microestrutura de uma junta soldada. Dentre estes, podemos citar o aporte térmico, a velocidade do passe de solda, a taxa e direção de extração de calor, o crescimento epitaxial, a natureza dos materiais da junta, o processo de soldagem utilizado e as diferentes posições de soldagem que podem ser influenciadas devido à ação da gravidade.

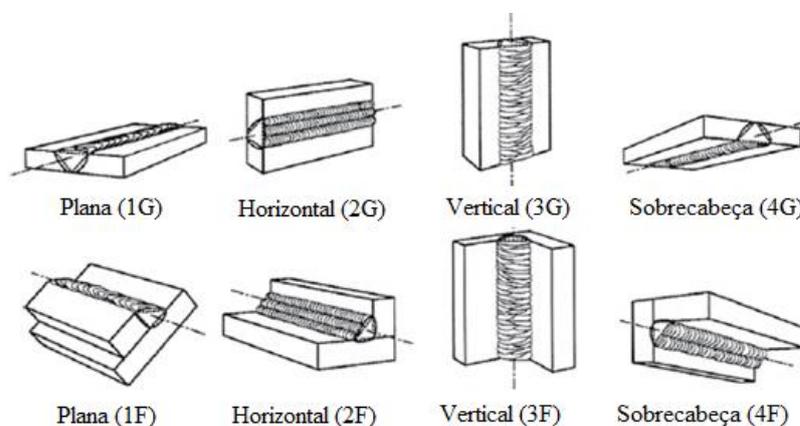
Figura 1 – Exemplos de elementos de fixação mais utilizados na indústria.



Fonte: Adaptado de Araújo (2016).

Esta última variável citada, a posição de soldagem, é determinada pela posição da peça a ser soldada e do eixo da solda em relação ao soldador. Dentre as opções de posição de soldagem podemos mencionar a posição plana, horizontal, vertical ascendente ou descendente e a sobrecabeça (MARQUES, MODENESI, BRACARENSE, 2009). Basicamente, a posição é designada por uma combinação de número e letra, na qual o número refere-se à posição de soldagem e a letra ao tipo de solda – F para solda de filetes e G para soldas de topo. A Figura 2 representa exemplos de posições de soldagem (PHILLIPS, 2016).

Figura 2 – Posições de soldagem.



Fonte: Adaptado de Phillips (2016).

Em geral, é muito comum no projeto de máquinas e estruturas o uso do aço soldado. Dentre suas razões podemos citar a boa soldabilidade, rigidez e resistência superior deste sobre o ferro fundido por exemplo, e o custo, pois este é um material relativamente barato em comparação a outros materiais de construção mecânica. O aço de baixo carbono é um dos mais fáceis de soldar; este ou os aços de baixa liga, são os mais indicados para uso em projetos de solda. (NORTON, 2013)

Sendo assim, a tarefa do engenheiro mecânico nos projetos de solda é definir a soldagem juntamente com suas variáveis de acordo com as boas práticas da engenharia, de maneira que as soldas sejam seguras contra falhas no uso desejado, escolher a resistência necessária do material de solda e especificando estas informações nos procedimentos de soldagem.

1.2 OBJETIVOS

Este trabalho possui como objetivos o estudo de juntas soldadas em aço com baixo teor de carbono obtidas nas posições plana e vertical ascendente, sob velocidades do passe de solda diferentes, utilizando soldagem por eletrodo revestido.

Especificamente, visa determinar diferenças microestruturais na região da zona fundida considerando a variação dos parâmetros de solda estudados – posição e velocidade de soldagem.

Em complemento, avaliar as propriedades mecânicas obtidas da junta soldada por meio do ensaio de microdureza Vickers propondo a correlação destas com os parâmetros avaliados no trabalho.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 SOLDAGEM

A soldagem é um processo de união entre duas partes ou ainda, em casos mais específicos, pode ser utilizada para processos de revestimento de superfícies visando a recuperação de superfícies desgastadas, proteção contra corrosão, etc.

A literatura apresenta diversas maneiras de definir o processo de soldagem. Uma delas, talvez a mais simples destas, define a soldagem como um processo de união de metais por fusão (MARQUES, MODENESI E BRACARENSE, 2009). Já a *American Welding Society* (AWS), define o processo como:

“Processo de união de materiais utilizado para obter a coalescência localizada de metais e não-metais, produzida por aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem a utilização de pressão e/ou material de adição.”

Segundo Marques, Modenesi e Bracarense (2009), a soldagem é um dos mais importantes processos de união permanente de materiais, com mais de 50 diferentes processos de soldagem disponíveis na indústria, nos mais variados ramos industriais, aliado à necessidade de uma boa soldabilidade no desenvolvimento de novos tipos de aços e outras ligas metálicas.

2.2 O PROCESSO DE ELETRODO REVESTIDO

A soldagem com eletrodos revestidos é definida como um processo de soldagem a arco elétrico, no qual a união é produzida pelo calor liberado no arco criado entre um eletrodo revestido e as partes a soldar. É o processo de soldagem mais difundido na indústria e, apesar de não ser o mais eficiente, é um dos mais baratos e simples. (WAINER, BRANDI E HOMEM DE MELLO, 1992).

Neste processo, o metal de enchimento é depositado pelo eletrodo e a decomposição do revestimento é utilizada para formar os gases de proteção e fornecer os elementos que protegem a poça de fusão (ASM HANDBOOK, 2011).

O eletrodo revestido consiste de uma vareta metálica denominada de “alma” que conduz a corrente elétrica e fornece o metal de adição para enchimento da solda. O revestimento apresenta diversas funções, dentre as quais pode-se citar a estabilização do arco elétrico, adição de elementos de liga à junta soldada e proteção da poça de fusão contra contaminação da atmosfera. (MARQUES, MODENESI E BRACARENSE, 2009)

O arco elétrico é aberto quando ocorre o toque entre o eletrodo e metal de base (MB). Este arco resultante, funde a ponta do eletrodo com o MB. A mistura entre o metal do eletrodo e o revestimento fundidos é transferida através do arco para a poça de fusão no MB onde se torna a solda depositada recoberta por uma camada de proteção, de escória menos densa, proveniente do revestimento do eletrodo. (ASM HANDBOOK, 2011)

A Figura 3 mostra as características principais do processo de soldagem por eletrodo revestido.

Figura 3 – Características do processo de eletrodo revestido.



Fonte: Adaptado de ASM HANDBOOK (2011).

2.2.1 Vantagens e desvantagens do processo

O processo de soldagem por eletrodos revestidos é um dos mais simples em termos de requisitos de equipamentos, porém um dos mais difíceis em termos do nível de habilidade do soldador e treinamento necessário. Também apresenta baixa produtividade, tanto em termos de taxa de deposição quanto em termos de fator de ocupação do soldador quando comparado a outros processos (MARQUES, MODENESI E BRACARENSE, 2009). É um processo relativamente de baixo custo de investimento e os consumíveis são disponíveis para praticamente todas as aplicações de fabricação, construção e montagem de equipamentos. (ASM HANDBOOK, 2011)

Dentre os processos de soldagem, é um dos mais flexíveis e pode ser utilizado em qualquer posição de soldagem e com qualquer faixa de espessura de metal de base, na maioria dos metais, exceto para metais reativos como o titânio. Com alumínio suas aplicações são limitadas. Pode ser utilizado também em locais sujeitos ao vento ou em locais de difícil acesso. (PHILLIPS, 2016 e ASM HANDBOOK, 2011)

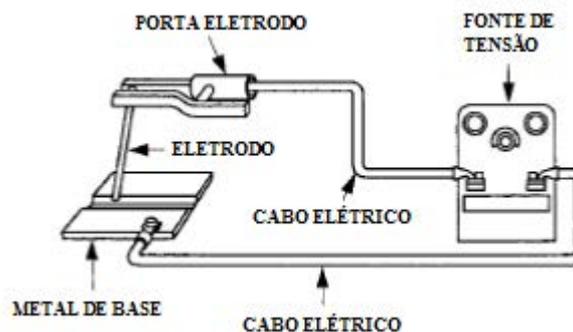
Por se tratar de um processo basicamente manual, exige elevada habilidade do soldador para obtenção de soldas com boa qualidade. A qualidade da solda depende também do detalhe da junta soldada e da acessibilidade, bem como do eletrodo e da técnica utilizada. Em geral,

este processo é de excelente qualidade visto que é largamente utilizado em reparos de navios, estruturas *off-shore* em plataformas de petróleo, plantas de energia nuclear e tubulações de alta pressão. (ASM HANDBOOK, 2011)

2.2.2 Equipamentos

A Figura 4 mostra o circuito elétrico do processo de soldagem por eletrodo revestido. O equipamento consiste de uma fonte de tensão, porta eletrodos e cabos elétricos que conectam a peça à fonte de tensão e ao porta eletrodo. Um circuito de corrente alternada, corrente contínua e eletrodo negativo, também conhecido como polaridade direta, ou ainda, corrente contínua e eletrodo positivo, conhecido como polaridade inversa, pode ser utilizado e dependerá das características do revestimento do eletrodo (ASM HANDBOOK, 2011).

Figura 4 – Circuito elétrico do processo por eletrodos revestidos.



Fonte: Adaptado de ASM HANDBOOK (2011).

2.2.3 Consumíveis

Um eletrodo revestido é constituído por uma vareta metálica recoberto por uma camada de fluxo. A composição do revestimento determina as características operacionais dos eletrodos e pode influenciar a composição química e as propriedades mecânicas da solda. Outras funções do revestimento além das já citadas neste texto são: facilitar a soldagem em diferentes posições, diminuir a velocidade de resfriamento da solda, aumentar a taxa de deposição, entre outras (MARQUES, MODENESI E BRACARENSE, 2009)

A classificação de eletrodos mais utilizada na indústria brasileira é a proposta pela *American Welding Society*. Esta é especificada por grupos de ligas soldadas. No caso de eletrodos revestidos para soldagem a arco de aços carbono, utiliza-se a especificação AWS A5.1 (MARQUES, MODENESI E BRACARENSE, 2009).

Nesta especificação, um sistema de 5 dígitos é utilizado, sendo o primeiro dígito a letra E, que se refere a eletrodo e significa que o material de enchimento faz parte do circuito elétrico. O segundo e terceiro dígitos são números e especificam a mínima resistência a tração do metal de solda que será produzido por este eletrodo. O quarto dígito especifica a posição de soldagem, enquanto que o último dígito especifica o tipo de revestimento e a polaridade recomendada para aquele eletrodo (PHILLIPS, 2016). Sendo assim, um eletrodo classificado segundo a especificação A5.1 da AWS como E6013, por exemplo, é um eletrodo com revestimento do tipo rutílico e potássio, que pode ser utilizado em todas as posições de soldagem e com qualquer tipo de corrente – CC+, CC- ou CA. (MARQUES, MODENESI E BRACARENSE, 2009)

Segundo Marques, Modenesi e Bracarense (2009), os revestimentos dos eletrodos revestidos podem ser classificados em diferentes tipos tais como, revestimento oxidante, revestimento ácido, revestimento rutílico, revestimento básico e revestimento celulósico, cada um com características e propriedades particulares que influenciarão as propriedades da junta soldada.

2.2.4 Parâmetro elétricos e operacionais

Os principais parâmetros no processo de soldagem por eletrodos revestidos são: tipo e diâmetro do eletrodo, tipo, polaridade e valor da corrente, tensão e comprimento do arco, velocidade de soldagem, posição de soldagem e sequência de deposição.

2.2.4.1 Diâmetro do eletrodo

Segundo Marques, Modenesi e Bracarense (2009), o diâmetro do eletrodo deve ser selecionado, principalmente, na espessura do MB a ser soldado, na posição de soldagem e no tipo da junta.

Este parâmetro é um dos principais limitantes da faixa útil de corrente de soldagem, na medida em que ele controla a densidade de corrente elétrica por unidade de área de seção transversal da alma (WAINER, BRANDI, HOMEM DE MELLO, 1992)

2.2.4.2 Corrente de soldagem

A faixa de corrente dependerá do diâmetro do eletrodo selecionado, do material da alma, do revestimento e da posição de soldagem. Em geral, a faixa de corrente de operação vem especificada na embalagem do produto.

De acordo com Marques, Modenesi e Bracarense (2009), a intensidade da corrente é o parâmetro determinante na taxa de deposição para dadas condições fixas de soldagem. Este parâmetro possui também efeito inversamente proporcional à velocidade de resfriamento, limitando a produtividade.

Correntes inferiores a mínima estabelecida para um determinado eletrodo causa a instabilidade do arco, aquecimento e fusão insuficientes, enquanto que correntes superiores à máxima, podem prejudicar o revestimento. Para soldagem na posição plana, trabalha-se com correntes próxima ao valor máximo, já para posições vertical e sobrecabeça, as correntes devem ficar próximas ao limite inferior. (MARQUES, MODENESI E BRACARENSE, 2009)

2.2.4.3 Tipo e polaridade da corrente de soldagem

O tipo de corrente e a polaridade devem ser consideradas em relação ao tipo e diâmetro do eletrodo. Estes parâmetros influenciam a forma e as dimensões da poça de fusão, a estabilidade do arco e a transferência de metal de adição. De um modo geral, polaridade inversa permite maior penetração e polaridade direta, maior taxa de fusão do eletrodo. (MARQUES, MODENESI E BRACARENSE, 2009)

2.2.4.4 Tensão de soldagem

A tensão de soldagem depende do diâmetro e do revestimento do eletrodo, da corrente utilizada e do comprimento do arco. A tensão aumenta para diâmetros e valores de corrente maiores. (MARQUES, MODENESI E BRACARENSE, 2009)

2.2.4.5 Comprimento do arco

Este parâmetro é controlado pelo soldador e depende da habilidade e experiência deste. Comprimento muito pequeno causa um arco intermitente ou até mesma sua extinção. Os cordões são mais estreitos e em geral, produzem reforço excessivo. Ao contrário, comprimentos maiores produzem um arco sem direção e concentração, gerando respingos e proteção deficiente da poça de fusão. (MARQUES, MODENESI E BRACARENSE, 2009)

2.2.4.6 Velocidade de soldagem

Este parâmetro é um dos mais importantes no processo de soldagem. Deve ser escolhido de modo que o arco fique ligeiramente a frente da poça de fusão. Velocidades altas, produzem cordões estreitos, de baixa penetração e com mordeduras. Velocidades baixas produzem cordões mais largos, com penetração e reforço excessivos. (MARQUES, MODENESI E BRACARENSE, 2009)

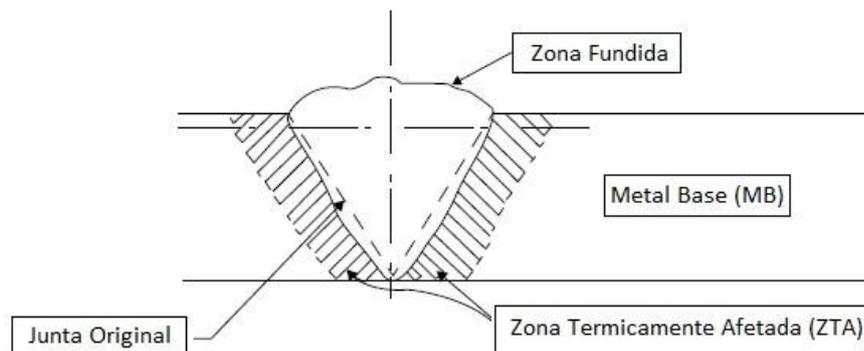
A energia de soldagem pode ser mantida reduzida, mesmo com elevados valores de corrente, utilizando-se altas velocidades de avanço. Dessa forma, obtém-se elevadas taxas de deposição, concomitantemente com microestruturas mais refinadas, tanto na zona fundida quanto na zona termicamente afetada (WAINER, BRANDI, HOMEM DE MELLO, 1992).

A velocidade efetiva de avanço também é influenciada pela oscilação do eletrodo durante a soldagem. O aumento da oscilação, diminui a velocidade de avanço, aumentando a energia de soldagem (WAINER, BRANDI, HOMEM DE MELLO, 1992).

2.3 A JUNTA SOLDADA

A junta soldada apresenta três regiões principais – o metal de base, a zona fundida (ZF) e a zona termicamente afetada (ZTA) – conforme indicado na seção transversal de uma solda na Figura 5.

Figura 5 – Caracterização de uma junta soldada.



Fonte: Adaptado de Lippold (2015).

2.3.1 Zona Fundida

A zona fundida é a região onde ocorre a fusão e solidificação durante o processo de soldagem para formar a junta soldada. A microestrutura na zona fundida é função da composição e das condições de solidificação (LIPPOLD, 2015). Em alguns casos, alterações

nas taxas de solidificação e resfriamento podem alterar fortemente a microestrutura da junta soldada. Segundo Phillips (2016), altas taxas de resfriamento resultarão em processo de solidificação mais rápido e em uma microestrutura mais refinada na zona fundida.

Devido ao processo de solidificação, a zona fundida apresenta-se, em geral, muito distinta da ZTA e do MB, o que pode ser evidenciado por meio de metalografia (LIPPOLD, 2015).

2.3.2 Zona Termicamente Afetada

A ZTA, basicamente, é compreendida pela região entre a ZF e o MB. Nenhum processo de fusão ou solidificação ocorre nesta região. A evolução da microestrutura nesta região da solda pode ser muito complexa e depende fortemente da composição e de fatores térmicos.

A microestrutura da ZTA adjacente a zona fundida é influenciada por muitas variáveis do processo de soldagem. O aporte térmico ou *heat input*, material da junta e as condições de soldagem afetam o histórico térmico da ZTA, influenciando a tamanho e a microestrutura da região. (LIPPOLD, 2015)

2.4 SOLDABILIDADE DOS AÇOS COM BAIXO TEOR DE CARBONO

Segundo definição da AWS, “soldabilidade é a capacidade de um material ser soldado sob condições de fabricação impostas a uma estrutura específica e devidamente projetada para realizar de forma satisfatória suas funções pretendidas”.

Aços com baixo teor de carbono são principalmente utilizados em aplicações estruturais. Aços carbono, com menos de 0,3% de carbono podem ser soldados pela maioria dos processos de soldagem com poucos requisitos especiais para prevenir o aparecimento de trincas. Para espessuras maiores que 1 polegada, particularmente se o metal de base excede 0,22% C, pode ser necessário que o aço seja pré-aquecido e seja realizado um alívio de tensões a aproximadamente 525 a 675°C. (ASM HANDBOOK, 1990)

Em geral, para aços baixo carbono, um metal de enchimento de baixa liga é recomendado para se atingir os requisitos de propriedades mecânicas adequados. O procedimento geral para seleção, é o “casamento” do metal de adição com o metal de base em termos de resistência mecânica. (ASM HANDBOOK, 1990)

2.5 CICLO TÉRMICO DA SOLDAGEM

É de extrema importância o conhecimento dos ciclos térmicos a que os materiais são submetidos no processo de soldagem uma vez que, estes atuam com forte influência sobre a formação da estrutura cristalina e, portanto, nas propriedades finais da junta soldada.

O ciclo consiste basicamente de três etapas: primeiro tem-se o aquecimento rápido e acentuado do material no início do processo; segundo tem-se a fase em que a temperatura máxima do processo é atingida e por último, a etapa na qual a temperatura retorna ao valor inicial, o resfriamento gradual. (WAINER, BRANDI, HOMEM DE MELLO, 1992)

O resultado final, após o término de um ciclo, é a formação de um estado térmico transiente no processo. Enquanto a fonte de calor está “ativa”, pode-se dizer que o processo se encontra em equilíbrio térmico ou em um estado quase estável. (ASM HANDBOOK, 2011)

O intenso calor de soldagem funde o material do metal de base, formando a poça de fusão. Parte deste calor é conduzido para o metal de base e parte é perdida para o meio ao redor da solda. (ASM HANDBOOK, 2011)

Durante a soldagem, cada ponto do material passa por um ciclo térmico cuja intensidade é função da posição em relação a fonte de calor. (WAINER, BRANDI, HOMEM DE MELLO, 1992)

O pico de temperatura e a taxa de resfriamento subsequente determina as estruturas da zona termicamente afetada, enquanto que a zona fundida tem sua estrutura influenciada pelo gradiente de temperatura, taxa de solidificação e de resfriamento. (ASM HANDBOOK, 2011)

2.6 MECANISMOS QUE INTERFEREM NA MICROESTRUTURA DA SOLDA

2.6.1 Aporte térmico

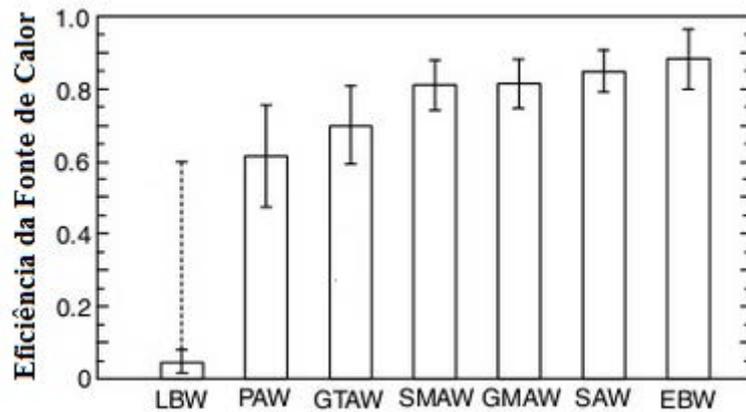
Durante o processo de soldagem, parte da energia disponível é dissipada para a vizinhança sob a forma de calor irradiante; outra pequena porção da energia é perdida por convecção no meio gasoso que protege a poça de fusão e a terceira parte é a de fato utilizada para a execução da soldagem na fusão dos materiais envolvidos. Sendo assim, pode-se afirmar que nem toda energia disponível é aproveitada para fundir o metal de base e o eletrodo e, portanto, estas perdas são relacionadas com a eficiência do arco elétrico (η). A eficiência é definida pela relação entre a energia efetivamente absorvida e a energia total fornecida ao arco e pode ser expressa pela equação (1):

$$\eta = \frac{Q}{V \times I} \quad \text{Equação (1)}$$

onde, V é a tensão do arco em Volts e I é a corrente de soldagem em Ampères. (WAINER, BRANDI, HOMEM DE MELLO, 1992)

Os valores típicos da eficiência do arco elétrico estão representados na figura 6.

Figura 6 – Eficiência da fonte de calor de alguns processos de soldagem.



Fonte: Adaptado de Kou (2002).

O aporte térmico ou, *heat input*, é a quantidade de energia em joules/mm, por exemplo, transferida para a junta soldada devido ao processo de soldagem. Altos valores de *heat input* produzem soldas com zonas termicamente afetadas mais largas e taxas de resfriamento mais baixas. (PHLLIPS, 2016)

Segundo Wainer, Brandi e Homem de Mello (1992), esta grandeza correlaciona a quantidade de energia disponível para a soldagem com a velocidade de avanço (v) da fonte de calor, sendo expressa pela equação (2) a seguir:

$$HI = \frac{\eta \times V \times I}{v} \left[\frac{J}{mm} \right] \quad \text{Equação (2)}$$

2.6.2 Natureza dos materiais da junta

Na prática, quando se avalia o fluxo de calor em um processo de soldagem, a condutividade térmica do material é a propriedade com maior impacto sobre o *heat input* na soldagem. Outra característica que também influencia a microestrutura da solda é a espessura uma vez que, chapas finas apresentam taxas de resfriamento mais altas. (PHLLIPS, 2016)

A composição dos materiais é outro fator que possui efeito sobre o processo de solidificação da solda. Metais puros, por exemplo, solidificam com fronteiras planas sob a maioria de combinações entre gradiente de temperatura e taxa de crescimento de grãos. Em uma solda, tem-se a adição de elementos de liga e/ou impurezas que influenciam o processo de solidificação, tornando a estrutura da junta soldada de característica dendrítica ou celular (LIPPOLD, 2015).

2.6.3 Crescimento epitaxial

Na soldagem por fusão, os grãos do metal de base situados na linha de fusão agem como substrato para a nucleação. Como ocorre o contato entre a poça de fusão e estes grãos, o processo de nucleação dos cristais a partir do metal líquido até o substrato do metal de base, não encontra dificuldades (KOU, 2002).

Quando a composição do metal de base e do metal de enchimento são similares, a fronteira de solidificação que cresce a partir de um determinado grão do substrato manterá a mesma orientação cristalográfica. Este processo de crescimento é conhecido como crescimento epitaxial (LIPPOLD, 2015).

O crescimento epitaxial, essencialmente, não requer um subresfriamento ou outro tipo de força motriz para se desenvolver. A solidificação começa imediatamente após o resfriamento abaixo da temperatura de *liquidus* do material. (LIPPOLD, 2015)

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para avaliar a influência da posição e velocidade de soldagem sobre as propriedades e microestrutura da zona fundida de uma junta soldada, foi realizada a soldagem, pelo processo de eletrodos revestidos, de 4 corpos de prova (cp's): 2 na posição plana e 2 na posição vertical ascendente. Em cada posição soldada, variou-se a velocidade de soldagem por meio da habilidade do soldador.

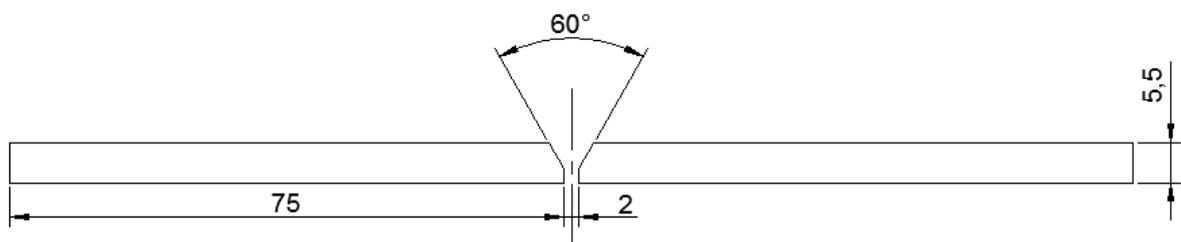
O estudo da influência destes parâmetros foi realizado por meio de metalografia da ZTA e da ZF, bem como, do perfil de microdureza Vickers de uma amostra de cada cp soldado. Os resultados obtidos foram comparados entre si a fim de se relacionar as variações aos parâmetros de soldagem avaliados.

3.1 CORTE DE CHAPAS E PREPARAÇÃO PARA SOLDAGEM

Para a realização deste trabalho, foram utilizadas chapas de aço baixo teor de carbono adquiridas comercialmente. Foram utilizadas 4 chapas de 300 mm x 300 mm e espessura de 5,5 mm.

As chapas foram cortadas ao meio para a preparação dos biséis pelo processo de fresamento. A geometria da junta soldada, com o ângulo do chanfro e abertura de raiz, pode ser observada na figura 7. Estes valores foram conferidos na montagem das peças utilizando-se um calibre de solda universal.

Figura 7 – Detalhe da junta soldada



Fonte: Produção do próprio autor.

3.2 SOLDAGEM

Para atingir os objetivos propostos neste trabalho, foram soldados 4 cp's, sendo dois na posição plana e outros dois cp's na posição vertical ascendente. A fixação e o posicionamento das partes a serem unidas foi realizada por ponteamento, com auxílio de grampos em U. Em

cada posição, tentou-se variar a velocidade de soldagem, sob grande influência da habilidade do soldador.

A soldagem dos corpos de prova foi realizada pelo processo de eletrodo revestido (SMAW), corrente contínua, polaridade inversa (CC+). A máquina utilizada é da marca ESAB e opera em faixa de corrente de 50 à 250 Amperes, com tensão de alimentação de 110/220 volts. Foram utilizados eletrodos de classificação AWS E6013, diâmetro de 3,25 mm.

Durante a execução da soldagem, com auxílio de um alicate-amperímetro, cronômetro e trena, foi realizado o controle de cada passe de solda, registrando-se os valores de tensão mínima e máxima, corrente mínima e máxima, tempo e comprimento do passe. Estes dados podem ser observados nas tabelas 1 à 4.

Para cada passe de solda, foi calculado o aporte térmico ou *heat input* utilizando a equação (2) apresentada anteriormente. Para este cálculo, foi considerado a média dos valores mínimos e máximos da tensão e corrente e um rendimento médio do processo de soldagem de 0,755 obtido segundo gráfico apresentado por KOU (2003).

Tabela 1 – Dados de soldagem CP n° 01: posição plana.

n° passe	Tensão [V]		Corrente [A]		Tempo [s]	Comprimento [mm]	Velocidade [mm/s]	Aporte Térmico [J/mm]
	min	max	min	max				
1	23	25	108	113	70	200	2,86	700,79
2	23	26	118	124	61	200	3,28	682,65
3	23	25	109	118	60	200	3,33	616,99
MEDIA							3,16	666,81

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 2 - Dados de soldagem CP n° 02: posição plana.

n° passe	Tensão [V]		Corrente [A]		Tempo [s]	Comprimento [mm]	Velocidade [mm/s]	Aporte Térmico [J/mm]
	min	max	min	max				
1	23	26	113	121	64	125	1,95	1108,07
2	22	25	110	118	33	75	2,27	889,96
3	22	27	112	117	75	190	2,53	836,04
4	23	26	113	118	68	145	2,13	1001,93
5	22	25	113	118	21	55	2,62	782,44
MEDIA							2,43	873,47

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 3 - Dados de soldagem CP n° 03: posição vertical ascendente.

n° passe	Tensão [V]		Corrente [A]		Tempo [s]	Comprimento [mm]	Velocidade [mm/s]	Aporte Térmico [J/mm]
	min	max	min	max				
1	23	25	83	89	63	150	2,38	654,49
2	23	26	81	88	26	45	1,73	903,09
3	23	25	76	86	93	170	1,83	802,93
4	22	26	78	86	15	40	2,67	557,19
5	23	27	82	89	83	200	2,41	669,73
6	23	25	82	86	104	200	1,92	791,48
MEDIA							2,33	672,80

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 4 - Dados de soldagem CP n° 04: posição vertical ascendente.

n° passe	Tensão [V]		Corrente [A]		Tempo [s]	Comprimento [mm]	Velocidade [mm/s]	Aporte Térmico [J/mm]
	min	max	min	max				
1	23	25	76	87	81	78	0,96	1533,58
2	23	26	76	88	86	82	0,95	1590,79
3	23	26	75	86	62	50	0,81	1846,42
4	23	25	78	87	10	17	1,70	879,35
5	21	25	80	86	73	75	1,03	1402,86
6	23	26	85	91	101	120	1,19	1370,05
7	23	25	83	86	86	75	0,87	1755,71
8	22	27	79	89	90	90	1,00	1553,79
9	23	27	81	88	35	45	1,29	1240,51
MEDIA							1,05	1516,67

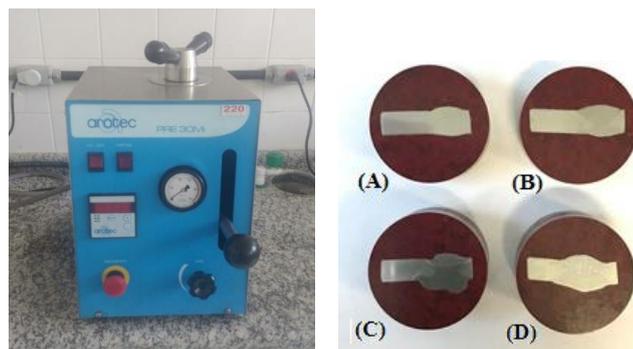
Fonte: Produção do próprio autor.

3.3 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

Após a soldagem dos corpos de prova, foram preparadas as amostras para ensaio metalográfico e de microdureza Vickers.

Uma seção de cada corpo de prova, contendo a zona fundida e uma porção do metal de base, foi retirada com auxílio de serra de fita para que fossem embutidas em baquelite, no forno de embutimento AROTEC, conforme figura 8.

Figura 8 – À esquerda, forno de embutimento AROTEC. À direita, amostras preparadas para ensaio metalográfico. (A) Amostra n° 1. (B) Amostra n° 2. (C) Amostra n° 3. (D) Amostra n° 4.



Fonte: Produção do próprio autor.

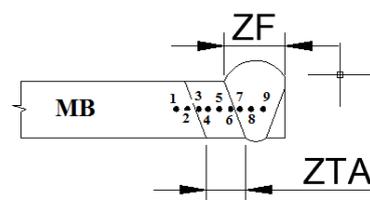
Em seguida, as amostras embutidas foram preparadas de modo convencional para ensaio metalográfico. As amostras foram lixadas com lixas de granulação na seguinte ordem: 200, 400, 600 e 1200. Após lixadas, as amostras foram polidas utilizando solução de alumina 1 μm e 0,3 μm . Após o polimento, as amostras foram atacadas em solução de nital a 2%.

A análise da microestrutura da zona fundida, ZTA e metal de base foi realizada com o auxílio de microscópio óptico da marca NIKON, modelo EPIPHOT 200, com aumentos da objetiva de 10X, 20X, 50X, 100X e 200X. O software AXIOVISION foi utilizado para a obtenção das imagens metalográficas analisadas neste trabalho.

3.4 ENSAIO DE MICRODUREZA VICKERS

Foi realizado o ensaio de microdureza Vickers em uma amostra de cada corpo de prova. A figura 9 apresenta o micro durômetro utilizado, da marca WILSON INSTRUMENTS, modelo 401MVD. As medidas foram realizadas em intervalos regulares de distâncias a fim de se avaliar a variação desta propriedade ao longo de uma linha entre o metal de base e a zona fundida. Procurou-se efetuar as medidas aproximadamente conforme esquema apresentado na figura 9.

Figura 9 – À esquerda, micro durômetro utilizado para ensaio de dureza das amostras. À direita, desenho esquemático das medidas de microdurezas efetuadas.



Fonte: Produção do próprio autor

4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 PARÂMETROS DE SOLDAGEM AVALIADOS

Os parâmetros de soldagem avaliados neste trabalho estão resumidos na tabela 5. Observa-se que, apesar do número de passes diferentes para cada corpo de prova soldado, foi possível obter a variação da velocidade de soldagem entre um cp e outro em uma determinada posição. Portanto, como esperado, nota-se também a variação do *heat input* para cada situação de soldagem.

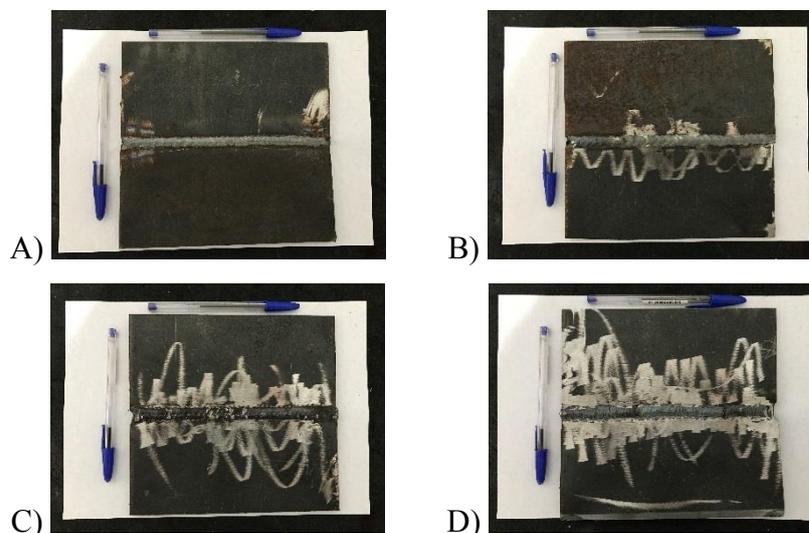
Tabela 5 – Resumo comparativo dos parâmetros de soldagem estudados.

	posição plana		posição vertical	
	CP01	CP02	CP03	CP04
Velocidade de soldagem [mm/s]	3,16	2,43	2,33	1,05
Aporte Térmico [J/mm]	666,81	873,47	672,80	1516,67

Fonte: Produção do próprio autor.

Outra observação que confirma a variação dos parâmetros estudados é o aspecto visual do cordão de solda obtido no processo de soldagem e apresentado na figura 10. Nota-se que, com velocidades de soldagem maiores, o cordão de solda tende a ficar mais estreito, enquanto que, para velocidades menores, tende a ser mais largo.

Figura 10 – Aspectos visuais dos cordões de solda obtidos. (A) CP n° 01. (B) CP n° 02. (C) CP n° 03. (D) CP n° 04.

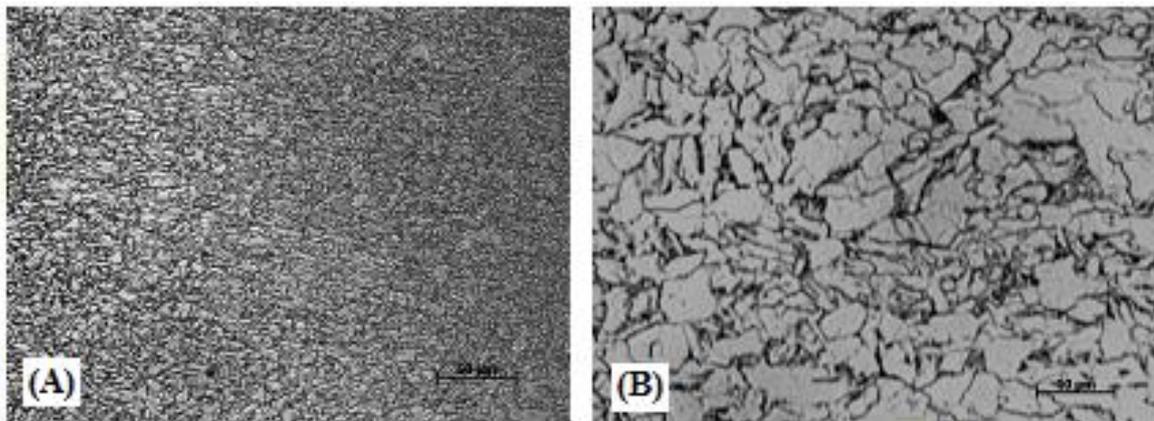


Fonte: Produção próprio autor.

4.2 MICROESTRUTURA DO METAL DE BASE

A análise da figura 11 (A) e (B) nos permite observar o metal de base com microestrutura refinada e regular. Observa-se também, que a microestrutura é predominantemente ferrítica, como esperado para um aço baixo carbono. Adjacente às áreas de contorno de grãos, ocorre a presença de porções escuras de colônias perlíticas em pequena fração de volume e de tamanho reduzido, também característico do aço baixo carbono.

Figura 11 – Metal de Base: (A) aumento de 500X. (B) aumento de 1000X.



Fonte: Produção do próprio autor.

4.3 MICROESTRUTURA – POSIÇÃO PLANA

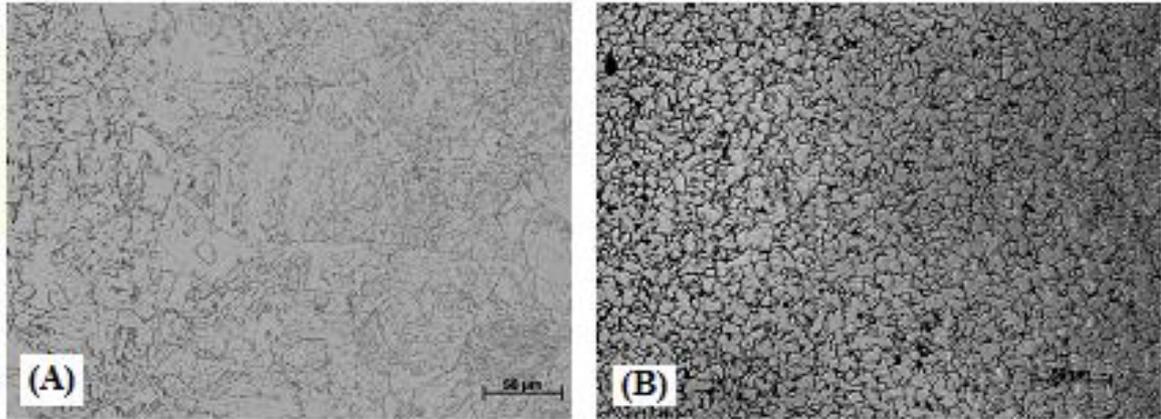
A microestrutura da amostra número 1, correspondente ao corpo de prova soldado na posição plana e com velocidade mais alta, pode ser observada na figura 12 – (A) e (B).

A figura 12 (A) nos permite observar, como era de se esperar, a presença do crescimento de grão na ZTA. Nota-se também a presença de pequenas áreas perlíticas e de ferrita acicular devido ao rápido resfriamento.

Na zona fundida, figura 12 – (B), nota-se a presença de uma microestrutura de grãos pequenos e equiaxiais o que evidencia a ocorrência de resfriamento rápido. Na transição entre passes de solda, observada na figura 13 – (A), pode-se observar grãos muito maiores denotando que houve uma taxa de resfriamento menor devido ao aquecimento da chapa em decorrência dos passes anteriores.

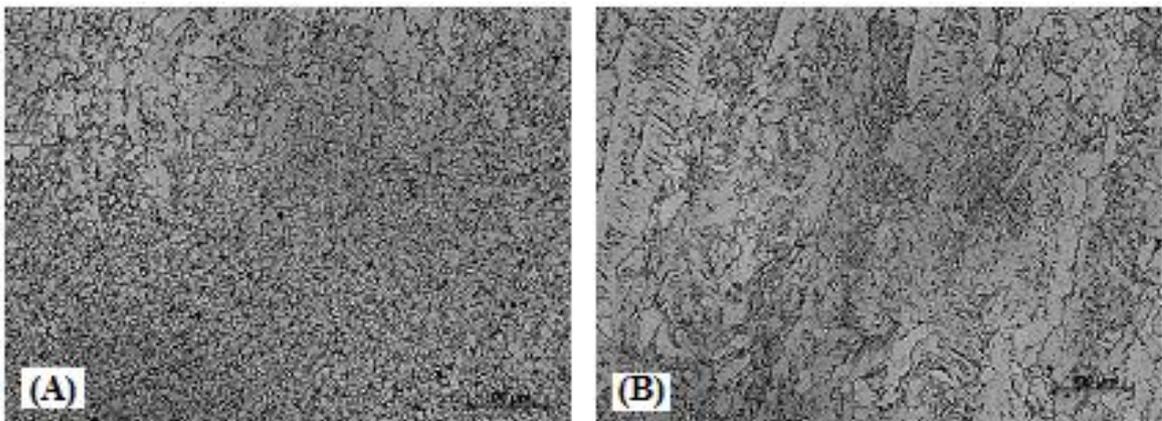
A figura 13 – (B), apresenta a microestrutura da zona fundida e possivelmente do passe final visto que, nota-se a ocorrência de grãos muito maiores e orientados segundo a direção da extração de calor além da presença predominante de ferrita acicular com alguns indícios de perlita nos contornos de grãos.

Figura 12 – Amostra n° 01. (A) ZTA, aumento de 200X. (B) Zona Fundida, aumento de 200X.



Fonte: Produção do próprio autor.

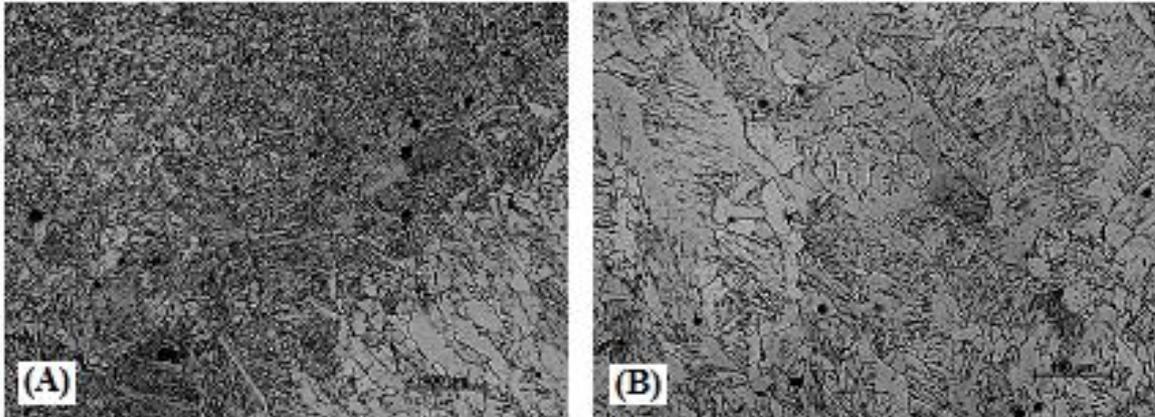
Figura 13 – Amostra n° 01. (A) Transição entre passes na ZF, aumento de 100X. (B) Passe de solda final na ZF, aumento de 100X.



Fonte: Produção do próprio autor.

A microestrutura da amostra n° 2, soldagem na posição plana e velocidade mais baixa, pode ser avaliada na figura 14 (A) e (B). Na figura 14 – (A), observa-se o crescimento acentuado dos grãos com a presença marcante de ferrita acicular. Ao entrar na ZF, figura 14 – (B), evidencia-se a presença de grãos muito maiores, orientados segundo a direção da extração de calor e na qual, observa-se um volume de ferrita acicular muito menor.

Figura 14 – Amostra n° 2. (A) Transição ZTA / ZF, aumento de 100X. (B) ZF, aumento de 100X.



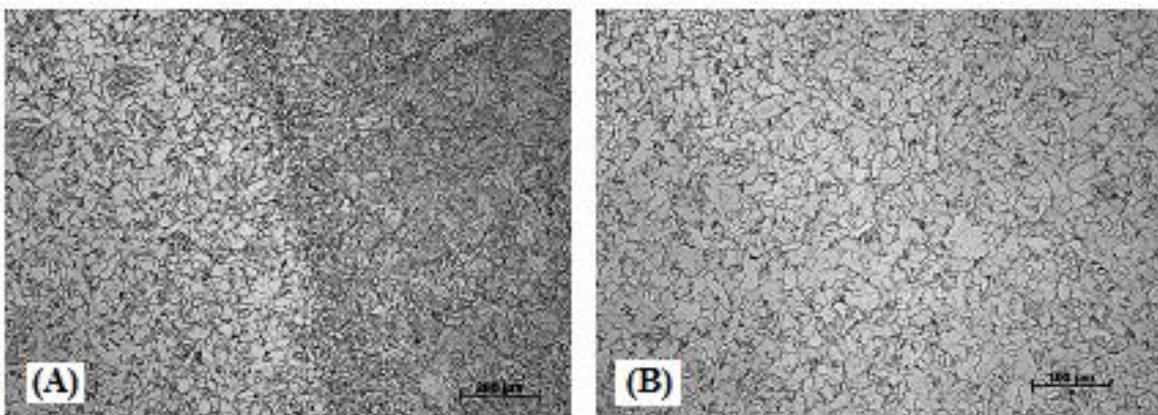
Fonte: Produção do próprio autor.

4.4 MICROESTRUTURA – POSIÇÃO VERTICAL ASCENDENTE

A figura 15 (A) e (B) apresentam a microestrutura da ZTA e ZF do cp n° 03, soldado na posição vertical ascendente e com velocidade de soldagem maior.

Na figura 15 (A), nota-se a ocorrência do crescimento de grãos na ZTA além da presença de pequenas porções de perlita nos contornos de grãos. Na zona fundida, apresentada pela figura 15 (B), nota-se também a presença de pequenas porções de perlita nos contornos de grão. Os grãos se apresentam orientados equiaxialmente e de tamanho relativamente maior quando comparados com a ZTA.

Figura 15 – (A) ZTA do cp n° 03, com aumento de 100X. (B) ZF do cp n° 03, com aumento de 100X.

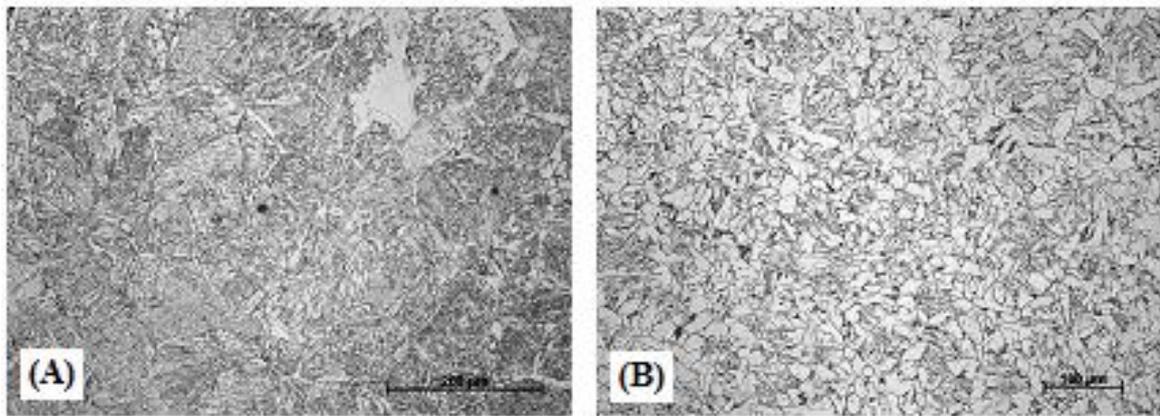


Fonte: Produção do próprio autor.

A figura 16 (A) e (B) corresponde a amostra do cp n° 04, soldado na posição vertical ascendente e com velocidade de soldagem menor.

Na ZTA da amostra do cp n° 04, figura 16 – (A), nota-se que houve crescimento orientado de grãos, segundo a direção da extração de calor, com a presença de ferrita acicular em grande quantidade. Nota-se também a ocorrência de grãos nesta região maiores em função da elevada energia de soldagem envolvida no processo. A avaliação da ZF desta amostra, figura 16 (B), nos permite observar a presença de grãos equiaxiais, com grãos de tamanho maior e com áreas perlíticas nos contornos. Observa-se também a ocorrência de inclusões, possivelmente advindas do consumível.

Figura 16 – (A) ZTA do cp n° 04, com aumento de 100X. (B) ZF do cp n° 04, com aumento de 100X.



Fonte: Produção do próprio autor.

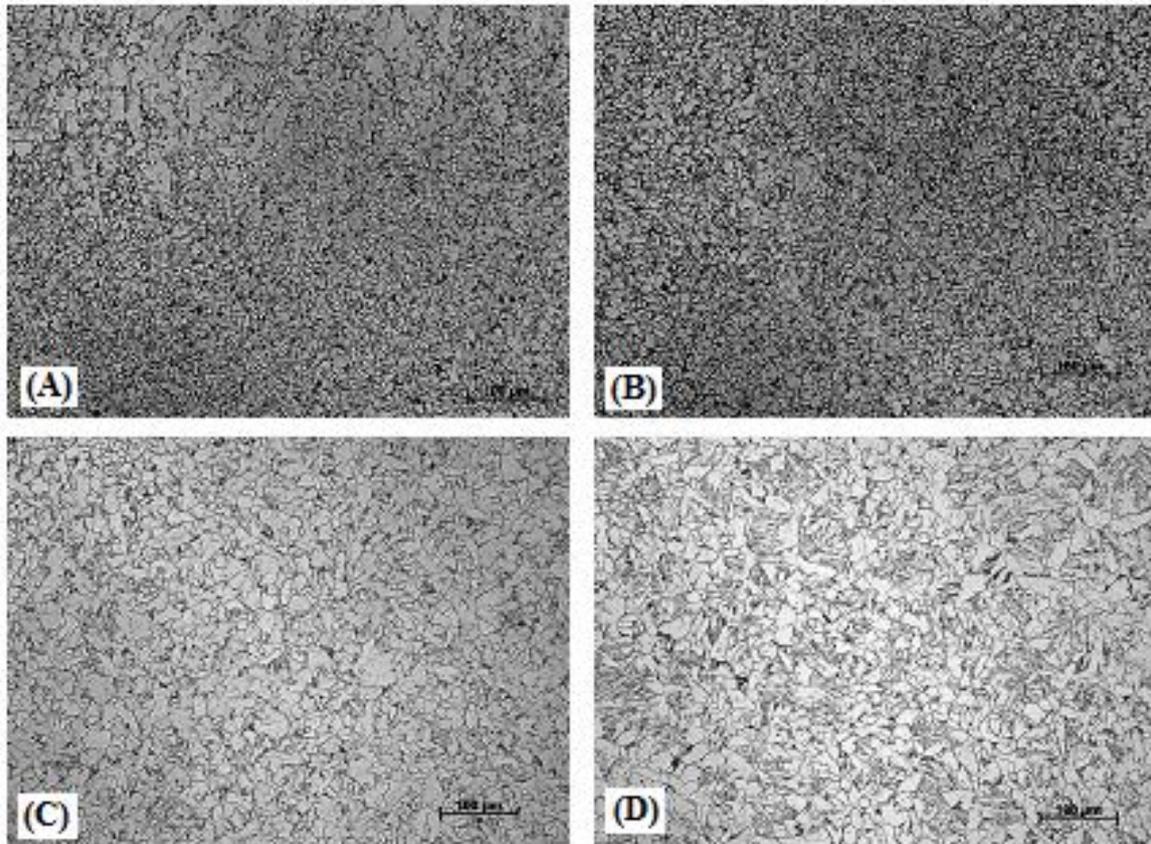
4.5 COMPARATIVO DAS MICROESTRUTURAS DA ZF

A figura 17 – (A) à (D) apresenta um comparativo das ZF's de cada corpo de prova soldado. (A) e (B), representam os cp's soldados na posição plana, enquanto que (C) e (D), os cp's soldados na posição vertical ascendente.

Segundo Asibeluo (2015), a microestrutura da solda é controlada principalmente pelo ciclo de resfriamento. Para um ciclo com baixo valor de *heat input*, o tempo para solidificação é menor; sendo assim, o resfriamento rápido promove a ocorrência de grãos menores. Ao contrário, valor elevado de *heat input* faz com que o tempo de solidificação aumente e, portanto, a taxa de resfriamento diminui, levando a formação de grãos grosseiros na estrutura da junta soldada.

Observa-se este efeito na figura 16 (D), na qual a amostra apresentou um valor de *heat input* relativamente superior devido à baixa velocidade de soldagem, quando comparado aos outros corpos de prova.

Figura 17 – (A) CP n° 01, com aumento de 100X. (B) CP n° 02, com aumento de 100X. (C) CP n° 03, com aumento de 100X. (D) CP n° 04, com aumento de 100X.



Fonte: Produção do próprio autor.

4.6 MICRODUREZA VICKERS

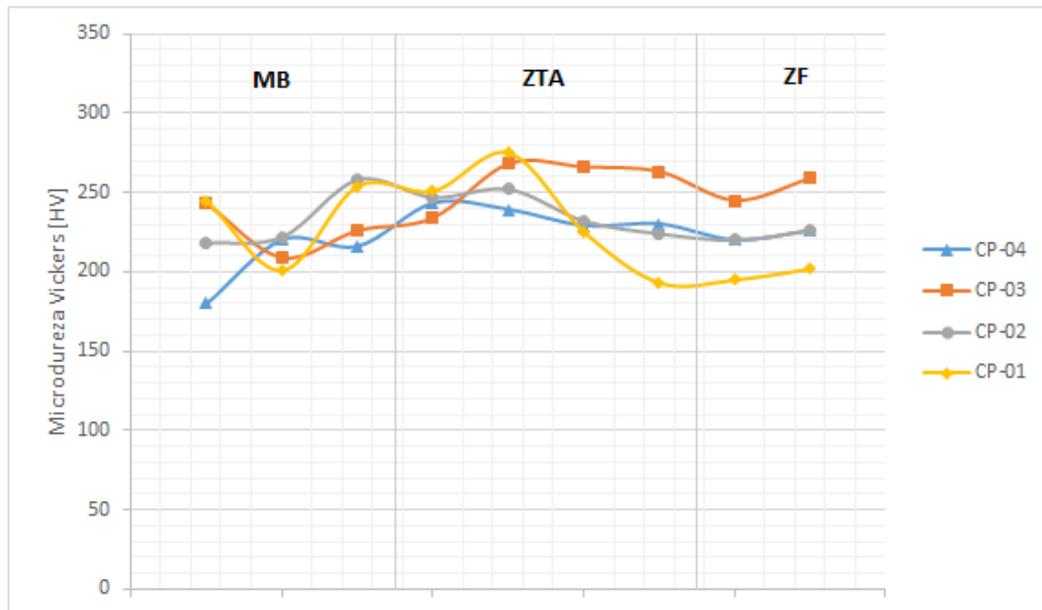
O perfil de microdureza Vickers de cada uma das amostras é observado na figura 18.

Segundo Masoumi (2009), a posição de soldagem não possui efeito significativo sobre a dureza da junta soldada. No entanto, comparando-se os valores de dureza das ZF's das amostras soldadas na posição plana e na posição vertical, nota-se que as juntas obtidas na posição vertical tendem a apresentar maiores valores de dureza.

Talabi (2014) afirma que a dureza tende a aumentar com o aumento da velocidade de soldagem e para De Rissone (2003) a dureza da junta soldada é maior para juntas com maior número de passes.

Neste estudo, nota-se que a dureza das juntas soldadas, ao contrário da expectativa, não se comportou da mesma forma que os resultados observados na literatura. Um fator a ser considerado é o número de passes diferente para cada corpo de prova. Sabe-se que em uma junta soldada, um passe posterior pode ter efeito de alívio de tensões ou mesmo revenimento sobre os passes anteriores. Como não foi possível manter o mesmo número de passes para todas as amostras estudadas, existe a possibilidade de os efeitos de posição e velocidade de soldagem sobre a dureza, terem sido afetados.

Figura 18 – Perfil de Microdureza Vickers.



Fonte: Produção do próprio autor.

5 CONCLUSÃO

Várias juntas soldadas foram obtidas variando-se posição e velocidade de soldagem. A análise das juntas permitiu concluir que:

O efeito da velocidade de soldagem sobre a microestrutura obtida foi confirmado, de acordo com a expectativa, ou seja, quanto maior a velocidade mais refinada a microestrutura. O efeito da posição de soldagem sobre a microestrutura obtida não foi observado, o que pode ser atribuído à variação do número de passes nas amostras estudadas.

Os valores de dureza encontrados, assim como os aspectos microestruturais, também não apresentaram uma tendência definida o que, mais uma vez, pode ser atribuído ao número de passes de cada amostra.

5.1 SUGESTÃO PARA PROSSEGUIMENTO DO TRABALHO

A despeito de haver número considerável de dados na literatura a respeito do tema estudado, o trabalho mostrou que pode-se continuar o estudo da influência dos parâmetros de soldagem sobre as propriedades de uma junta soldada, utilizando-se corpos de prova com mesmo número de passes, que evidenciem os efeitos que se deseja estudar.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR METAL HANDBOOK. **Properties and selection: irons steels and high performance alloys**. 10^a ed. USA: ASM International, 1990.

AMERICAN SOCIETY FOR METAL HANDBOOK. **Welding Fundamental and Process**. Vol 06A. USA: ASM International, 2011. 981p.

AMERICAN WELDING SOCIETY. **Bridge Welding Code**. 6^a ed. Miami: AWS, 2010. 456p.

ARAÚJO, C. **Elementos de fixação e molas**. Disponível em <<https://www.slideshare.net/clodoara/elementos-de-fixao-e-molas>>. Acesso em 15 out. 2017.

ASIBELUO, I. S.; EMIFONIYE, E. Effect of arc welding current on the mechanical properties of A36 carbon steel weld joints. **International Journal of Mechanical Engineering**, v. 2, n. 9, p. 79-87, sep. 2015.

KOU, SINDO. **Welding Metallurgy**. 2^a ed. New Jersey: Wiley, 2002. 461p.

LIPPOLD, JOHN C. **Welding Metallurgy and Weldability**. 1^a ed. New Jersey: Wiley, 2015. 400p.

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem: fundamentos e tecnologia**. 3^a ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2009. 362p.

MASOUMI, F.; SHAHRIARU, D Effects of welding positions on mechanical properties and microstructure in weld metal of high strength steel. **Advances in Materials and Processing Technologies**, Switzerland, v. 83, n. 86, p. 1121-1127, dec. 2009.

NORTON, ROBERT L. **Projeto de Máquinas: Uma abordagem integrada**. 4^a ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 1028p.

PHILLIPS, DAVID H. **Welding Engineering: an introduction**. 1^a ed. Chichester, UK: Wiley, 2016. 275p.

QUINTÃO, C. Produção de estruturas de aço caiu 44%, para 694 mil toneladas em 2016. **Valor Econômico**, São Paulo, 4 ago. 2017. Disponível em: <www.valor.com.br/empresas/5067444/producao-de-estruturas-de-aco-caiu-44-para-694-mil-toneladas-em-2016>. Acesso em: 14 out. 2017.

RAMINI DE RISSONE, M. N.; BOTT, I. de S.; DE VEDIA, L. A.; SURIAN, E. S. Effect of welding procedure on flux cored wire deposits. **Science and Techonology of Welding and Joining**, v. 8, n. 2, p. 113-122, 2003.

TALABI, S. I.; OWOLABI, O. B.; ADEBISI, J. A.; YAHAYA, T. Effect of welding variables on mechanical properties of low carbono steel welded joint. **Advances in Production Engineering and Management**, v. 9, n. 4, p. 181-186, dec. 2014.

WAINER, E.; BRANDI, S. D.; HOMEM DE MELLO, F. D. **Soldagem: processos e metalurgia**. 1^a ed. São Paulo: Blucher, 1992. 494p.