



Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP
Escola de Minas
Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais
Campus Morro do Cruzeiro
Ouro Preto – Minas Gerais – Brasil



MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA METALÚRGICA

“EFEITO DO TIPO DE CORRENTE ELÉTRICA E DA POLARIDADE
SOBRE OS PARÂMETROS GEOMÉTRICOS E METALÚRGICOS
DE CORDÕES DE SOLDA OBTIDOS COM O PROCESSO SMAW
EM AÇO BAIXO CARBONO”

Kátia Guimarães Martins

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Rangel Porcaro

Ouro Preto, novembro de 2022

Kátia Guimarães Martins

“Efeito do tipo de corrente elétrica e da polaridade sobre os parâmetros geométricos e metalúrgicos de cordões de solda obtidos com o processo SMAW em aço baixo carbono”

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Metalúrgica da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheira Metalurgista.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Rangel Porcaro

Ouro Preto, novembro de 2022.



FOLHA DE APROVAÇÃO

Kátia Guimarães Martins

Efeito do tipo de corrente e da polaridade sobre os parâmetros geométricos e metalúrgicos de cordões de solda obtidos com o processo SMAW em aço baixo carbono

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Metalúrgica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira Metalúrgica

Aprovada em 08 de dezembro de 2022

Membros da banca

Dr. Rodrigo Rangel Porcaro - Orientador - Universidade Federal de Ouro Preto

Dr. Luiz Cláudio Cândido - Membro - Universidade Federal de Ouro Preto

Eng. Salvatore Giuliano Peixoto Tropia de Abreu - Membro - Universidade Federal de Ouro Preto

Rodrigo Rangel Porcaro, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 16/12/2022.



Documento assinado eletronicamente por **Rodrigo Rangel Porcaro, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 19/12/2022, às 09:39, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0446920** e o código CRC **53D8E788**.

RESUMO

A soldagem por eletrodos revestidos é amplamente utilizada devido ao seu baixo custo e aplicabilidade em diversos tipos de aços, além da possibilidade de se obter diferentes propriedades mecânicas e metalúrgicas do cordão de solda. No entanto, possui produtividade relativamente baixa, exige limpeza após cada passe de soldagem, necessita de uma frequente mudança de eletrodo, além de gerar um grande volume de gases no processo. Neste processo de soldagem, existem alguns parâmetros que influenciam na microestrutura e geometria da junta soldada, como por exemplo: tipo e diâmetro do eletrodo, tipo de corrente elétrica e polaridade, entre outros. Desta forma, o presente trabalho foi desenvolvido com a utilização de um dispositivo movido a gravidade criado para soldagem com eletrodos revestidos para se avaliar os efeitos da variação da polaridade e corrente sobre os parâmetros geométricos e, de modo qualitativo, os constituintes microestruturais do cordão de solda, sendo utilizados os eletrodos AWS E6013 e o AWS E7018. Para isso, foram realizadas análises macrográficas e microestruturais com o auxílio do estereomicroscópio e com o *software* ImageJ. Os resultados obtidos foram um pouco diferentes dos apresentados na literatura, pois os cordões de solda realizados com CC^- tiveram uma maior penetração do que os cordões de solda realizados com CC^+ . No entanto, não foi possível modificar apenas a polaridade, pois foram obtidos resultados diferentes para velocidade média de soldagem entre os eletrodos, os quais também interferem nos aspectos dos cordões de solda.

Palavras-chave: cordão de solda, geometria, microestrutura, polaridade, processo SMAW, tipo de corrente elétrica.

ABSTRACT

Welding with coated electrodes is widely used because of its low cost and applicability in several types of steels, besides the possibility of obtaining different mechanical and metallurgical properties of the weld bead. However, it has relatively low productivity, requires cleaning after each welding pass, needs a frequent change of electrode, and generates a large volume of gases in the process. In this welding process, there are some parameters that influence the microstructure and geometry of the welded joint, for example: type and diameter of the electrode, type of electric current and polarity, among others. Thus, the present work was developed with the use of a device moved by gravity created for welding with covered electrodes to evaluate the effects of the variation of the polarity and current on the geometric parameters and, in a qualitative way, the microstructural constituents of the weld bead, being used electrodes AWS E6013 and AWS E7018. For this, macro- and microstructural analyses were performed with the aid of a stereomicroscope and ImageJ software. The results obtained were slightly different from those presented in the literature, as the weld seams made with CC^- had a greater penetration than the weld seams made with CC^+ . However, it was not possible to modify only the polarity, because different results were obtained for average welding speed between the electrodes, which also interfere in the aspects of the weld beads.

Keywords: weld bead, geometry, microstructure, polarity, SMAW process, type of electric current.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1. Representação da poça de fusão em um processo de soldagem SMAW.....	13
Figura 3.2. Classificação de eletrodos revestidos. Norma AWS A5.1.....	15
Figura 3.4. Representação esquemática do efeito de alterações nos parâmetros de soldagem na geometria de cordões de solda depositados com uma energia de soldagem de aproximadamente 1,8kJ/mm. P = penetração do cordão de solda. a) CC ⁺ . b) CC ⁻	17
Figura 3.5. Influência do tipo de corrente e polaridade na penetração de um cordão de solda. a) CC ⁺ ; b) CC ⁻ ; c) CA. H = altura da penetração do cordão.....	18
Figura 3.6. Efeito da polaridade e tipo de revestimento sobre a penetração de uma solda.	19
Figura 3.7. Representação esquemática das regiões da junta soldada. MB = metal base; ZTA = Zona termicamente afetada; ZF = Zona Fundida.....	20
Figura 3.8. Representação de uma ZTA.....	22
Figura 3.9. Microestrutura de uma junta soldada em diferentes regiões com CC ⁺ de um aço baixo carbono.....	22
Figura 4.1. Chapa de aço de baixo carbono parcialmente lixada com espessura de 4,6mm, 200mm de comprimento e 100mm de largura utilizada para deposição de cordões de solda, pelo processo SMAW.....	24
Figura 4.2. Dispositivo de soldagem por gravidade.....	25
Figura 4.3. Representação esquemática das medidas utilizadas para identificação dos aspectos geométricos dos cordões de solda produzidos.....	26
Figura 5.1. Cordões de solda com o eletrodo E6013 nas polaridades CC ⁺ e CC ⁻	28
Figura 5.2. Cordões de solda com o eletrodo E7018 nas polaridades CC ⁺ e CC ⁻	28
Figura 5.3. Cordão de solda com o eletrodo E6013 – em CA.....	28
Figura 5.4. Macrografias de cordões de solda depositados sobre aço baixo carbono com eletrodos E6013 realizados com o processo de soldagem por gravidade. a) CC ⁺ , b) CC ⁻ , c) CA. Aumento de 12x.....	29
Figura 5.5. Macrografias de cordões de solda depositados sobre aço baixo carbono com eletrodos E7018 realizados com o processo de soldagem por gravidade. a) CC ⁺ , b) CC ⁻ . Aumento de 12x.....	29
Figura 5.6. Microestrutura do metal base de um aço baixo carbono. a) 50x, b) 100x, c) 200x. Nital 2%.....	31
Figura 5.7. Junta soldada em aço baixo carbono com eletrodo E6013 - Amostra 01(Figura 5.1) (CC ⁺). a) MB e ZTA – 50x, b) ZTA e ZF – 50x. Reativo: Nital 2%.....	31
Figura 5.8. Junta soldada em aço baixo carbono com eletrodo E6013 - Amostra 01(Figura 5.1) (CC ⁺). a) ZF - 100x, b) ZF - 200x. Nital 2%.....	32
Figura 5.9. Junta soldada em aço baixo carbono com eletrodo E6013 - Amostra 02 (Figura 5.1) (CC ⁻). a) ZTA e ZF – 50x, b) ZF -100x. Reativo: Nital 2%.....	32
Figura 5.10. Junta soldada em aço baixo carbono com eletrodo E6013 - Amostra 02 (Figura 5.1) (CC ⁻). ZF – 200x. Reativo: Nital 2%.....	33
Figura 5.11. Junta soldada em aço baixo carbono com eletrodo E7018 - Amostra 03 (Figura 5.2) (CC ⁺). a) ZTA e ZF – 50x, b) ZF -100x. Reativo: Nital 2%.....	33
Figura 5.12. Junta soldada em aço baixo carbono com eletrodo E7018 - Amostra 03 (Figura 5.2) (CC ⁺). ZF – 200x. Reativo: Nital 2%.....	34
Figura 5.13. Junta soldada em aço baixo carbono com eletrodo E7018 - Amostra 04 (Figura 5.2) (CC ⁻). a) ZTA e ZF – 50x, b) ZF -100x. Reativo: Nital 2%.....	34

Figura 5.14. Junta soldada em aço baixo carbono com eletrodo E7018 – Amostra 04 (Figura 5.2) (CC). ZF – 200x. Reativo: Nital 2%	35
Figura 5.15. Junta soldada em aço baixo carbono com eletrodo E6013 - Amostra 05(Figura 5.3) (CA). a) ZTA e ZF – 50x, b) ZF -100x. Reativo: Nital 2%	35
Figura 5.16. Junta soldada em aço baixo carbono com eletrodo E6013 - Amostra 05(Figura 5.3) (CA). ZF – 200x. Reativo: Nital 2%	36
Figura 5.17. Visão geral das fases e dos constituintes dos cordões de soldas de um aço baixo carbono soldado pelo processo SMAW; 200x. Reativo: Nital 2%. FW- Ferrita de Widmanstätten ou placas laterais de ferrita, GF - Ferrita de contorno de grão, FA - Ferrita acicular.....	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1. Classificação de eletrodos revestidos.	14
Tabela 3.2. Recomendações de parâmetros de soldagem para eletrodos revestidos.	16
Tabela 3.3. Largura dos cordões de solda a partir das combinações de eletrodos e polaridade utilizada em soldagem com corrente contínua.	19
Tabela 3.4. Altura dos cordões de solda a partir das combinações de eletrodos e polaridade utilizada em soldagem com corrente contínua.	20
Tabela 3.5. Fases e constituintes microestruturais de um cordão de solda.	21
Tabela 5.1. Velocidade média de deposição de cordões com eletrodos de 3,25mm de diâmetro.	27
Tabela 5.2. Aspectos geométricos dos cordões de solda.	30

LISTA DE SÍMBOLOS

θ - Ângulo em radiano

I – Corrente (A)

A_f - Área fundida

J – Joule

L - Comprimento da face

mm – Distância do cordão

P – Penetração do cordão de solda

s – Tempo

v – Velocidade média

V – Tensão do arco elétrico

LISTA DE SIGLAS

AWS - *American Welding Society*

CA – Corrente alternada

CC – Corrente contínua

CCEN ou CC⁻ – Corrente contínua eletrodo negativo ou polaridade direta

CCEP ou CC⁺ – Corrente contínua eletrodo positivo ou polaridade inversa

FA - Ferrita Acicular

FW – Ferrita de Widmanstätten

GF – Ferrita de contorno de Grão

SMAW - *Shielded Metal Arc Welding*

ZF – Zona de Fusão

ZTA – Zona Termicamente Afetada

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
2	OBJETIVOS.....	12
2.1	Objetivo Geral.....	12
2.2	Objetivos Específicos	12
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
3.1	Soldagem por Eletrodos Revestidos (SMAW).....	13
3.2	Efeitos do tipo de corrente e polaridade na soldagem	16
3.2.1	Efeitos na geometria	16
3.2.2	Efeitos na microestrutura	20
4	MATERIAIS E MÉTODOS	24
4.1	Materiais	24
4.2	Métodos.....	24
4.2.1	Deposição de cordões.....	24
4.2.2	Caracterização microestrutural	26
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	27
5.1	Deposição de cordões	27
5.2	Efeitos na Geometria do Cordão de Solda.....	29
5.3	Efeitos na Microestrutura	31
6	CONCLUSÕES.....	38
	REFERÊNCIAS	39

1 INTRODUÇÃO

A soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido (*Shielded Metal Arc Welding – SMAW*), também conhecida como soldagem manual a arco elétrico, mesmo não proporcionando alta produtividade, é amplamente utilizada nas aplicações industriais devido a sua grande versatilidade e facilidade de processo, além de ser um equipamento de baixo custo. Esta soldagem é um processo no qual a coalescência dos metais é obtida pelo aquecimento destes com um arco estabelecido entre um eletrodo revestido e a peça de trabalho (MODENESI, MARQUES, SANTOS, 2012).

As diversas variáveis de uma operação de soldagem podem afetar o fluxo de calor na peça e, portanto, os ciclos térmicos associados, podendo ocorrer mudanças microestruturais, em relação ao material original, ao longo de sua seção transversal. (MODENESI, MARQUES, SANTOS, 2012).

De acordo com Braz (2016), “a integridade de uma junta soldada é diretamente ligada à simetria do cordão de solda depositado assim como a homogeneidade das fases presentes”. Portanto, é extremamente importante escolher corretamente o tipo de revestimento que será utilizado e identificar a influência dos parâmetros que serão abordados nesse estudo, pois a partir do processo de soldagem com eletrodos revestidos é possível aproximar de forma razoável as propriedades mecânicas e metalúrgicas do cordão de solda.

Nesse trabalho, foi utilizado um dispositivo de soldagem por gravidade para deposição de cordões com eletrodos AWS E6013 e AWS E7018 com o objetivo de verificar a influência das variações do tipo de corrente e polaridade na geometria e na microestrutura do cordão de solda e compará-las com as informações obtidas na literatura.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O principal objetivo deste trabalho foi analisar os efeitos da corrente e polaridade utilizada no processo de soldagem por eletrodos revestidos sobre a geometria e microestrutura de cordões de solda em aço baixo carbono.

2.2 Objetivos Específicos

- Obter cordões de solda com eletrodos revestidos do tipo rutílico e básico em dispositivo de soldagem por gravidade e com controle dos principais parâmetros: corrente, tensão, velocidade de soldagem e comprimento de arco;
- Determinar os efeitos da polaridade e tipo de corrente de soldagem sobre os parâmetros geométricos de cordões;
- Identificar, a microestrutura dos cordões de solda resultantes das alterações dos parâmetros do processo.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção será apresentada a parte teórica, sucinta, a qual será utilizada para o desenvolvimento do trabalho.

3.1 Soldagem por Eletrodos Revestidos (SMAW)

Segundo Fortes e Vaz (2005, p.5), o processo de soldagem SMAW é realizado da seguinte forma:

O calor de um arco elétrico mantido entre a extremidade de um eletrodo metálico revestido e a peça de trabalho, produzido pelo arco funde o metal de base, a alma do eletrodo e o revestimento. Quando as gotas de metal fundido são transferidas através do arco para a poça de fusão, são protegidas da atmosfera pelos gases produzidos durante a decomposição do revestimento. A escória líquida flutua em direção à superfície da poça de fusão representada na Figura 3.1, onde protege o metal de solda da atmosfera durante a solidificação.

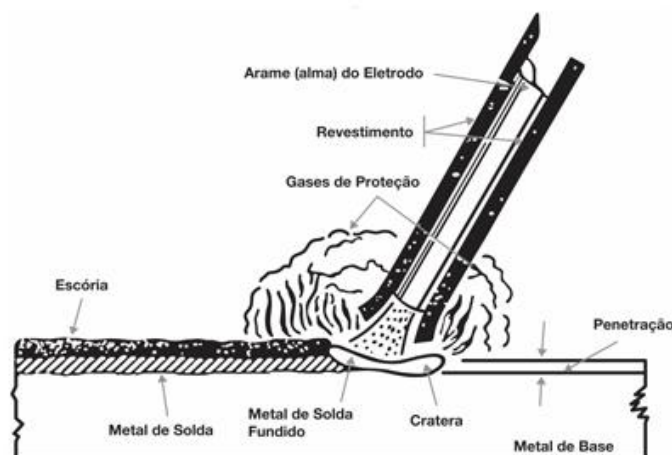


Figura 3.1. Representação da poça de fusão em um processo de soldagem SMAW. (FORTES e VAZ, 2005)

De acordo com Marques, Modenesi e Bracarense (2011), o arco elétrico possui propriedades mais adequadas para o processo de fusão de metais no processo de soldagem por eletrodo revestido, pois apresenta uma fonte de calor com concentração de energia, além de possuir baixo custo relativo do equipamento. A fonte para soldagem com eletrodo revestido é com corrente constante, pois ao variar o comprimento de arco a corrente praticamente não altera.

Na soldagem com eletrodos revestidos existem vários parâmetros operacionais que influenciam no resultado da solda, são eles: tipo e diâmetro do eletrodo; polaridade e valor da corrente; velocidade de soldagem; tensão; posição de soldagem, penetração e a sequência de deposição de soldagem (MARQUES, MODENESI E BRACARENSE, 2011). Segundo Wainer, Brandi e

Mello (2008), a tensão do arco não é controlável, pois o controle da distância entre o eletrodo e a peça é realizada manualmente e não possui grande precisão, a transferência dos glóbulos do arco está associada as variações no comprimento do arco e à medida que a corrente de soldagem é aumentada, maior tensão é necessária para a operação.

A soldagem por eletrodo revestido é utilizada em grande escala e em diferentes tipos de materiais, portanto é necessário que os revestimentos dos eletrodos atendam às exigências para cada tipo de aplicação, podendo ser: rutílico, básico e celulósico que influenciarão nas propriedades da junta soldada. Segundo Guedes (2009), o eletrodo é condutor e é formado pelo núcleo metálico, chamado alma, que conduz a corrente e fornece a adição de materiais para a fusão com comprimento em torno de 250mm a 500mm. A camada que é utilizada para revestir o eletrodo que pode variar entre 2mm a 8mm de espessura dependendo do fabricante e possui as seguintes funções: estabilizar o arco elétrico, proteger a poça de fusão contra contaminação atmosférica, adição de elementos de liga, eliminação das impurezas para ajustar a composição química do cordão de solda e conceder características operacionais (COELHO, 2019). A escória tem a função de proteger o cordão de solda contra a contaminação atmosférica, além de reduzir a velocidade de resfriamento.

A especificação de eletrodos revestidos para aços carbono é estabelecida pela Norma *American Welding Society* (AWS) A5.1, apresentada na Tabela 3.1 e Figura 3.2, sendo classificado como consumíveis pelos fabricantes, com base nas propriedades mecânicas/físicas do metal de solda, no tipo de revestimento, na posição de soldagem, e no tipo de corrente (CA ou CC) (FORTES e VAZ, 2005).

Tabela 3.1. Classificação de eletrodos revestidos.

Classe	Corrente	Arco	Penetração	Revestimento - escória	Pó de ferro
EXX10	CC+	agressivo	profunda	celulósico - sódio	0 - 10%
EXX11	CA/CC+	agressivo	profunda	celulósico - potássio	0
EXX12	CA/CC-	médio	média	rutílico - sódio	0 - 10%
EXX13	CA/CC-/CC+	suave	leve	rutílico - potássio	0 - 10%
EXX14	CA/CC-/CC+	suave	leve	rutílico - pó de ferro	25 - 40%
EXX15	CC+	médio	média	baixo hidrogênio - sódio	0
EXX16	CA/CC+	médio	média	baixo hidrogênio - potássio	0
EXX18	CA/CC+	médio	média	baixo hidrogênio - pó de ferro	25 - 40%
EXX20	CA/CC-	médio	média	óxido de ferro - sódio	0
EXX22	CA/CC-/CC+	médio	média	óxido de ferro - sódio	0
EXX24	CA/CC-/CC+	suave	leve	rutílico - pó de ferro	50%
EXX27	CA/CC-/CC+	médio	média	óxido de ferro - pó de ferro	50%
EXX28	CA/CC+	médio	média	baixo hidrogênio - pó de ferro	50%
EXX48	CA/CC+	médio	média	baixo hidrogênio - pó de ferro	25 - 40%

O percentual de pó de ferro é baseado na massa do revestimento

(FORTES e VAZ, 2005)

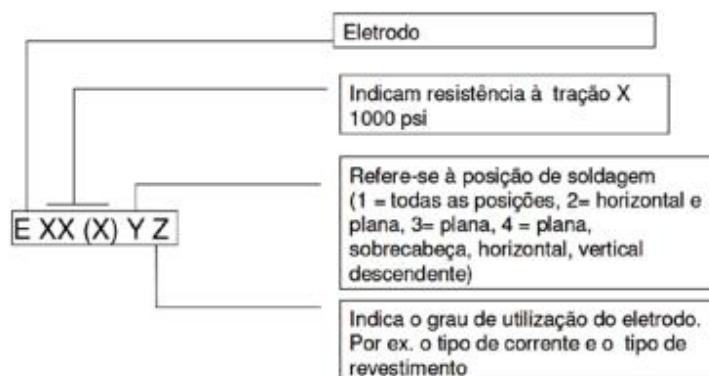


Figura 3.2. Classificação de eletrodos revestidos. Norma AWS A5.1.

(FORTES e VAZ, 2005)

De acordo com Fortes e Vaz (2005), a escolha do eletrodo dependerá do tipo de equipamento disponível, sendo importante considerar os seguintes fatores para equipamentos de corrente contínua e corrente alternada: com o objetivo de atingir uma penetração mais profunda utilizar corrente contínua polaridade inversa (CC^+), no entanto, para obter uma penetração menos profunda utilizar corrente contínua polaridade direta (CC^-). No intuito de evitar problemas com sopro magnético¹, recomenda-se realizar a soldagem com CA ou mudar o posicionamento do neutro na peça, sendo melhor para a soldagem com eletrodos e correntes maiores (CAMARGOS, 2019).

Revestimentos de diferentes tipos podem conter adições de pó de ferro. Durante a soldagem, este é fundido e incorporado à poça de fusão, causando um melhor aproveitamento da energia do arco e uma maior estabilização deste, para um limite de adição de até 50% em peso do revestimento (MARQUES, MODENESI E BRACARENSE, 2011). Segundo Coelho (2019), o pó de ferro possibilita um aumento na corrente para um dado diâmetro do eletrodo, pois eleva a resistência ao calor do revestimento e a taxa de deposição de eletrodos com pó de ferro. No entanto, é restrito para a posição de fusão plana devido à dificuldade de controlá-la.

Segundo Braz (2016), a soldagem por gravidade é realizada na posição plana, sendo composta por um eletrodo preso a um mecanismo móvel, que desliza sobre a barra guia inclinada. Além

¹ Sopro magnético: resulta de uma distribuição assimétrica do campo magnético em torno do arco, levando a uma maior concentração do campo magnético em um dos lados do arco. (MODENESI, 2012).

disso, é um equipamento de baixo custo e que reduz a necessidade de mão de obra especializada (BRAZ, 2016 apud DAVIS e FERJUTZ, 1993). Uma vez que a soldagem ocorre de forma mecanizada, os parâmetros do processo (tensão, comprimento de arco e velocidade de soldagem) se mantêm constantes.

3.2 Efeitos do tipo de corrente e polaridade na soldagem

3.2.1 Efeitos na geometria

Segundo Coelho (2019), a faixa de corrente elétrica utilizável para determinado eletrodo depende principalmente de seu diâmetro e do material da alma, do tipo e espessura do revestimento e da posição de soldagem. O efeito da geometria e da microestrutura no cordão de solda serão determinados pelos parâmetros de corrente e polaridade utilizados.

O fluxo de corrente é fundamental para fornecer aporte térmico necessário para a homogeneidade do processo, além da energia necessária para a formação da poça de fusão (GUEDES, 2009). Segundo Camargos (2019, p.18), “a intensidade da corrente utilizada durante a soldagem depende fundamentalmente do diâmetro e tipo do eletrodo revestido”.

De acordo com Fortes e Vaz (2005), os eletrodos com revestimento rutílico possuem baixa penetração, e com manipulação adequada podem ser fechadas grandes aberturas de raiz. Contudo, mesmo a especificação permitindo a soldagem com corrente alternada (CA) ou corrente contínua (CC), o arco é mais suave e a quantidade de respingos é menor quando é utilizada corrente contínua.

Segundo Camargos (2019), os eletrodos com revestimento básico apresentam o cordão de solda de baixa penetração e de perfil plano ou convexo, além de possuir boas propriedades, especialmente em relação à tenacidade. De acordo com Farias (1993), a soldagem com este tipo de revestimento em corrente contínua apresenta grandes diferenças de acordo com o tipo de polaridade, não sendo recomendada a soldagem em corrente alternada por não apresentar boa soldabilidade, além de necessitar de cuidados especiais por ser altamente higroscópico.

A Tabela 3.2 apresenta os parâmetros de soldagem para os diversos tipos de eletrodos revestidos para a soldagem de aços carbono e suas respectivas taxas e eficiências de deposição (FORTES e VAZ, 2005).

Tabela 3.2. Recomendações de parâmetros de soldagem para eletrodos revestidos.

Eletrodo	AWS	Diâmetro (mm)	Corrente (A)	Valor ótimo (A)	Taxa de Deposição (kg/h)	Eficiência de Deposição (%)
OK 22.45P OK 22.50	E6010	2,5	60 - 80	75	0,7	72
		3,2	80 - 140	100 / 130	0,9 / 1,0	76 / 69
		4,0	90 - 180	140 / 170	1,3 / 1,3	74 / 64
		5,0	120 - 250	160 / 190	1,5 / 1,6	75 / 70
OK 22.65P	E6011	2,5	40 - 75	75	0,6	61
		3,2	60 - 125	120	1	71
		4,0	80 - 180	150	1,7	77
		5,0	120 - 230	180	1,9	73
OK 46.00 OK 46.13 OK 43.32	E6013	2,0	50 - 70	50	0,6	73
		2,5	60 - 100	85	0,7	73
		3,2	80 - 150	125	1	73
		4,0	105 - 205	140 / 160 / 180	1,2 / 1,4 / 1,6	76 / 74 / 71
		5,0	155 - 300	180 / 200 / 220	1,5 / 1,7 / 1,9	74 / 71 / 73
OK 33.80	E7024	3,2	130 - 170	140 / 180	1,9 / 2,3	72 / 71
		4,0	140 - 230	180 / 210 / 240	2,4 / 2,9 / 3,3	71 / 73 / 69
		5,0	210 - 350	245 / 270 / 290	3,4 / 3,8 / 4,1	69 / 71 / 68
		6,0	270 - 430	320 / 360	4,3 / 5,3	72 / 69
OK 48.04	E7018	2,5	65 - 105	90	0,8	66
OK 48.06	E7018	3,2	100 - 150	120 / 140	1,2 / 1,2	72 / 71
OK 48.07	E7018-1	4,0	130 - 200	140 / 170	1,4 / 1,7	75 / 74
OK 55.00	E7018-1	5,0	185 - 270	200 / 250	2,2 / 2,4	76 / 75

(FORTES e VAZ, 2005)

Os parâmetros de soldagem afetam de forma distinta a intensidade do arco e o rendimento térmico do processo, pois nem sempre existe uma relação direta entre a energia de soldagem e seus efeitos na peça, resultando em geometria de soldas de formatos diferentes devido a variação individual dos parâmetros do processo, apresentado na Figura 3.3. (MODENESI, MARQUES, SANTOS, 2012). Condições de soldagem: (a) 800A, 26V e 12mm/s e (b) 125A, 26V e 1,7mm/s.

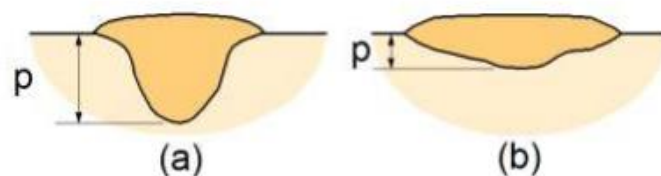


Figura 3.3. Representação esquemática do efeito de alterações nos parâmetros de soldagem na geometria de cordões de solda depositados com uma energia de soldagem de aproximadamente 1,8kJ/mm. P = penetração do cordão de solda. a) CC⁺. b) CC⁻. (MODENESI, MARQUES, SANTOS, 2012)

A geometria do cordão de solda influencia de forma significativa na resistência mecânica de uma junta soldada, principalmente no limite de resistência à fadiga. As características principais que dão o aspecto ao cordão de solda são a sua largura, a sua diluição², penetração e convexidade do cordão (LEONELLO FILHO, 2005 apud FARIAS e DUTRA, 1993). Um dos parâmetros é o aumento da largura ao utilizar corrente contínua, no entanto diminui a largura ao atingir um valor crítico. Em relação a utilização da corrente alternada observa-se pouco efeito da corrente sobre a largura da solda.

Segundo Silva (2017), a polaridade e a corrente influenciam a forma e a dimensão da poça de fusão, além de afetar o tipo de transferência e a estabilidade do arco elétrico. No geral, a polaridade inversa – eletrodo no positivo e a peça no negativo (CCEP) possibilita maior penetração e uma menor altura do reforço, no entanto, a polaridade direta – eletrodo no negativo e a peça no positivo (CCEN) permite maior taxa de fusão. A soldagem com corrente alternada (CA) possibilita uma penetração e taxa de fusão intermediárias, mas a estabilidade do processo pode ser inferior, apresentados na Figura 3.4 (CARRARO, 2017).

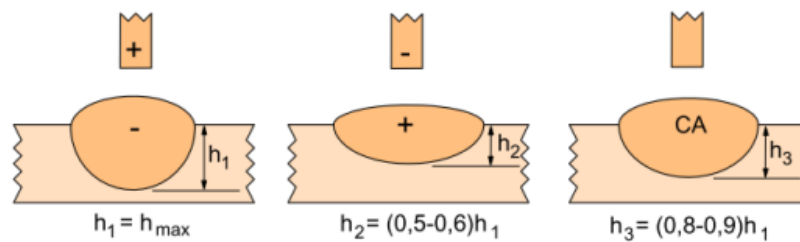


Figura 3.4. Influência do tipo de corrente e polaridade na penetração de um cordão de solda. a) CC⁺; b) CC⁻; c) CA. H = altura da penetração do cordão. (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2011)

Alguns fatores podem influenciar a falta de penetração na junta soldada, como sendo: um baixo aporte térmico, sendo necessário aumentar a corrente elétrica, uma técnica de soldagem incorreta e uma junta inadequada, causando uma fusão ineficiente entre o metal de solda e metal base. A Figura 3.5 ilustra a relação entre o efeito da polaridade e o tipo de revestimento sobre a penetração e sobre a área fundida (CARRARO, 2017).

² Diluição: é a proporção com que o metal base participa da zona fundida (Modenesi, Marques e Santos, 2012).

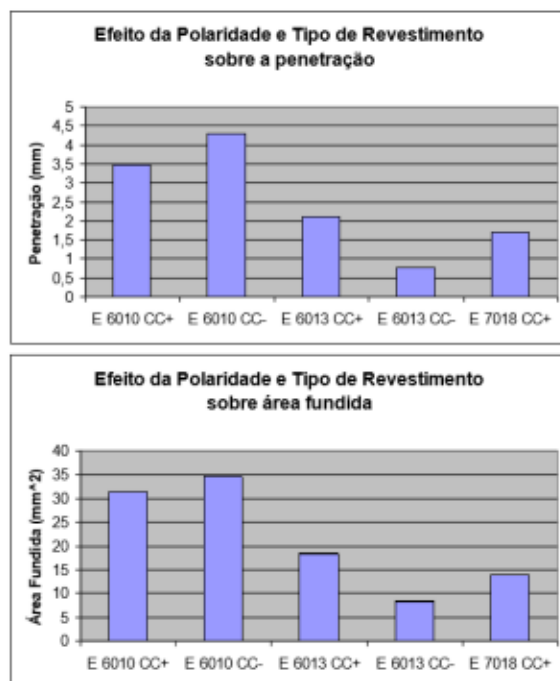


Figura 3.5. Efeito da polaridade e tipo de revestimento sobre a penetração de uma solda. (CARRARO, 2017 apud PONOMAROV, 2014).

Conforme Camargos (2019, p.21), “a penetração da solda será maior, quanto maior for a concentração, intensidade de energia e, também, quanto maior for a escavação do arco elétrico”.

Segundo Dias (2014), após realizar seus experimentos alternando as polaridades no eletrodo, observou-se que os cordões feitos com os dois eletrodos (E6013 e E7018) apresentaram uma largura superior quando realizado com corrente contínua polaridade positiva (CC⁺) do que os obtidos com polaridade negativa (CC⁻) apresentados na Tabela 3.3 (DIAS, 2014).

Tabela 3.3. Largura dos cordões de solda a partir das combinações de eletrodos e polaridade utilizada em soldagem com corrente contínua.

Eletródo Utilizado	Polaridade do eletrodo	Maior Largura do cordão
E6013 Ø 3,25 mm	Positiva	X
	Negativa	
E7018 Ø 3,25 mm	Positiva	X
	Negativa	

(Adaptado de DIAS, 2014)

De acordo com Camargos (2019), alguns parâmetros determinam a forma do reforço como largura da poça de fusão, volume do metal depositado, entre outros. A altura do reforço obtido pelo eletrodo E6013 de 3,25mm de diâmetro é superior com polaridade positiva e o E7018 é superior quando feita na polaridade negativa apresentado na Tabela 3.4 (DIAS, 2014).

Tabela 3.4. Altura dos cordões de solda a partir das combinações de eletrodos e polaridade utilizada em soldagem com corrente contínua.

Eletrodo Utilizado	Polaridade do eletrodo	Maior Reforço do cordão
E6013 Ø 3,25 mm	Positiva	X
	Negativa	
E7018 Ø 3,25 mm	Positiva	
	Negativa	X

(Adaptado de DIAS, 2014)

3.2.2 Efeitos na microestrutura

A junta soldada é o resultado do processo que ocorre após a fusão e solidificação da mistura metálica na poça de fusão (zona fundida) durante o consumo do eletrodo. De acordo com Silva (2017) e Guedes (2009), as áreas ao redor do cordão de solda são afetadas pelas variações de temperatura que causam mudanças na estrutura do material próximo a soldagem. Além da fusão e solidificação do cordão de solda, variações dimensionais e alterações microestruturais localizadas que podem resultar em efeitos indesejáveis, tais como: tensões residuais e distorção; alterações de propriedades mecânicas; formação de trincas e alteração de propriedades físicas, químicas (MODENESI, MARQUES, SANTOS, 2012).

A escolha de consumíveis corretamente é de suma importância, pois ao elevar a temperatura, inicia-se a deposição de material e isso afetará na composição da junta soldada apresentada na Figura 3.6. Segundo Modenesi, Marques e Santos (2012), o metal base (MB) é a região que não sofre influência com o calor gerado, por ser a região mais afastada da solda, Zona Termicamente Afetada (ZTA), é a região não ocorre fusão do metal base, mas cuja microestrutura e/ou propriedades foram alteradas pelo ciclo térmico de soldagem e a Zona Fundida (ZF) região onde ocorre o processo de fusão do material de solda depositado e é caracterizado por temperaturas de pico superiores à sua temperatura de fusão.

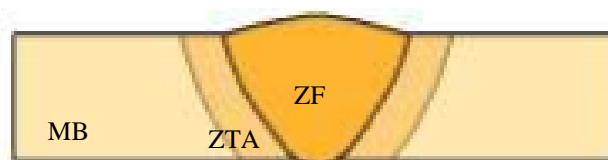


Figura 3.6. Representação esquemática das regiões da junta soldada. MB = metal base; ZTA = Zona termicamente afetada; ZF = Zona Fundida.

(Adaptado de MODENESI, MARQUES E SANTOS, 2012)

De acordo com Silva (2017, p.21 apud Lippold, 2015), “a microestrutura na zona fundida é função da composição química e das condições de solidificação”. Para se obter uma

microestrutura mais refinada, é necessário submeter a junta soldada a elevadas taxas de resfriamento que resultarão em um processo de solidificação mais rápido (PHILLIPS, 2016).

Segundo Modenesi (2012), devido ao aumento de volume associado com a decomposição da austenita que tende a ocorrer, nas regiões centrais da peça e com transformações de fase do material podem ser, também, responsáveis pelo aparecimento de tensões residuais e distorções.

O aporte térmico, a composição química da junta e as condições de soldagem influenciam o histórico térmico da ZTA adjacente à zona fundida, afetando no tamanho e na microestrutura da região (LIPPOLD, 2015).

De acordo com Guedes (2009), a microestrutura formada com a solda apresentada na Tabela 3.5 dependerá dos fatores como composição química, ciclagem térmica, tipo e quantidade de inclusões não metálicas. A partir dessa microestrutura é possível determinar as propriedades mecânicas do cordão de solda.

Tabela 3.5. Fases e constituintes microestruturais de um cordão de solda.

Constituintes		Código
Ferrita Primária	Ferrita de Contorno de Grão	PF (G)
	Ferrita Poligonal Intragranular	PF (I)
Ferrita Acicular		AF
Ferrita com Segunda Fase Alinhada		FS(A)
Ferrita com Segunda Fase Não Alinhada		FS(NA)
Agregado de Ferrita-Carboneto		FC
Martensita		M

(GUEDES, 2009 apud FEDELE, 2002)

A ZTA gera uma região de grãos mais grosseiros e outras regiões devidas as variações de temperatura (aquecimentos e resfriamentos) procedentes do aporte térmico ilustrado na Figura 3.7 (GUEDES, 2009).

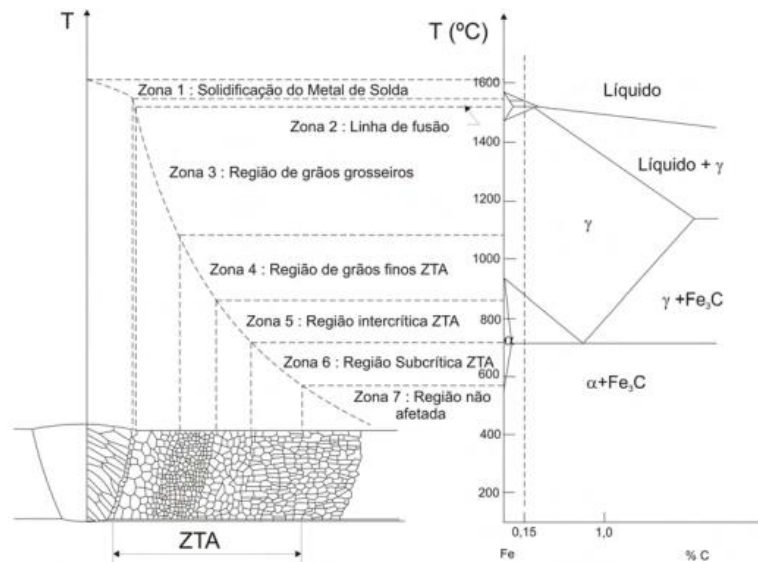


Figura 3.7. Representação de uma ZTA.
(GUEDES, 2009 apud ALE; JORGE; REBELLO, 1993)

De acordo com Aloraier *et al.* (2014), microestruturas semelhantes na zona de fusão (ZF) da solda foram encontradas para todas as polaridades de soldagem. A Figura 3.8 apresenta a variação da microestrutura ao longo da solda ao se utilizar corrente contínua com polaridade positiva.

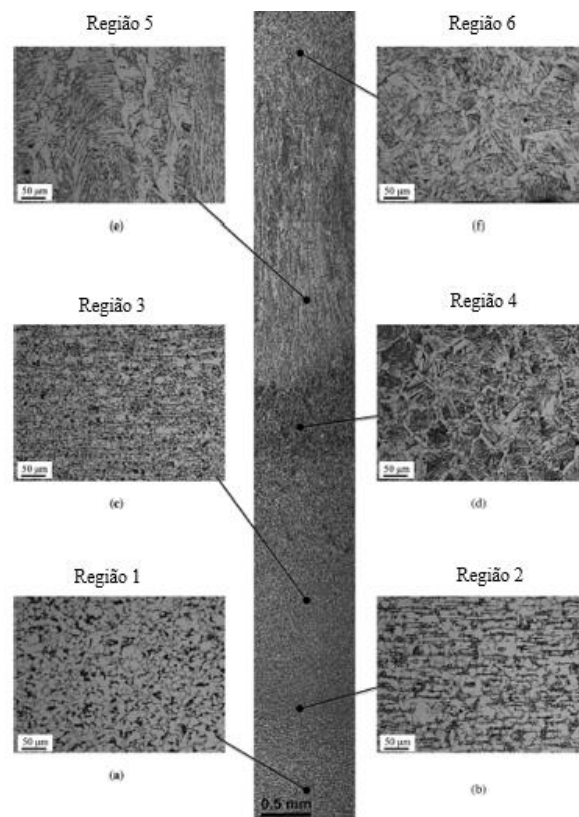


Figura 3.8. Microestrutura de uma junta soldada em diferentes regiões com CC⁺ de um aço baixo carbono.

(ALORAIER *et al.*, 2014)

A região 1 representa o metal base que não é afetada pelo aporte térmico, devido a distância do MB até a ZF, mantendo a microestrutura original de um aço baixo carbono formada por grãos ferríticos e perlíticos. Na região 2, a microestrutura é um pouco afetada pelo aquecimento na região intercrítica (RI). A região 3, região da ZTA, o material foi aquecido acima de A_3 , formando austenita de grão fino que reverteu rapidamente para ferrita. Na região 4, apresenta a microestrutura da ZTA próxima a ZF, onde possui grãos grosseiros que consistem em ferrita nos contornos de grão (GF) e perlita grosseira no interior. A microestrutura da ZF consiste principalmente em ferrita acicular, ferrita primária de contorno de grão (alotriomórfica) e ferrita de Widmanstätten (ALORAIER *et al.*, 2014).

Segundo Aloraier *et al.* (2014), a maior tensão residual de tração na ZTA ocorre para corrente contínua com polaridade negativa, enquanto tem o menor valor para corrente alternada.

Para uma liga de aço de chapas finas com baixo teor de carbono, a ZTA seria principalmente perlítica com alguma ferrita proeutetóide e que é raro ocorrer a formação da estrutura martensítica (ALORAIER *et al.*, 2014 apud SAMUELS, 1980).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

A seguir serão apresentados os materiais utilizados para deposição dos cordões de solda e os métodos utilizados para analisá-los.

4.1 Materiais

Foram utilizadas três chapas de aço baixo carbono com aproximadamente 4,6mm de espessura, 200mm de comprimento e 100mm de largura, sendo uma apresentada na Figura 4.1. Utilizou-se também dois tipos de eletrodos, sendo um com revestimento rutílico AWS E6013 e outro com revestimento básico AWS E7018 ambos com diâmetro de 3,25mm para a deposição de cordões de solda sobre o material. As especificações dos eletrodos podem ser observadas na Tabela 3.1.



Figura 4.1. Chapa de aço de baixo carbono parcialmente lixada com espessura de 4,6mm, 200mm de comprimento e 100mm de largura utilizada para deposição de cordões de solda, pelo processo SMAW.

4.2 Métodos

4.2.1 Deposição de cordões

O equipamento de soldagem por gravidade (Figura 4.2) é um equipamento que procura garantir a repetibilidade do processo de soldagem por eletrodos revestidos, especialmente o comprimento de arco elétrico e a velocidade de soldagem.



Figura 4.2. Dispositivo de soldagem por gravidade.

Os valores da corrente foram escolhidos de acordo com as especificações dos eletrodos, sendo utilizado aproximadamente 130A para ambos os eletrodos com diâmetro de 3,25mm. Após a escolha da corrente, que foi medida com um amperímetro, foram realizados ensaios preliminares para determinar o melhor método de soldagem, nos quais os eletrodos foram inicialmente consumidos em até 50% devido a uma questão de estabilidade e para que a soldagem ocorresse de forma mais constante devido à menor flexão que ocorre com o eletrodo mais curto.

Inicialmente, foi realizada a deposição dos cordões de solda com o eletrodo E6013 com CC^+ , CC^- e CA. Posteriormente, o mesmo procedimento foi realizado com a utilização do eletrodo E7018 com CC^+ e CC^- . No entanto, não foi possível realizar a soldagem com E7018 em CA, pois não conseguimos realizar a abertura do arco elétrico, além disso, não foi possível utilizar uma única fonte para todas as variações de corrente e polaridade propostas, uma vez que a fonte retificadora do Laboratório de Soldagem do DEMET/EM/UFOP não possui corrente alternada como opção de saída.

Conforme realizado por Braz (2016), a velocidade média de soldagem foi calculada a partir do comprimento do cordão, obtido após a soldagem para cada amostra. O cronometro foi ligado, após a abertura manual do arco elétrico e se manteve até o consumo total do eletrodo.

Após análise visual, foram determinadas as regiões para corte de cada amostra, as quais passaram pelos procedimentos necessários para preparação das amostras e posteriormente, foram realizadas as análises microestruturais e geométricas dos cordões de solda.

4.2.2 Caracterização microestrutural

Amostras de seção transversal dos cordões de solda foram embutidas em resina e passaram por preparação metalográfica tradicionalmente aplicada em aços.

Imagens com pequenos aumentos de 10x e 12x foram obtidas por meio de estereomicroscópio óptico, macrografias, de modo a comparar os efeitos da corrente e polaridade sobre os aspectos geométricos dos cordões: comprimento da face (L), penetração do cordão (P), área fundida (A_f) e ângulo (θ) representados esquematicamente na Figura 4.3. Para obtenção dos parâmetros, o processamento de imagens foi realizado com o auxílio do *software* ImageJ.

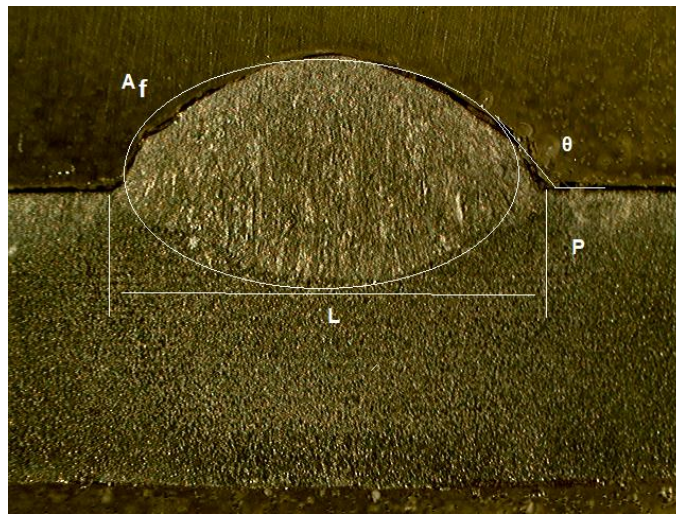


Figura 4.3. Representação esquemática das medidas utilizadas para identificação dos aspectos geométricos dos cordões de solda produzidos.

Posteriormente, as amostras foram preparadas para micrografias, sendo realizadas as seguintes etapas de preparação metalográfica após o corte da seção desejada: foi feito o embutimento com resina, lixamento e polimento, ataque da superfície polida com reativo químico (Nital 2%) e posteriormente foi realizada a interpretação dos resultados com o auxílio do microscópio de todas as amostras de modo a identificar as fases e os constituintes presentes no metal de solda.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Deposição de cordões

Após a deposição dos cordões, foi realizado o cálculo da velocidade média de soldagem e do aporte de energia de soldagem para cada amostra, apresentados na Tabela 5.1. A tensão utilizada foi de 25V para todas as amostras.

Tabela 5.1. Velocidade média de deposição de cordões com eletrodos de 3,25mm de diâmetro.

	Distância (mm)	Tempo (s)	Velocidade Média (mm/s)	Corrente (A)	Aporte de energia* (J/mm)
Amostra 1 - 6013 CC⁺	123	33	3,7	125	845
Amostra 2 - 6013 CC⁻	128	38	3,4	135	993
Amostra 3 - 7018 CC⁺	125	42	3,0	128	1067
Amostra 4 - 7018 CC⁻	128	42	3,0	130	1084
Amostra 5 - 6013 CA	124	29	4,3	132	768

*Aporte de energia: cálculo do aporte térmico sem levar em consideração a eficiência de transferência.

De acordo com os resultados, observa-se que a velocidade média de soldagem com eletrodo E6013 foi maior na soldagem com corrente alternada do que as realizadas com corrente contínua em ambas polaridades. No entanto, para a soldagem com eletrodo E7018 não houve variação significativa da velocidade de soldagem, independente da polaridade utilizada.

Destaca-se também, na Tabela 5.1, que os valores de corrente elétrica obtidos em todas as condições foram relativamente muito próximos ao visado (130A). Ao se comparar a velocidade de soldagem, para uma mesma corrente, entre os eletrodos de revestimento rutílico e básico com 3,25mm de diâmetro, observa-se que o revestimento básico resultou em menores valores médios de velocidade. Este fato pode ser justificado pelo maior volume de revestimento presente nos eletrodos básicos, que inclui a presença de pó de ferro.

A comparação entre as condições de soldagem dos eletrodos AWS E6013 em corrente contínua (CC⁺ e CC⁻) e corrente alternada (Amostras 1, 2 e 5), do ponto de vista de velocidade de soldagem, deve ser feito com cuidado, pois as deposições foram realizadas em fontes diferentes. Portanto, não se pode comparar diretamente as velocidades obtidas em função da mudança de corrente contínua para corrente alternada.

A partir dos ensaios realizados, foram obtidos os seguintes cordões de solda para os eletrodos E6013 com CC^+ (Amostra 1), CC^- (Amostra 2) apresentados na Figura 5.1, para os eletrodos E7018 com CC^+ (Amostra 3) e CC^- (Amostra 4) apresentados na Figura 5.2 e para o eletrodo E6013 com corrente alternada (Amostra 5) apresentado na Figura 5.3.



Figura 5.1. Cordões de solda com o eletrodo E6013 nas polaridades CC^+ e CC^- .



Figura 5.2. Cordões de solda com o eletrodo E7018 nas polaridades CC^+ e CC^- .



Figura 5.3. Cordão de solda com o eletrodo E6013 – em CA.

Porcaro (2021) também cita que em relação à deposição dos cordões de solda, foi possível observar que a soldagem com revestimento básico E7018 gerou maior quantidade de respingos e maior dificuldade para retirar a escória quando comparado aos cordões de solda realizados com revestimento rutílico E6013 que devido a composição do revestimento reduz a viscosidade

da escória e seu intervalo de solidificação, tornando-a fácil de destacar, além de baixa quantidade de respingos também fornece uma solda com um bom aspecto superficial.

5.2 Efeitos na Geometria do Cordão de Solda

Após a execução da preparação metalográfica dos cinco cordões de solda foi possível obter as macrografias de cada cordão com o auxílio do estereomicroscópio óptico apresentadas nas Figuras 5.4 e 5.5.

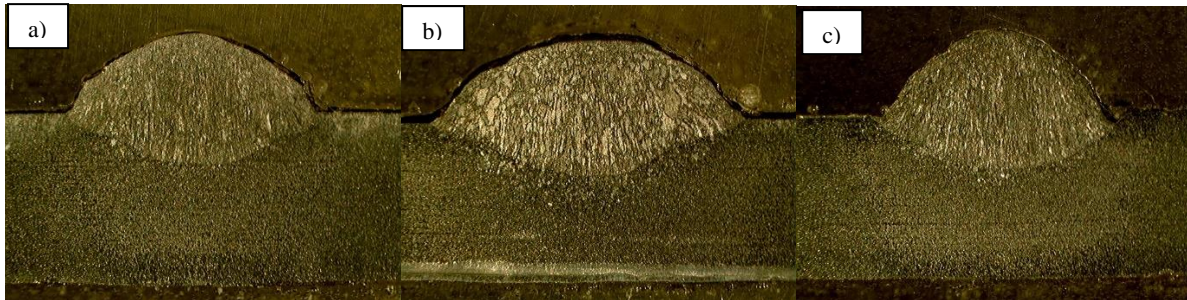


Figura 5.4. Macrografias de cordões de solda depositados sobre aço baixo carbono com eletrodos E6013 realizados com o processo de soldagem por gravidade. a) CC⁺, b) CC⁻, c) CA. Aumento de 12x.

Na soldagem com corrente alternada, foi possível identificar o aparecimento de uma mordedura que pode ter ocorrido devido ao ângulo de soldagem ou a um curto comprimento de arco, o que pode resultar em um concentrador de tensão, conforme apresentado na Figura 5.4c).

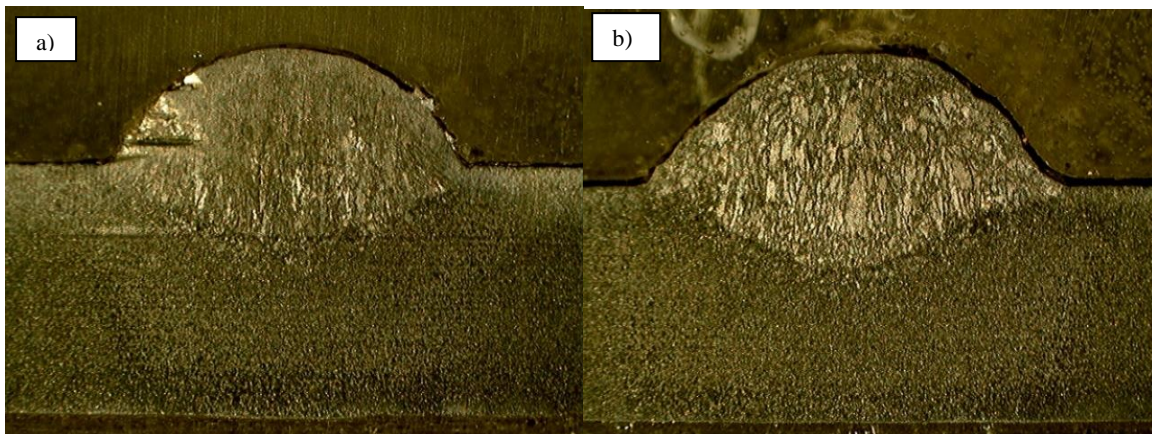


Figura 5.5. Macrografias de cordões de solda depositados sobre aço baixo carbono com eletrodos E7018 realizados com o processo de soldagem por gravidade. a) CC⁺, b) CC⁻. Aumento de 12x.

Os aspectos geométricos dos cordões apresentados na Figura 4.3 foram medidos com a utilização do *software* ImageJ e os resultados estão apresentados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2. Aspectos geométricos dos cordões de solda.

Amostras	Comprimento face (L)	Penetração do cordão (P)	Área Fundida (A_f)	Ângulo Esquerdo	Ângulo Direito
Amostra 1 - 6013 CC⁺	7.180	1.522	16.259	117.051	123.608
Amostra 2 - 6013 CC⁻	9.605	1.640	24.339	134.439	130.125
Amostra 3 - 7018 CC⁺	6.668	1.441	16.443	127.440	117.659
Amostra 4 - 7018 CC⁻	8.087	1.547	21.628	129.303	130.956
Amostra 5 - 6013 CA	7.249	1.516	16.829	124.326	81.158

Pode-se observar que os cordões realizados com corrente contínua eletrodo negativo ou polaridade direta (CC⁻) para os eletrodos AWS E6013 quanto para AWS E7018 possuem maior taxa de fusão, pois o calor gerado no cátodo é maior do que no ânodo para soldagens realizadas com eletrodos consumíveis, estando de acordo com a literatura e relatado por Camargos (2019).

De acordo com Forte e Vaz (2005) e Leonello Filho (2005) obtém-se uma penetração mais profunda utilizando CC⁺, pois uma maior intensidade de corrente, resulta em uma maior penetração, em função do maior nível de energia gerado no arco. Carraro (2017), também observou que o efeito da polaridade e tipo de revestimento sobre a penetração e sobre a área fundida foi maior quando utilizados eletrodos E6013 CC⁺, E7018 CC⁺ e E6013 CC⁻, respectivamente em ordem decrescente. No entanto, a área fundida e a penetração dos cordões também foram superiores quando realizadas com CC⁻ para ambos os eletrodos, isso pode ocorrer devido a variação dos parâmetros utilizados no processo de soldagem como: valores de corrente, energia bruta e velocidade média de soldagem.

Em relação à soldagem com eletrodo revestido E6013 com corrente alternada, obtiveram-se resultados semelhantes ao se realizar a soldagem com CC⁺, resultados também obtidos por Aloraier *et al.* (2014). Como a importância da polaridade decorre principalmente da diferença da quantidade de calor introduzida na peça de trabalho, de acordo com Aloraier *et al.* (2014), os resultados sugerem que a máxima entrada de calor para o metal durante soldagem foi para a amostra de polaridade CC⁻, seguida pela amostra de polaridade CA, e depois para a amostra de polaridade CC⁺, o mesmo obtido neste trabalho. No entanto, ao se observar a Tabela 5.1 associada à Tabela 5.2, percebe-se que não foi possível modificar apenas a polaridade/tipo de corrente entre as diferentes condições. Além disso, como já mencionado, a fonte utilizada para soldagem na condição com corrente alternada foi diferente daquela utilizada em corrente contínua.

5.3 Efeitos na Microestrutura

A análise das fases e constituintes do metal foi obtida por meio do microscópio com aumentos de 50x, 100x e 200x para cada região das soldas: metal base, zona termicamente afetada e zona fundida.

No presente trabalho foi utilizado como metal base uma chapa de aço baixo carbono 1020, o qual possui uma microestrutura constituída por ferrita e uma pequena porção de perlita apresentada na Figura 5.6.

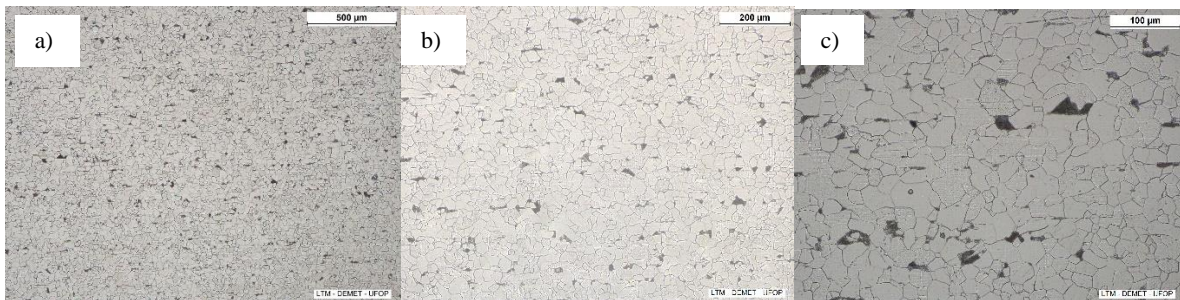


Figura 5.6. Microestrutura do metal base de um aço baixo carbono. a) 50x, b) 100x, c) 200x.

Nital 2%

A Figura 5.7 apresenta a microestrutura do metal base (MB), a zona termicamente afetada (ZTA) e a zona fundida (ZF), sendo possível visualizar as alterações causadas na microestrutura devido ao aporte térmico da soldagem, realizada com o eletrodo com revestimento rutílico E6013 com CC^+ .

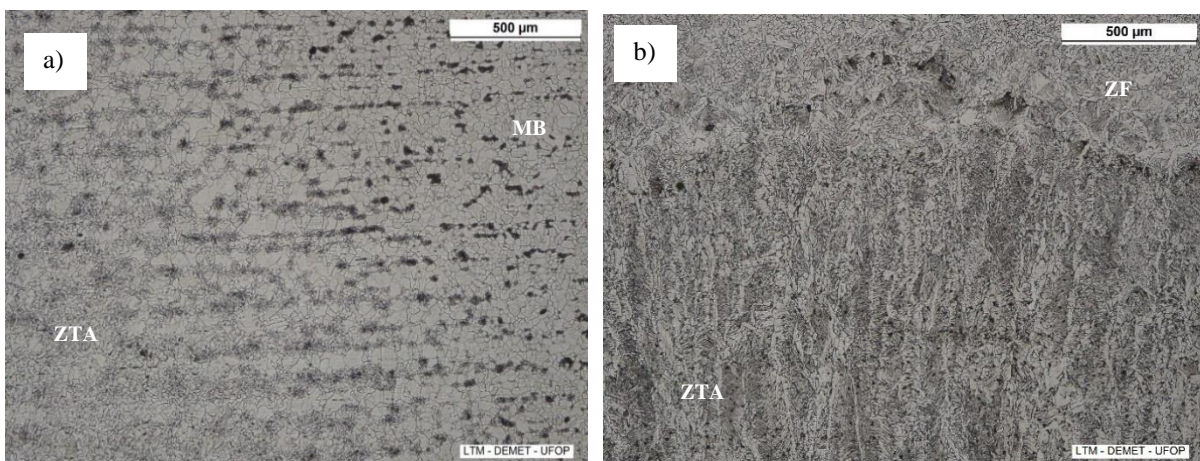


Figura 5.7. Junta soldada em aço baixo carbono com eletrodo E6013 - Amostra 01 (Figura 5.1) (CC^+). a) MB e ZTA – 50x, b) ZTA e ZF – 50x. Reativo: Nital 2%.

Na região da ZF, a soldagem realizada com eletrodo revestimento rutílico E6013 com CC^+ foi possível identificar a microestrutura formada principalmente por ferrita de contorno de grão e ferrita de Widmanstätten apresentadas na Figura 5.8.

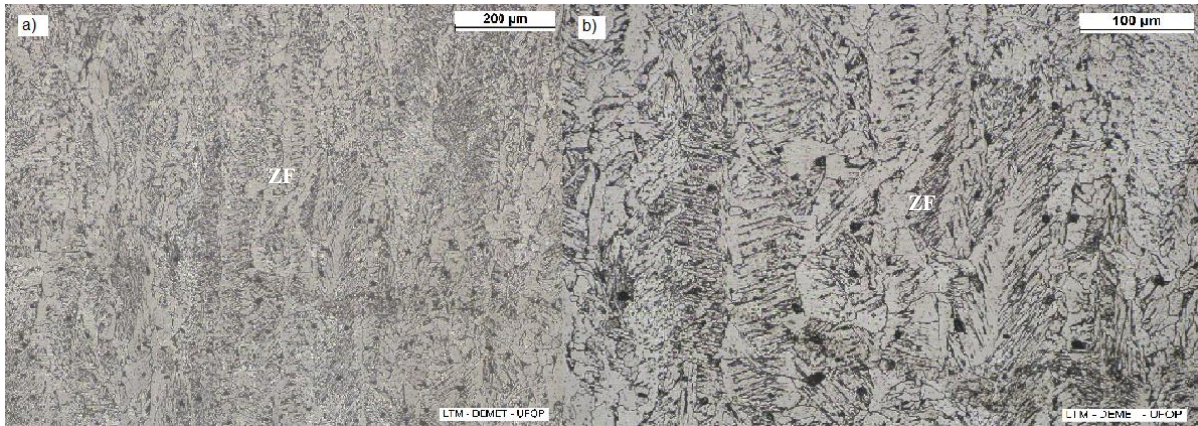


Figura 5.8. Junta soldada em aço baixo carbono com eletrodo E6013 - Amostra 01 (Figura 5.1) (CC⁺). a) ZF - 100x, b) ZF - 200x. Nital 2%

A soldagem com eletrodo revestido E6013 com CC⁻ apresentou na ZTA próximo a ZF grãos grosseiros de ferrita Figura 5.9.

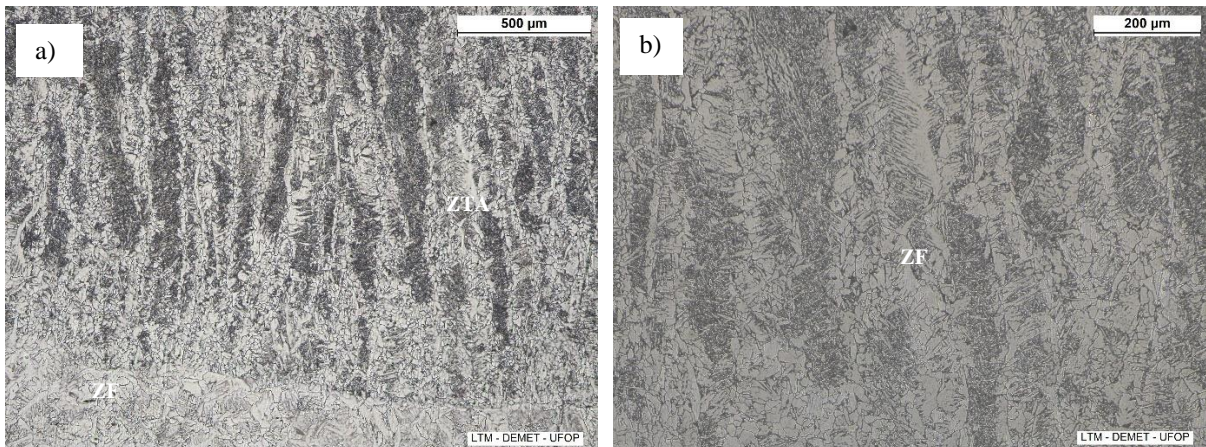


Figura 5.9. Junta soldada em aço baixo carbono com eletrodo E6013 - Amostra 02 (Figura 5.1) (CC⁻). a) ZTA e ZF - 50x, b) ZF - 100x. Reativo: Nital 2%

Na Figura 5.10 pode-se observar a ZF para a deposição obtida com eletrodos rufílicos. Nota-se a presença significativa de ferrita de contorno de grão, placas laterais de ferrita de Widmanstätten e ferrita acicular.

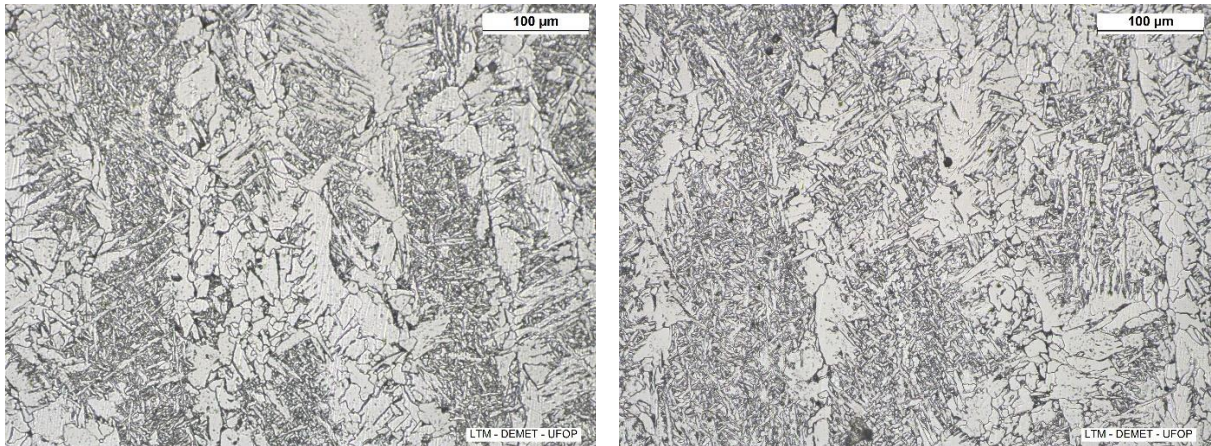


Figura 5.10. Junta soldada em aço baixo carbono com eletrodo E6013 - Amostra 02 (Figura 5.1) (CC⁻). ZF – 200x. Reativo: Nital 2%

Na soldagem com eletrodo revestido básico E7018 com CC⁺ a microestrutura na ZF é constituída predominantemente por placas laterais de ferrita ou de Widmanstätten, apresentando também ferrita acicular e ferrita primária, como pode ser observado nas Figuras 5.11b) e 5.12.

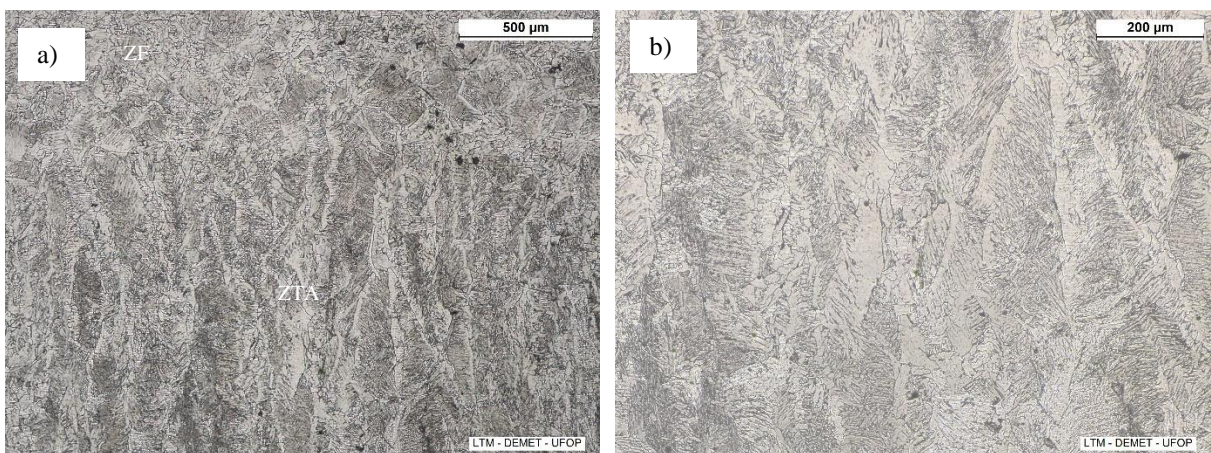


Figura 5.11. Junta soldada em aço baixo carbono com eletrodo E7018 - Amostra 03 (Figura 5.2) (CC⁺). a) ZTA e ZF – 50x, b) ZF -100x. Reativo: Nital 2%

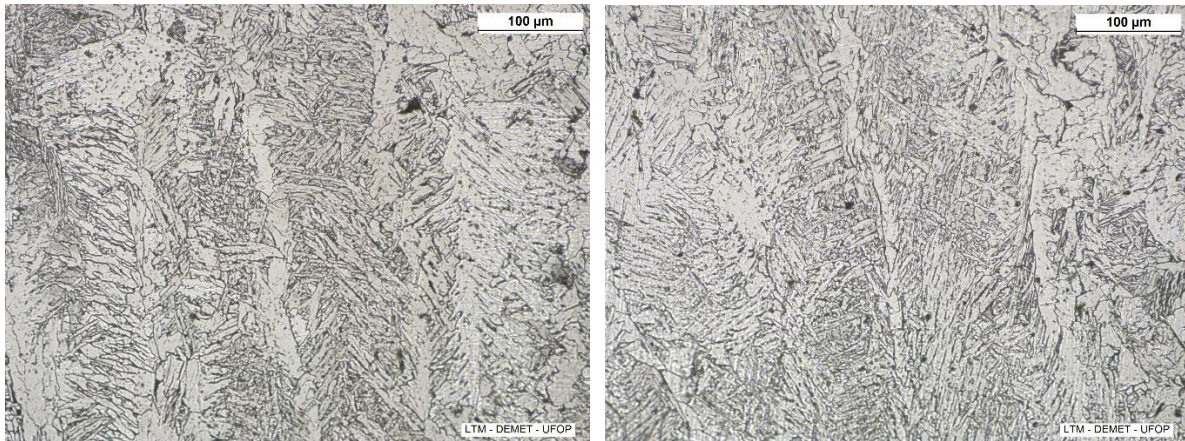


Figura 5.12. Junta soldada em aço baixo carbono com eletrodo E7018 - Amostra 03 (Figura 5.2) (CC⁺). ZF – 200x. Reativo: Nital 2%

A Figura 5.13 apresenta a microestrutura da ZF de um aço baixo carbono soldado com eletrodo revestido, do tipo AWS E7018, com corrente contínua e polaridade CC⁻.

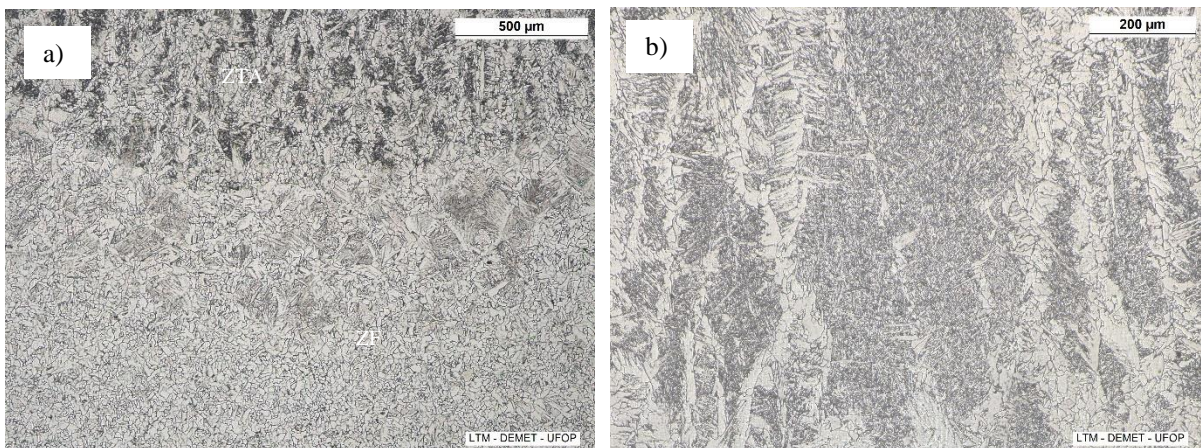


Figura 5.13. Junta soldada em aço baixo carbono com eletrodo E7018 - Amostra 04 (Figura 5.2) (CC⁻). a) ZTA e ZF – 50x, b) ZF -100x. Reativo: Nital 2%

A soldagem com eletrodo revestido E7018 com CC⁻ apresentou predominantemente ferrita acicular que proporciona a junta soldada uma melhor relação entre resistência mecânica e tenacidade, apresentada Figura 5.14.

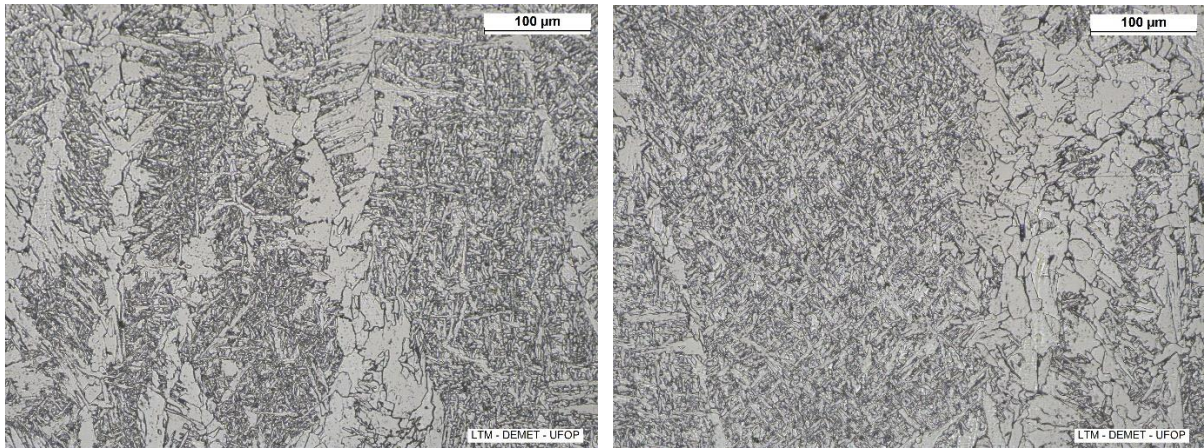


Figura 5.14. Junta soldada em aço baixo carbono com eletrodo E7018 – Amostra 04 (Figura 5.2) (CC). ZF – 200x. Reativo: Nital 2%

A Figura 5.15 apresenta a microestrutura da ZF de um aço baixo carbono soldado com eletrodo revestido, do tipo AWS E6013, com corrente alternada.

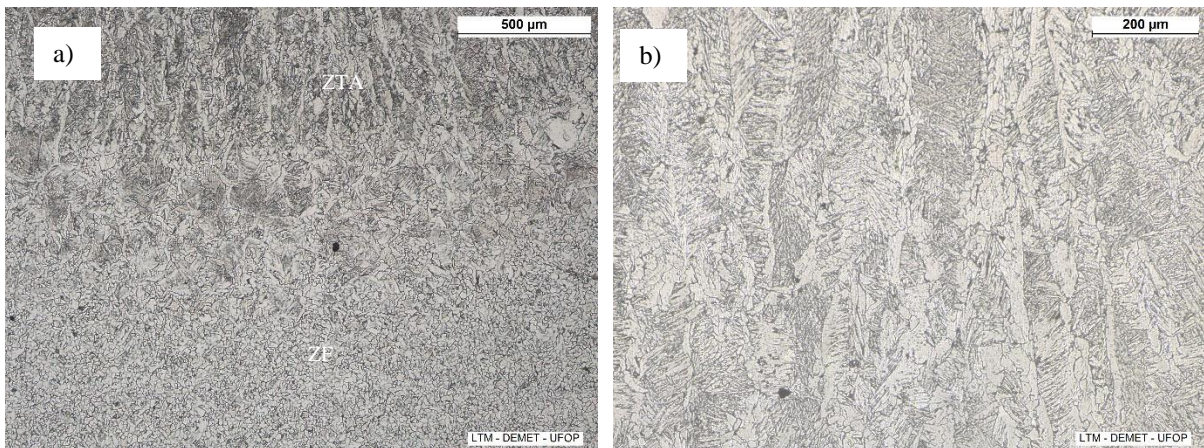


Figura 5.15. Junta soldada em aço baixo carbono com eletrodo E6013 - Amostra 05 (Figura 5.3) (CA). a) ZTA e ZF – 50x, b) ZF -100x. Reativo: Nital 2%

Em relação à soldagem realizada com o eletrodo E6013 com corrente alternada (Amostra 05 – Tabela 5.1), apresentou a microestrutura constituída por placas laterais de ferrita, ferrita acicular e ferrita de contorno de grão, apresentada na Figura 5.16.

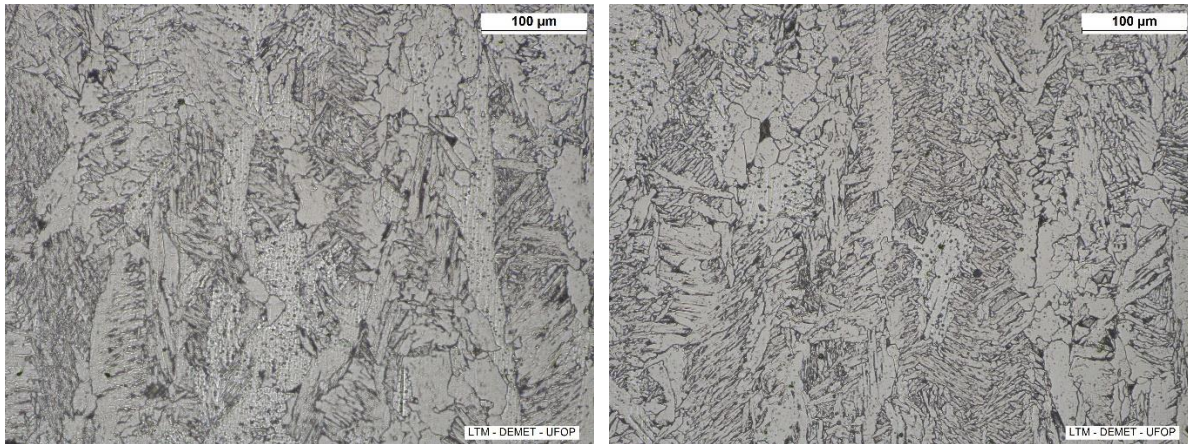


Figura 5.16. Junta soldada em aço baixo carbono com eletrodo E6013 - Amostra 05 (Figura 5.3) (CA). ZF – 200x. Reativo: Nital 2%

Ao analisar as microestruturas é possível visualizar que a soldagem realizada com a CC^+ para ambos os eletrodos E6013 (Amostra 1) e E7018 (Amostra 3) apresentaram microestruturas da zona fundida constituídas de placas laterais de ferrita, ferrita de contorno de grão e ferrita acicular, conforme relatado por Aloraier *et al.* (2014). O desenvolvimento microestrutural de soldas de aço de baixo carbono foi examinado por Samuels, 1980, que indicou que uma quantidade significativa de ferrita de Widmanstätten se forma quando ocorre um subresfriamento apreciável abaixo da temperatura A1 durante solidificação da solda.

Aloraier *et al.* (2014) também menciona que ao se alterar a polaridade afeta a quantidade de calor na zona de solda e afeta a heterogeneidade da microestrutura, causando mudanças nas propriedades da ZTA.

Isso pode justificar ao analisar as microestruturas resultantes da solda com corrente contínua e polaridade CC^- , em relação a soldagem realizada com eletrodo E6013 (Amostra 2, Tabela 5.1) percebe-se que a microestrutura é constituída por ferrita acicular (FA) e ferrita de Widmanstätten (FW), sendo que a FW é prejudicial à tenacidade, pois tende a crescer num conjunto paralelo de placas com a mesma orientação, as quais oferecem pouca resistência à propagação de trinca (OLIVEIRA, 2014 apud BABU e BHADESHIA, 1990).

Entretanto, para a soldagem realizada com eletrodo E7018 (Amostra 4, Tabela 5.1) com CC^- houve uma diferença significativa, pois, a microestrutura é constituída principalmente por ferrita acicular, a qual fornece maior tenacidade, dificultando a propagação de trincas, apesar de conter uma pequena fração de ferrita de contorno de grão (GF) e placas laterais de ferrita. No entanto, não foi objetivo deste trabalho a quantificação da microestrutura obtida em função da polaridade de soldagem e tipo de eletrodo revestido.

Uma visão geral das fases e dos constituintes identificados em cada amostra (Tabela 5.1) é ilustrada na Figura 5.18.

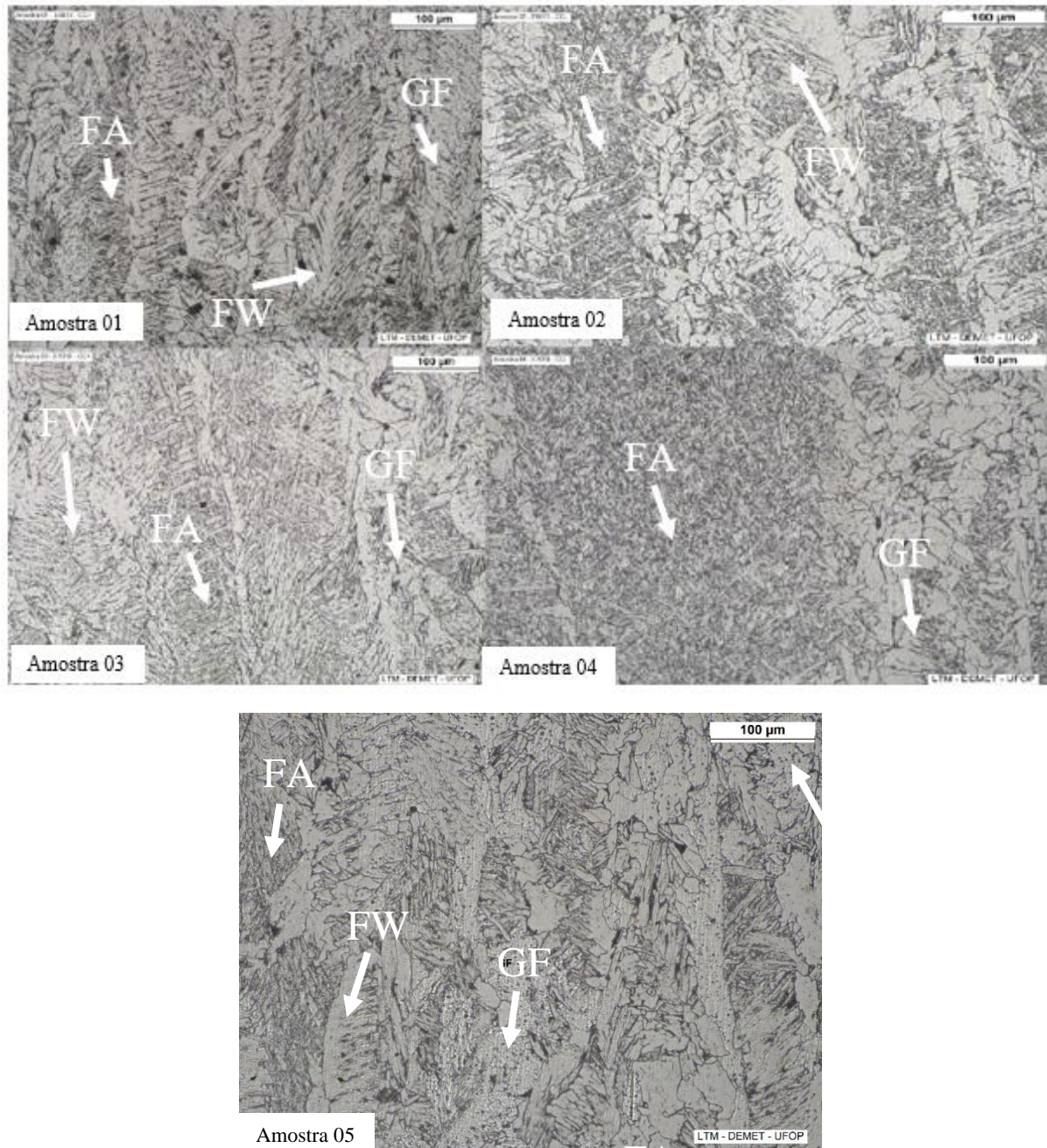


Figura 5.17. Visão geral das fases e dos constituintes dos cordões de soldas de um aço baixo carbono soldado pelo processo SMAW; 200x. Reativo: Nital 2%. FW- Ferrita de Widmanstätten ou placas laterais de ferrita, GF - Ferrita de contorno de grão, FA - Ferrita acicular.

6 CONCLUSÕES

Os cordões de solda realizados com CC⁻ com ambos eletrodos resultaram em uma maior penetração, estando um pouco diferente do mencionado na literatura. No entanto, não foi possível modificar apenas a polaridade e o tipo de corrente, pois os valores de velocidade média de soldagem foram diferentes, os quais também interferem nos aspectos dos cordões.

Os valores de velocidade média de soldagem foram menores para as soldagens realizadas com o revestimento básico, podendo ser justificado devido ao seu maior volume de revestimento contendo a presença de pó de ferro.

Em relação à microestrutura foi possível observar que não houve influência da polaridade nas microestruturas obtidas, pois formaram os mesmos constituintes e fases em quantidade distintas, o que resultou, conforme esperado, uma aparente maior fração de ferrita acicular no metal de solda obtidos com o eletrodo AWS E7018.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Repetir todas as condições de soldagem utilizando o processo de Soldagem GTAW (Gas Tungsten Arc Welding - GTAW) ou TIG (Tungsten Inert Gas).

REFERÊNCIAS

ALÉ, R.M.; JORGE, J.C.F.; REBELLO, J.M.A. **Constituintes Microestruturais de Soldas de Aços C-Mn Baixa Liga - Parte III: ZAC. Soldagem & Materiais**, ABS, Brasil, v.1, n.3, 1993.

ALORAIER, A.; AL-FADHALAH, K.; PARADOWSKA, A.M. & ALFARAJ, E. Effect of welding polarity on bead geometry, microstructure, microhardness, and residual stresses of 1020 steel. **Journal of Engineering Research**, v. 2, n. 4, p.1-24, 2014.

BABU, S. S.; BHADSHIA, H. K. D. H. (1990) **A direct Study Of Grain Boundary Allotriomorphic Ferrite Crystallograpy. Materials Science and Engineering**. A142. p 209-219.

BABU, S. S.; BHADSHIA, H. K. D. H. (1992) **Stress and the Acicular Ferrite Transformation. Materials Science and Engineering**. A156. 1-9 p

BRAZ, T. Á., TAVARES, T. B., PORCARO, R. R., CÂNDIDO, L. C., & DE FARIA, G. L. **Desenvolvimento de dispositivo para soldagem com eletrodos revestidos por gravidade e aplicação em estudo de metalurgia da soldagem de aço API X65Q** 2016. 24f. Trabalho de Conclusão de Curso. (Bacharel em Engenharia Metalúrgica) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016.

CAMARGOS, T.M. **Avaliação da influência da polaridade da corrente de soldagem na taxa de fusão dos eletrodos revestidos** 2019. 57f. Trabalho de Conclusão de Curso. (Bacharel em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019.

CARRARO, G. **Avaliação da eficiência térmica do processo de soldagem por eletrodos revestidos** 2017. 44f. Trabalho de Conclusão de Curso. (Bacharel em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.

COELHO, N.G. **Avaliação da aplicabilidade da máquina para soldagem ER para avaliar a influência da polaridade da corrente na taxa de fusão dos eletrodos revestidos** 2019. 39f. Trabalho de Conclusão de Curso. (Bacharel em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019

DIAS, F.F.S. **Influência da polaridade na morfologia do cordão de solda com eletrodos revestidos comerciais (E6013, E7018)**. 2014. 51f. Trabalho de Conclusão de Curso. (Bacharel em Engenharia de Materiais) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

FARIAS, J.P.; DUTRA, J.C. **Efeito do tipo de fonte de energia sobre a estabilidade do arco de eletrodos revestidos**, XII Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, 1993.
FEDELE, R.A. **Desafios da soldagem em tubulações**. Metalurgia e Materiais, ABM, v. 58, n. 521, 2002.

FORTES, C., VAZ, C. T. (2005). **Eletrodos revestidos**. 2005. 32f. ESAB BR

GUEDES, R.P. **Influência da corrente de soldagem nas propriedades de juntas de aço de alta resistência e baixa liga soldadas com eletrodo revestido** 2009. 79f. Dissertação. Mestrado - CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Pernambuco, Pernambuco, 2009.

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

LEONELLO FILHO, A. **Análise da influência dos parâmetros do processo de soldagem com eletrodos revestidos na estabilidade do arco e características geométricas do cordão** 2005. 110f. Dissertação. (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2005.

MARQUES, P., MODENESI, P., & BRACARENSE, A. **Soldagem: Fundamentos e Tecnologia**. 3ed. Belo Horizonte: Editora da UFMG, 2011. 362p.

MODENESI, P.J; MARQUES, P.V; SANTOS, D.B. **Introdução à Física do Arco Elétrico**. 2012. Disponível em: <https://demet.eng.ufmg.br/wp-content/uploads/2012/10/fundamentosfisicos1.pdf>. Acesso em: 28 mai. 2022.

MODENESI, P.J; MARQUES, P.V; SANTOS, D.B. **Introdução à Metalurgia da Soldagem**. 2012. Disponível em: <https://demet.eng.ufmg.br/wp-content/uploads/2012/10/metalurgia.pdf>. Acesso em: 28 mai. 2022.

MODENESI, P.J; **Soldabilidade dos aços transformáveis**. 2012. Disponível em: <https://demet.eng.ufmg.br/wp-content/uploads/2012/10/metferritic1.pdf>. Acesso em: 4 jun. 2022.

OLIVEIRA, B. F. **Efeito dos tratamentos térmicos sobre a microestrutura e as propriedades de um aço ARBL microligado com estrutura bruta de solidificação**. 2014. Dissertação (Mestrado Engenharia e Ciência dos Materiais) - Campos dos Goytacases: Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, 2014.

PHILLIPS, D. H. **Welding Engineering: An Introduction**. 1ª ed. Chichester, UK: Wiley, 2016. 275p.

PONOMAROV, V., **Apresentação sobre Soldagem com Eletrodo Revestido**, CTA, Laprosolda, FEMEC, UFU. 2014

PONOMAROV, V., **Apresentação sobre Arco de Soldagem**, CTA, Laprosolda, FEMEC, UFU. 2014

PONOMAROV, V., **Apresentação sobre Fontes de Soldagem**, CTA, Laprosolda, FEMEC, UFU. 2014.

PORCARO, R. R. **Notas de Aulas da Disciplina MET140 (Tecnologia e Metalurgia de Soldagem)**. Engenharia Metalúrgica, Escola de Minas - Universidade Federal de Ouro Preto, MG, 2021.

SAMUELS, L.E. **Optical Microscopy of Carbon Steels**. American Society for Metals, Metals Park, Ohio. 1980.

SILVA, N.M.C.S; **Influência da velocidade e posição de soldagem nas propriedades de juntas soldadas pelo processo de eletrodo revestido** 2017. 40f. Trabalho de Conclusão de Curso. Bacharel em Engenharia Mecânica - Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2017.

WAINER, E.; BRANDI, S. D.; MELLO, F. D. H. **Soldagem: Processos e Metalurgia**. São Paulo, Editora Bluncher, 2008. 505p.