



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA METALÚRGICA

DYEGO IRINEU SILVA DE ALMEIDA

ESTUDO DE CONDIÇÕES DE SOLDAGEM PARA SOLDAGEM COM ARAME
TUBULAR AUTO PROTEGIDO: EFEITOS DE CORRENTES DE AR E DBCP

FORTALEZA

2018

DYEGO IRINEU SILVA DE ALMEIDA

ESTUDO DE CONDIÇÕES DE SOLDAGEM PARA SOLDAGEM COM ARAME
TUBULAR AUTO PROTEGIDO: EFEITOS DE CORRENTES DE AR E DBCP

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Orientador: Prof. Dr. Hélio Cordeiro de Miranda.

FORTALEZA

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- A445e Almeida, Dyego Irineu Silva de.
Estudo de Condições de Soldagem para Soldagem com Arame Tubular Auto Protegido: Efeitos de Correntes de Ar e DBCP. / Dyego Irineu Silva de Almeida. – 2018.
82 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Metalúrgica, Fortaleza, 2018.
Orientação: Prof. Dr. Hélio Cordeiro de Miranda.
1. : Arame Tubular Auto Protegido. 2. Avaliação de Inclusões. 3. AWS E71T-11. I. Título.
CDD 669
-

DYEGO IRINEU SILVA DE ALMEIDA

ESTUDO DE CONDIÇÕES DE SOLDAGEM PARA SOLDAGEM COM ARAME
TUBULAR AUTO PROTEGIDO: EFEITOS DE CORRENTES DE AR E DBCP

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Aprovada em: ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Hélio Cordeiro de Miranda (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Cleiton Carvalho Silva
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Willys Machado Aguiar
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE)

A Deus.

Aos meus pais, Pedro e Suzete.

Às minhas irmãs, Raphaelle e Carla

Aos meus sobrinhos, Emily e André.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida.

Aos meus pais, Pedro e Suzete, por todo sacrifício, abnegação e amor incondicional que me possibilitaram estudar sem maiores preocupações. Por, mesmo sem condições financeiras, nunca deixaram que me faltasse nada. Agradeço, também, pela confiança depositada e por me apoiarem em todas minhas escolhas, mesmo quando decidi sair e principalmente quando resolvi voltar.

Às minhas irmãs, Raphaelle e Carla (*in memoriam*), por tornarem minha infância a melhor possível, pelas caixas de bombom compartilhadas, pelo respeito e companheirismo.

Aos meus sobrinhos Emily e André, por todos momentos de alegria.

Ao Prof. Dr. Hélio Cordeiro de Miranda, pela orientação e pelo exemplo de profissionalismo.

Aos professores, Hamilton, Willys, Cleiton, Marcelo Motta e Marcelo José pela contribuição intelectual, disponibilidade e paciência.

Aos meus amigos Mário Leitão e Lucas Moura, pela amizade e pelas horas de estudo compartilhadas.

Aos meus amigos Dário, Andrey, Lorena, Rubson, Carlos Viana e Magno, pela amizade e toda ajuda durante esse percurso.

A minha amiga Ana Larissa, pela companhia e por toda contribuição ao longo desse trabalho.

Aos meus amigos Francisco Antônio, José Flávio e Pedro Mendes.

Aos meus amigos do LACAM, Arthur, Thiago, João Rodrigues, Whedson, Diego Dias, João Vitor, Lucas, Beatriz, Soraia, Pablo, Hana, Nilis, Matheus, Igor Anjos, Whescley, Letícia, Caio e Mirela.

Aos Amigos do LPTS, Aglailton, Gilvânia, Karine, Fernando, Rafaela, Davi, David, Marília, Gabriel, Amaral, Nathalia, Pedro, Emerson Miná, Lênin, Marcela, Roger, Edileusa e Francisca.

Aos meus amigos da Metal Soluções, Ronaldo, Bruna, Caio, Amanda Oliveira, Amanda Demont e Rayssila.

Aos amigos que fiz durante a graduação Jackson, Otílio, Vinicius, Davi, Roberto, Pedro Guilherme, Maria, Pedro Chaves, Emmanuel, Diego Salmin, Renardir, Eveline e Ivna.

Ao secretário Antonio, pela paciência e por toda ajuda durante minha graduação.

Ao Laboratório de Pesquisa e Tecnologia em Soldagem (LPTS), por toda estrutura.

Ao Laboratório de Caracterização em Materiais (LACAM), pelas análises de composição química.

Ao Laboratório de Aerodinâmica e Mecânica dos Fluidos (LAERO) pelo empréstimo do anemômetro digital.

“Se te apetece esforçar, esforça-te; se te apetece repousar, repousa; se te apetece fugir, fuja; se te apetece resistir, resista; mas saiba bem o que te apetece, e não recue ante nenhum pretexto, porque o universo se organizará para te dissuadir”

(Nietzsche, Friedrich).

RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo avaliar a influência do vento e dos parâmetros de soldagem nas características da solda do aço ASTM A36, utilizando um eletrodo classe AWS E71T-11 no processo de soldagem arame tubular auto protegido (FCAW). Após soldagens teste e definido os parâmetros, oito chapas de aço ASTM A36 foram cortadas e pesadas antes e depois da soldagem a fim de se avaliar a massa de cada cordão. Foram soldados cordões, no modo tensão constante, com e sem a influência de correntes de ar, variando a DBCP e a velocidade de alimentação do arame com o intuito de verificar seus efeitos sobre o rendimento, geometria e diluição do cordão, assim como microestrutura e dureza da zona fundida e da ZAC. Também foram avaliadas as inclusões da zona fundida de forma qualitativa e quantitativa. Amostras da seção transversal dos cordões foram cortadas e preparadas metalograficamente. Com uma câmera fotográfica, foram feitas macrografias das amostras e a geometria dos cordões foi medida. As microestruturas foram avaliadas, após devida preparação metalográfica, utilizando um microscópio ótico e MEV. Um perfil de microdureza, da zona fundida ao metal base, foi realizado em cada amostra utilizando um microdurômetro automático. Concluiu-se, para esse trabalho, que a presença de correntes de ar não apresentou interferências estatisticamente significantes na geometria, dureza, microestrutura e rendimento dos cordões, porém apresentou acréscimo relevante na quantidade de inclusões. A DBCP apresentou influencia estatisticamente significativa, apenas na diluição, que reduz com o acréscimo daquela. Por fim, a energia de soldagem influenciou na geometria do cordão, bem como alterou a microestrutura e dureza e influiu na presença de inclusões na zona fundida.

Palavras-chave: Arame Tubular Auto Protegido; Avaliação de Inclusões; AWS E71T-11.

ABSTRACT

The aim of the present work was to evaluate the influence of wind and welding parameters on the welding characteristics of ASTM A36 steel using an AWS E71T-11 electrode in the Flux-Cored Arc Welding (FCAW) process. After welding test and set parameters, eight ASTM A36 steel plates were cut and weighed before and after welding to evaluate the deposited mass. The welds were performed in constant tension mode, with and without the influence of air flow, varying the CTWD and the travel speed to verify its effects on the yielded, geometry and dilution of the weld bead, as well as microstructure and hardness of the melt zone and HAZ. The inclusions formed into the molten zone were also evaluated qualitatively and quantitatively. Samples of the weld beads in cross section were cut and prepared metallographically. Macrographs of the specimens were taken and the geometry of the weld beads were measured. The microstructures were evaluated, after metallographic preparation, by using a light microscope and scanning electron microscopy (SEM). A microhardness profile, from the melted zone to the base metal, was performed in each specimen using an automatic microhardness tester. It was concluded, for this work, that the presence of external air flow did not present statistically significant interferences in the weld beads, but presented a significant increase in the number of inclusions. The CTWD presented a statistically significant influence, only in the dilution that reduces with the addition of that one. Finally, the welding energy influenced the weld bead, as well as altered the microstructure and hardness, influencing the also presence of inclusions in the molten zone.

Keywords: FCAW-S. Evaluation of Inclusions. AWS E71T-11.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 - processo de soldagem com arame tubular..... | 21 |
| Figura 2 - Equipamentos do processo arame tubular..... | 22 |
| Figura 3 - Controle interno do arco. | 23 |
| Figura 4 - Rolete com canal recartilhado..... | 23 |
| Figura 5 - Geometrias da seção transversal do eletrodo..... | 25 |
| Figura 6 - Seção transversal típica de cordões feitos com diferentes misturas de gases. | 26 |
| Figura 7 - tipos de transferência metálica. (a) curto-circuito, (b) globular e (c) goticular. | 27 |
| Figura 8 - Destacamento da gota para transferência curto circuito | 27 |
| Figura 9 - Transferência globular | 28 |
| Figura 10 - Transferência goticular..... | 28 |
| Figura 11 – Relação comprimento energizado do eletrodo e corrente. | 30 |
| Figura 12 – Comparativo entre a tenacidade de cordões soldados com processo MAG e Arame Tubular autoprotégido, sob influência de correntes de ar..... | 32 |
| Figura 13 - Microdurômetro automático e microscópio ótico..... | 34 |
| Figura 14 - microscópio eletrônico de varredura..... | 34 |
| Figura 15 - Bancada de soldagem..... | 35 |
| Figura 16 - Fluxograma do trabalho | 36 |
| Figura 17 – Almofada de solda..... | 37 |
| Figura 18 - Chapas usadas na soldagem definitiva. | 38 |
| Figura 19 - Medição da velocidade do vento. | 39 |
| Figura 20 - Esquema simplificado da simulação de correntes de ar..... | 39 |
| Figura 21 - Fluxograma da soldagem definitiva..... | 40 |
| Figura 22 - Geometria do cordão de solda. | 41 |
| Figura 23 - Regiões para cálculo da diluição. | 41 |
| Figura 24 - Perfil de microdureza..... | 42 |
| Figura 25 - Regiões de análises das inclusões..... | 43 |
| Figura 26 - Software ImageJ. | 43 |
| Figura 27 – Imagens para avaliação das inclusões..... | 44 |
| Figura 28 - Resultado da quantificação. | 44 |
| Figura 29 – Amostras do eletrodo embutidos em baquelite, a esquerda e seção transversal do eletrodo, a direita. | 45 |
| Figura 30 – Acréscimo do comprimento do eletrodo energizado com a elevação da DBCP. .. | 49 |
| Figura 31 - Influência do vento na destacabilidade da escória. Cordões soldados sem vento | |

| | |
|---|----|
| (ímpares) e cordões soldados com vento (pares). A região pontilhada destaca a escória presente nos cordões após limpeza manual | 51 |
| Figura 32 - Aspecto superficial dos cordões..... | 53 |
| Figura 33 – Macrografia da seção transversal dos cordões. | 54 |
| Figura 34 - Influência da energia sobre a largura do cordão | 56 |
| Figura 35 - Influência da energia sobre a penetração do cordão. | 56 |
| Figura 36 - Influência da energia sobre o reforço do cordão..... | 57 |
| Figura 37 - Influência da DBCP na diluição. | 58 |
| Figura 38 - Principais efeitos para área fundida do metal de base. | 58 |
| Figura 39 - Principais efeitos para área adicionada. | 59 |
| Figura 40- Microestrutura do metal base. Magnificação 500X - ataque nital 2%..... | 60 |
| Figura 41 - Padrões de microestrutura presentes na zona fundida dos cordões. | 61 |
| Figura 42 - Microestrutura da ZF, alta energia. | 62 |
| Figura 43 - Microestrutura da ZF, alta energia. | 62 |
| Figura 44 – ZAC GG baixa energia. Magnificação 500X..... | 63 |
| Figura 45 – ZAC GG alta energia. Magnificação 500X..... | 64 |
| Figura 46 – ZAC GF, baixa energia. Magnificação 500X..... | 65 |
| Figura 47 – ZAC GF, baixa energia. Magnificação 500X..... | 65 |
| Figura 48 - ZAC intercristica | 66 |
| Figura 49 - Influência da energia de soldagem sobre o rendimento..... | 68 |
| Figura 50 - Principais efeitos para o rendimento..... | 68 |
| Figura 51 - Influência da energia na dureza da ZF. | 70 |
| Figura 52 - Influência da energia na dureza da linha de fusão. | 70 |
| Figura 53 - Influência da energia na dureza ZAC. | 71 |
| Figura 54- Mapa de composição química das inclusões da zona fundida | 72 |
| Figura 55 - influência da energia sobre a quantidade de inclusões na ZF - 200X..... | 74 |
| Figura 56 - influência da energia sobre a quantidade de inclusões na ZF - 500X..... | 74 |
| Figura 57 – Nível de inclusões da zona fundida – influência da energia de soldagem. Aumento 200X, DBCP 30mm, soldagem sem influência de correntes de ar forçado. | 75 |
| Figura 58 – Nível de inclusões da zona fundida – influência da energia de soldagem. Aumento 500X, DBCP 30mm, soldagem sem influência de correntes de ar forçado. | 76 |
| Figura 59 - Principais efeitos sobre a quantidade de inclusões da ZF - 200X | 77 |
| Figura 60 - Nível de inclusões da zona fundida – influência de correntes de ar. Aumento 200X, DBCP 30mm, energia de soldagem 1,06kJ/mm. | 78 |

Figura 61 - Nível de inclusões da zona fundida – influência de correntes de ar. Aumento 500X, DBCP 30mm, energia de soldagem 1,06kJ/mm. 79

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 Especificações AWS para arame tubular | 24 |
| Tabela 2 - Composição química do metal de adição. | 33 |
| Tabela 3 – Composição Aço ASTM A36..... | 33 |
| Tabela 4 - Composição química do metal depositado. | 47 |
| Tabela 5 - Composição química do metal de base..... | 47 |
| Tabela 6 - Resumo da soldagem no modo tensão constante com 23 V e a velocidade de soldagem de 0,3 m/min..... | 48 |
| Tabela 7 – Matriz de correlação para corrente, tensão e energia. | 49 |
| Tabela 8 - Avaliação superficial dos cordões..... | 52 |
| Tabela 9 Geometria do cordão. C – Cordão; L – largura; P – penetração; R – reforço; AMB - área do metal base na ZF; AR – área do reforço; AT – área total do ZF..... | 54 |
| Tabela 10 – Resultados do teste de hipóteses dos fatores sobre a penetração, largura, reforço e diluição. $\alpha = 0,05$ | 55 |
| Tabela 11 – Matriz de correlação entre os parâmetros e os fatores geométricos | 59 |
| Tabela 12 - Rendimento dos cordões soldados. C: Cordão; Ta: Tempo de arco aberto; Vv :Velocidade do vento; H: Energia; Mc: massa do cordão; Mt: massa teórica calculada; R: Rendimento..... | 67 |
| Tabela 13 – Resultados dos testes de hipóteses para o rendimento. $\alpha = 0,05$ | 67 |
| Tabela 14 - Média das microdurezas Vickers da zona fundida (ZF) da linha de fusão (LF) da zona afetada pelo calor (ZAC) e do metal base (MB)..... | 69 |
| Tabela 15 – Resultados dos testes de hipóteses para as durezas, $\alpha = 0,05$ | 69 |
| Tabela 16 - Porcentagem de inclusões na zona fundida | 73 |
| Tabela 17 -Resultados dos testes de hipótese para as inclusões, $\alpha = 0,05$ | 73 |
| Tabela 18 – Correlação entre os fatores e o nível de inclusões. | 77 |

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| 1 INTRODUÇÃO | 18 |
| 2 OBJETIVOS GERAL E EPECÍFICOS | 20 |
| 2.1 - Objetivo geral | 20 |
| 2.2 - Objetivos específicos: | 20 |
| 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 21 |
| 3.1 O processo de soldagem com arame tubular | 21 |
| 3.1.1 Introdução | 21 |
| 3.1.2 Equipamentos: | 22 |
| 3.1.3 Consumíveis | 24 |
| 3.1.3.1 Arame eletrodo..... | 24 |
| 3.1.3.2 Gás de proteção..... | 25 |
| 3.1.4 Tipo de Transferência Metálica. | 26 |
| 3.1.4.1 Transferência por curto-circuito. | 27 |
| 3.1.4.2 Transferência Globular | 28 |
| 3.1.4.3 Transferência goticular ou por spray..... | 28 |
| 3.1.4.4 Transferência goticular pulsada. | 29 |
| 3.1.5 Parâmetros de soldagem | 29 |
| 3.1.5.1 Tensão | 29 |
| 3.1.5.2 Corrente | 29 |
| 3.1.5.3 Extensão do eletrodo..... | 29 |
| 3.1.6 Aplicação na indústria..... | 30 |
| 3.2 Regiões da Solda por Fusão..... | 30 |
| 3.2.1 Zona Fundida | 30 |
| 3.2.2 Zona Afetada pelo Calor..... | 30 |

| | |
|---|----|
| 3.3 Inclusões não metálicas | 31 |
| 4. MATERIAIS E MÉTODOS..... | 33 |
| 4.1 Materiais | 33 |
| 4.2 Equipamentos | 33 |
| 4.2.1 Preparação e análise das amostras | 33 |
| 4.2.2 Soldagem | 35 |
| 4.3 Metodologia..... | 36 |
| 4.3.1 Etapa 1: Revisão bibliográfica..... | 37 |
| 4.3.2 Etapa 2: Ensaio preliminares..... | 37 |
| 4.3.3 Etapa 3 - Soldagem de amanteigamento..... | 37 |
| 4.3.4 Etapa 4 - Soldagem definitiva..... | 38 |
| 4.3.5 Etapa 5 - Caracterização | 40 |
| 4.3.5.1 - Geometria dos cordões e cálculo da diluição | 40 |
| 4.3.5.2 - Microestrutura e perfil de dureza | 41 |
| 4.3.5.3 - Quantificação das inclusões da zona fundida..... | 42 |
| 4.3.5.4 Rendimento da soldagem..... | 45 |
| 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 47 |
| 5.1 – Análises de composição química e resumo da soldagem | 47 |
| 5.2 Destacabilidade da escória:..... | 50 |
| 5.3 Aspecto superficial do cordão..... | 52 |
| 5.4 Geometria do cordão e diluição | 54 |
| 5.5 Microestrutura..... | 60 |
| 5.5.1 Metal base..... | 60 |
| 5.5.2 Zona Fundida (ZF)..... | 60 |
| 5.5.3 Zona Afetada pelo Calor (ZAC) | 63 |
| 5.5.3.1 ZAC GG..... | 63 |
| 5.5.3.2 ZAC GF | 64 |

| | |
|--|----|
| 5.5.3.2 ZAC intercristica | 66 |
| 5.6 Rendimento..... | 66 |
| 5.7 Microdureza..... | 69 |
| 5.8 Análise das inclusões..... | 71 |
| 6 - CONCLUSÃO..... | 80 |
| 7- SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS | 81 |
| 8 - REFERÊNCIAS | 82 |

1 INTRODUÇÃO

A soldagem é um processo de fabricação que visa unir, revestir ou recuperar componentes. Este processo pode ser classificado pelo tipo de fonte de energia ou pelo tipo de união (WAINER, 1992).

O processo de soldagem por arco elétrico teve início no começo do século XX com a utilização de arames nus, que geravam arcos instáveis e uma solda de baixa qualidade (WAINER, 1992). Ao passar do tempo se percebeu que o revestimento melhorava a qualidade dos depósitos de solda e daí surgiu o eletrodo revestido, que é o processo mais utilizado atualmente, devido a seu baixo custo e grande versatilidade metalúrgica e operacional. Apesar disso, o eletrodo revestido possui baixa produtividade quando comparado com outros processos de soldagem a arco elétrico, tais como arco submerso, MIG/MAG e arame tubular, sendo essa sua principal limitação (MARQUES, MODENESI e BACARENSE, 2005).

Na metade da década de 1930, um processo de soldagem se desenvolveu e mudou os conceitos de produtividade. Ele é utilizado até hoje e se trata do arco submerso, onde um eletrodo nu, recoberto por uma camada de fluxo granular e fusível, produz um arco elétrico com a peça (MACHADO, 1996). O fluxo tem a função de proteger o metal da contaminação atmosférica e, em alguns casos, contribui para as características metalúrgicas do metal de solda. É um processo com elevada taxa de deposição, pois utiliza altas intensidades de corrente (até 2000 A). Contudo, o grande problema do arco submerso é a limitação da posição de soldagem, que se restringe a posição plana, caso contrário o fluxo não se sustentaria.

Apesar de existirem registros datados de 1926, a consolidação do processo MIG/MAG na indústria, ocorreu no final da década de 1940, sendo utilizado na soldagem de alumínio com proteção de gás inerte, argônio (MACHADO, 1996). Mesmo sendo um processo altamente produtivo, o MIG/MAG apresenta limitações quando se trata de soldagem em campo, pois a proteção do arco é feita por um fluxo gasoso externo, sendo este sensivelmente afetado por correntes de ar, característicos de ambientes expostos. Outra limitação está no caráter metalúrgico do processo, tendo em vista que utiliza como eletrodo, arames maciços e nus, limitando a composição química da zona fundida aos elementos presentes no arame e no metal base. Diferente do que acontece no eletrodo revestido e no arco submerso, que podem adicionar elementos de liga na poça de fusão, por meio do revestimento ou do fluxo, respectivamente.

O arame tubular é um processo que alia a versatilidade metalúrgica, bem como a capacidade de operar em campo do eletrodo revestido, com a alta taxa de deposição e excelente rendimento, portanto, grande produtividade do MIG/MAG. Tudo isso sem o ônus da limitação

da posição de soldagem presente no arco submerso. Contudo, existem limitações nesse processo e a principal delas é a presença de inclusões advindas do fluxo, que compromete sua aplicação em soldagens ditas de responsabilidade, pois as inclusões afetam a tenacidade.

As fortes rajadas de vento, as quais plataformas marítimas estão submetidas, torna o processo de soldagem nesse ambiente desafiador, mesmo com auxílio de anteparos. Da mesma forma, construir grandes estruturas metálicas como linhas de transmissão de energia ou pontes, exige um processo de soldagem que alie produtividade com a capacidade de operar em ambientes sujeitos a correntes de ar. O grande porte das construções e reparos realizados em estaleiros, praticamente inviabiliza a utilização de edifícios industriais, tornando comum a realização de soldagens em locais abertos.

Os prazos de produção, cada vez mais reduzidos, demandam processos com alta produtividade e a complexidade dos equipamentos soldados, aliada às adversidades do clima, exigem grande operacionalidade do processo. Desse modo, o arame tubular se encaixa perfeitamente nos requisitos das indústria naval, de exploração de petróleo e construção civil.

Muitos estudos relacionam a influência do vento e dos parâmetros de soldagem com as propriedades da solda, porém pouco se estudou sobre os efeitos desses parâmetros na presença de inclusões na zona fundida. Portanto, esse trabalho tem o objetivo de iniciar um estudo sobre a influência dos parâmetros citados, na presença dessas inclusões, bem como avaliar os efeitos, sobre as características geométricas (largura, penetração e reforço) e rendimento da solda.

2 OBJETIVOS GERAL E EPECÍFICOS

2.1 - Objetivo geral

Avaliar o desempenho do arame tubular auto protegido AWS E71T-11, considerando as alterações de parâmetros de soldagem e a ação do vento sobre as características da solda.

2.2 - Objetivos específicos:

- Avaliar o efeito de correntes de ar em eventuais inclusões e propriedades do cordão de solda
- Avaliar os efeitos de soldagem sobre as alterações microestruturais
- Analisar os efeitos dos parâmetros de soldagem sobre alterações na dureza dos cordões de solda.

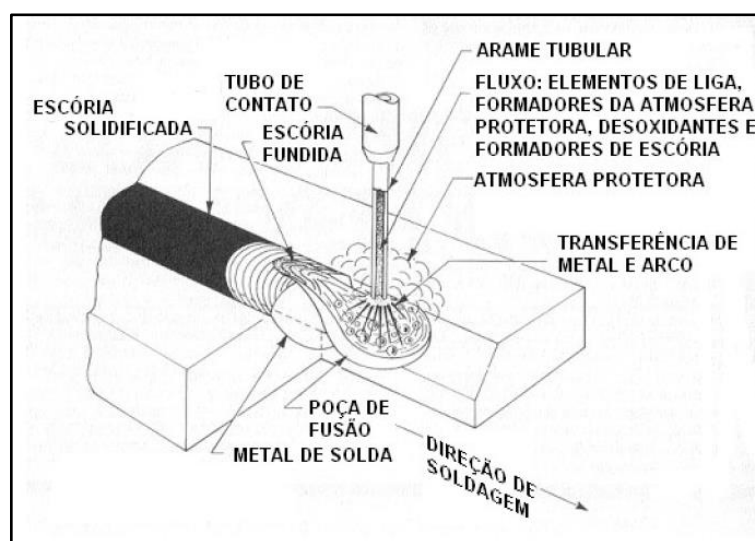
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 O processo de soldagem com arame tubular

3.1.1 Introdução

Soldagem a arco com arame tubular, no inglês Flux-Cored Arc Welding (FCAW), é um processo em que o arco elétrico se forma entre a peça e um tubo metálico preenchido por um fluxo fusível. O eletrodo é alimentado continuamente a partir de uma bobina (MACHADO, 1996). A proteção do arco e do cordão se dá pelos gases gerados, oriundos da queima do fluxo contido no interior do arame e pode ser suplementada por um fluxo gasoso, fornecido por uma fonte externa (ORDÓÑEZ, 2004). A poça de fusão nesse processo, é envolvida por escória e gases provenientes da decomposição do fluxo (MACHADO, 1996). Além de proteger, o fluxo pode adicionar elementos de liga, desoxidar e refinar o metal de solda, além de estabilizar o arco (MARQUES, MODENESI e BACARENSE, 2005). A Figura 1 apresenta um esquema da soldagem por arame tubular auto protegido.

Figura 1 - processo de soldagem com arame tubular.



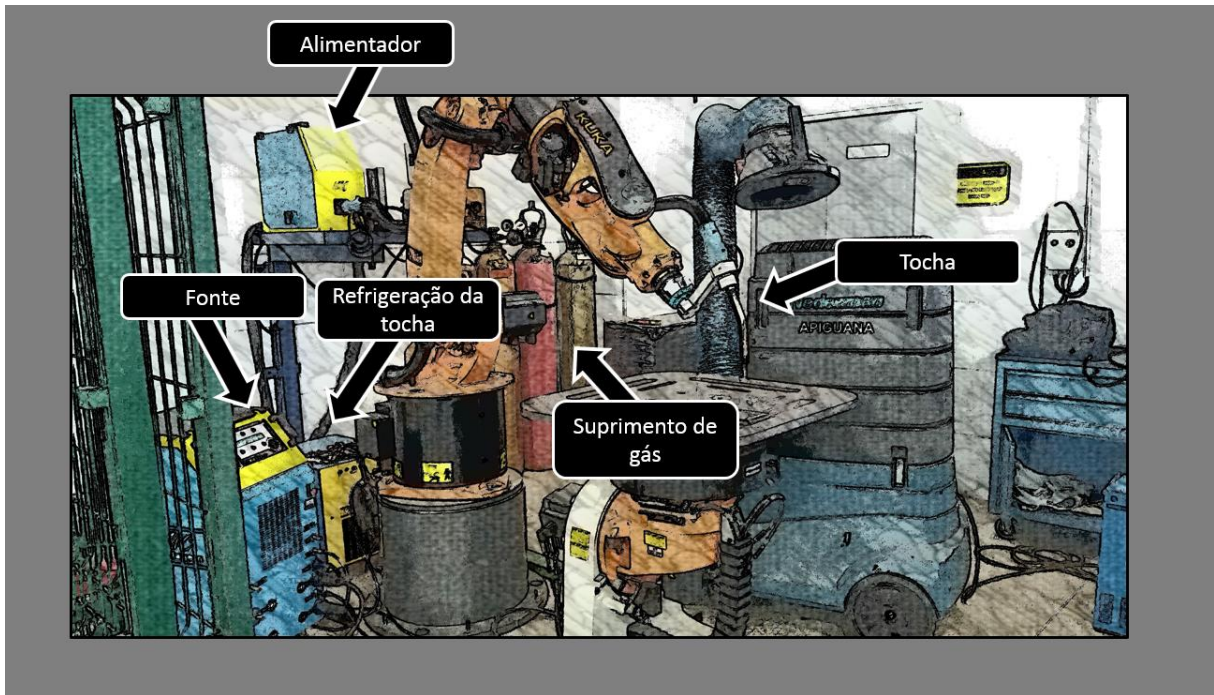
Fonte: (FORTES e ARAÚJO, 2004)

Por fim, essa técnica possui como vantagens a versatilidade metalúrgica e operacional, alta produtividade e possibilidade de automação integral do processo, porém, tem como desvantagens, a produção de escórias, liberação de fumos metálicos devido à queima do fluxo e presença de inclusões no metal de solda.

3.1.2 Equipamentos:

O equipamento utilizado nesse processo (Figura 2) é constituído basicamente de uma fonte de energia, alimentador de arame, tocha de soldagem, sistema de refrigeração da tocha e, em alguns casos, fonte de gás protetor.

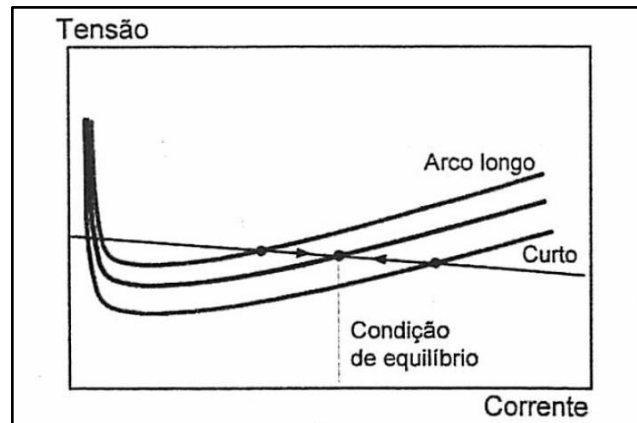
Figura 2 - Equipamentos do processo arame tubular.



Fonte: autor.

As fontes são geralmente do tipo transformador retificador e na maioria das vezes a soldagem é realizada com corrente contínua. Ela pode operar no modo tensão constante ou corrente constante. No primeiro caso o alimentador mantém a velocidade de alimentação do arame constante. A medida que ocorrem oscilações no comprimento do arco a tensão varia um pouco e a corrente se altera de forma significativa, mudando a taxa de fusão, de modo a reestabelecer o comprimento do arco. Esse sistema é de custo relativamente baixo e apresenta bons resultados quando utilizado para arames finos (até 3,2 mm) (MARQUES, MODENESI e BACARENSE, 2005). A Figura 3 apresenta os efeitos na alteração do comprimento do arco em uma fonte de tensão constante.

Figura 3 - Controle interno do arco.



Fonte: (MARQUES, MODENESI e BACARENSE, 2005)

Segundo (MARQUES, MODENESI e BACARENSE, 2005), quando a fonte é de corrente constante, a taxa de fusão é mantida praticamente constante. Nesse caso a velocidade de alimentação é variável e controlada pelo equipamento, de modo a manter o comprimento do arco estável. O controle é feito por comparação entre a tensão do arco com uma tensão de referência e a medida em que for constatada diferença entre as tensões, a velocidade de alimentação é alterada.

Os alimentadores, geralmente utilizam um motor de corrente contínua, fornecem arame em uma velocidade constante e ajustável (MARQUES, MODENESI e BACARENSE, 2005). Dentro do alimentador ficam os roletes (Figura 4) que são componentes responsáveis por tracionar o arame em direção a tocha. Os roletes utilizados para arame tubular possuem canais recartilhados para aumentar o atrito entre o rolete e o arame, evitando usar pressões elevadas sobre o eletrodo, o que poderia amassa-lo, comprometendo sua funcionalidade.

Figura 4 - Rolete com canal recartilhado.



Fonte: autor.

De acordo com (MARQUES, MODENESI e BACARENSE, 2005) a tocha de soldagem é composta basicamente por:

- Punho ou suporte, que possibilite a sustentação de um bico de contato;
- Bico de contato, cuja função é energizar o arame eletrodo.
- Bocal que orienta o fluxo de gás protetor;
- Gatilho para acionamento do sistema.

3.1.3 Consumíveis

Nesse processo, os consumíveis são basicamente arame eletrodo e gás de proteção.

3.1.3.1 Arame eletrodo

Os arames tubulares são classificados pela AWS de acordo com a Tabela 1


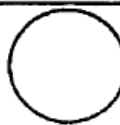
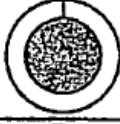
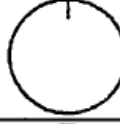

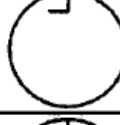






Tabela 1 Especificações AWS para arame tubular

| Especificação | Consumível |
|---------------|---|
| AWS A 5.9 | Arames de aço inoxidável com pó metálico interno |
| AWS A 5.15 | Arames para a soldagem de ferro fundido |
| AWS A 5.18 | Arames tubulares de aço carbono com pó metálico interno |
| AWS A 5.20 | Arames tubulares de aço carbono com fluxo interno |
| AWS A 5.21 | Arames para revestimento |
| AWS A 5.22 | Arames tubulares para soldagem de aço inoxidável |
| AWS A 5.29 | Arames de aços de baixa liga com fluxo interno |

Fonte: adaptado (MARQUES, MODENESI e BACARENSE, 2005)

Os eletrodos podem fabricados a partir de uma fita de aço baixo carbono que é conformada em torno do fluxo em diversas geometrias conforme classificação do IIW (Figura 5). Os arames são fornecidos em bitolas de 0,8 mm até 4,0 mm.

Figura 5 - Geometrias da seção transversal do eletrodo.

| Tipo Nº. | Seção | Símbolo | Descrição |
|----------|---|---|----------------|
| 1 |  |  | Sem costura |
| 2 |  |  | De topo |
| 3 |  |  | Sobreposto |
| 4 |  |  | Dobra simples |
| 5 |  |  | Dobra múltipla |
| 6 |  |  | Dobra dupla |

Fonte: (MARQUES, MODENESI e BACARENSE, 2005).

O fluxo do arame tubular pode ter as seguintes funções, segundo (MACHADO, 1996):

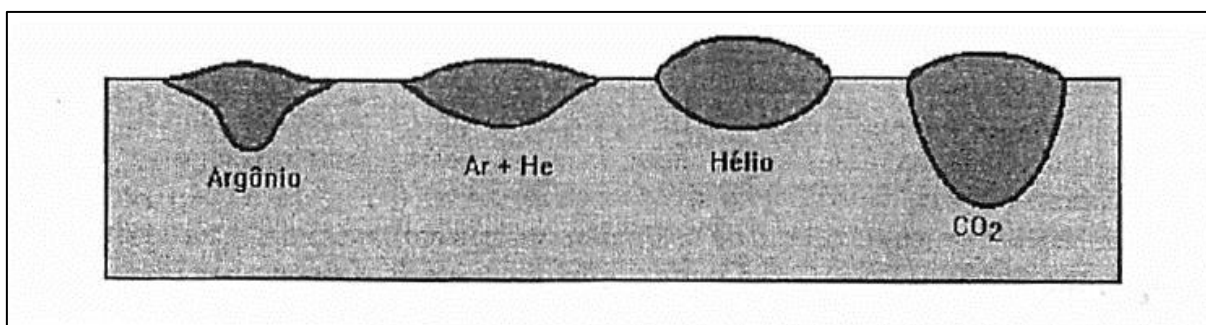
- Desoxidar o metal de solda;
- Formar escória;
- Estabilizar o arco;
- Adicionar elementos de liga;
- Gerar gases (criar atmosfera protetora.)
- Aumentar a taxa de deposição, através do pó de ferro;
- Estabelecer uma conveniente geometria para o cordão.

3.1.3.2 Gás de proteção

Os gases utilizados no arame tubular podem ser inertes (argônio ou hélio), ativos (CO₂) ou uma mistura de ativos e inertes. O tipo de gás exerce influência em diversos fatores, tais como as características do arco e transferência metálica, geometria do cordão de solda (Figura 6), velocidade de soldagem, tendência de aparecer mordeduras e custo operacional

(MARQUES, MODENESI e BACARENSE, 2005).

Figura 6 - Seção transversal típica de cordões feitos com diferentes misturas de gases.



Fonte: (MARQUES, MODENESI e BACARENSE, 2005).

O gás CO_2 proporcionam soldagens com maior penetração, o cordão soldado com gás argônio possui formato do tipo taça com penetração média e o cordão soldado com gás hélio apresenta a menor penetração.

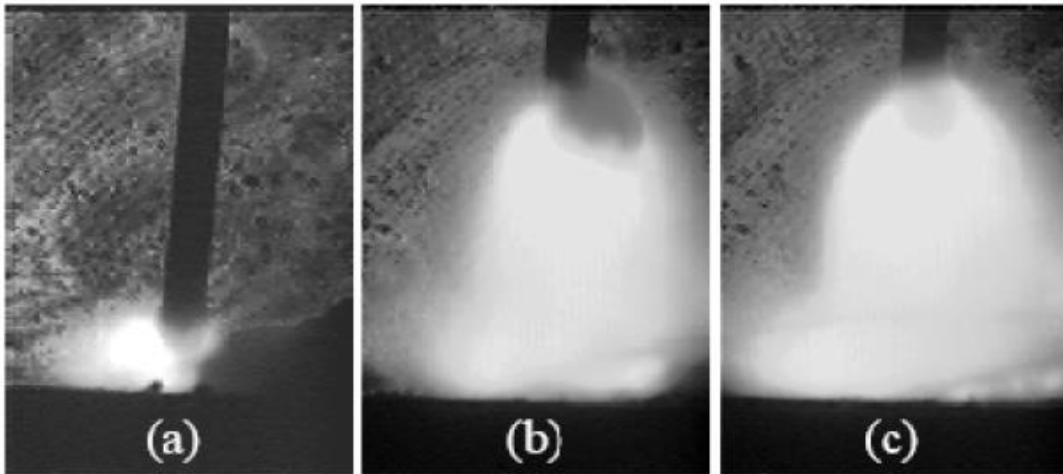
Na soldagem com gás hélio e CO_2 , têm-se maiores quedas de tensão e maior aporte térmico do arco, se comparado com argônio e mantendo a mesma corrente e mesma distância eletrodo/peça, pois eles possuem maior condutividade térmica (MARQUES, MODENESI e BACARENSE, 2005).

3.1.4 Tipo de Transferência Metálica.

A forma como o metal se transfere do eletrodo para a poça de fusão influencia significativamente na solda, podendo gerar níveis de respingos mais ou menos elevados, alterar a penetração do cordão, limitar as posições de soldagem, viabilizar a soldagem em peças de menor espessura, entre outros.

O tipo de transferência metálica é influenciado por diversos fatores, tais como pela intensidade e tipo de corrente (CC ou CA), pela tensão e polaridade do arco, bem como pelo diâmetro, composição química, extensão energizada do eletrodo (“stickout”) e pelo tipo de gás utilizado (MARQUES, MODENESI e BACARENSE, 2005). Existem basicamente, três tipos de transferência metálica: curto circuito, globular, goticular. Figura 7 é uma imagem real dos tipos de transferência.

Figura 7 - tipos de transferência metálica. (a) curto-circuito, (b) globular e (c) goticular.



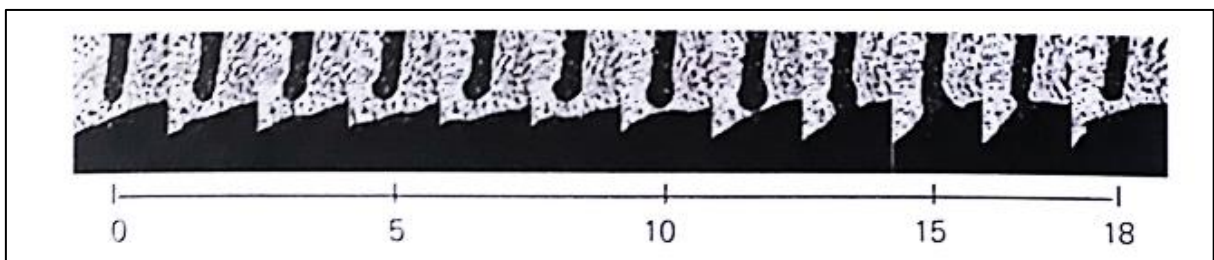
Fonte: (MIRANDA, 2002)

3.1.4.1 Transferência por curto-circuito.

No caso de a velocidade de alimentação do arame exceder a taxa de fusão, ocorrerá contato entre a ponta do eletrodo e a poça de fusão, caracterizando o modo de curto circuito (MACHADO, 1996). Esse tipo de transferência ocorre para valores baixos de tensão e corrente. uma gota se forma na ponta do arame e vai aumentando seu diâmetro até tocar a poça de fusão e o destacamento ocorre pela força da tensão superficial entre a gota e a poça de fusão (MARQUES, MODENESI e BACARENSE, 2005).

Esse tipo de transferência metálica é indicado para soldagem de chapas finas e soldagens fora da posição. A Figura 8 apresenta uma sequência de quadros referentes ao destacamento da gota.

Figura 8 - Destacamento da gota para transferência curto circuito

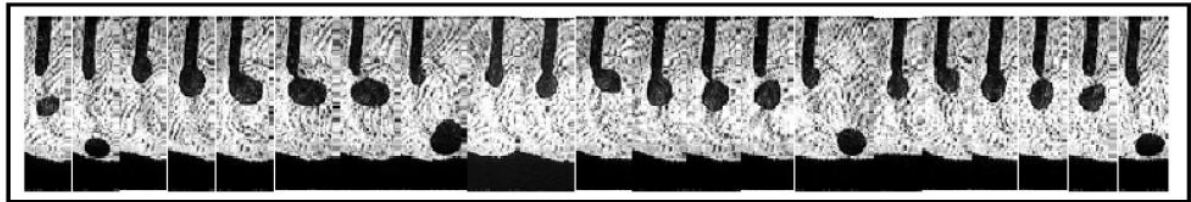


Fonte: (MARQUES, MODENESI e BACARENSE, 2005)

3.1.4.2 Transferência Globular

Ocorre para valores intermediários de tensão e corrente, a soldagem é mais estável que no curto circuito, porém a transferência metálica é mais caótica. O diâmetro da gota é em geral superior ao diâmetro do eletrodo e varia inversamente com a intensidade de corrente (MARQUES, MODENESI e BACARENSE, 2005). Possui elevado nível de respingos devido o impacto entre a gota e a poça de fusão e a posição de soldagem se restringe a posição plana, pois o destacamento ocorre predominantemente pela ação da gravidade. Na Figura 9 é possível observar esse tipo de transferência.

Figura 9 - Transferência globular

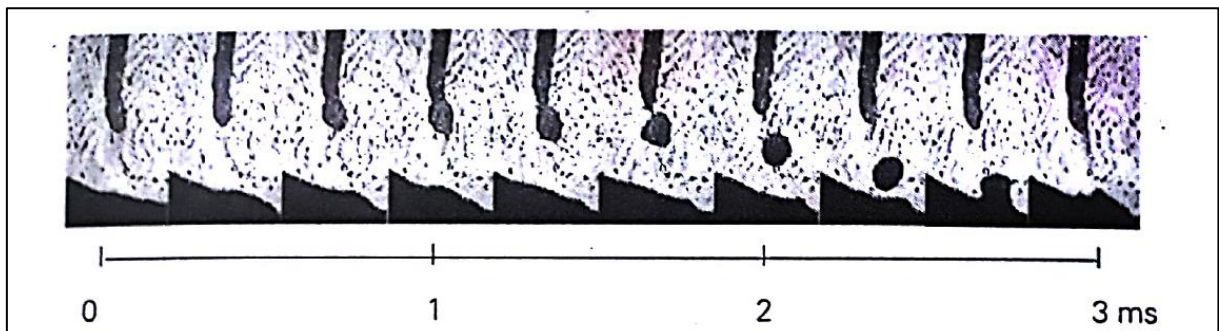


Fonte: (MIRANDA, 2002)

3.1.4.3 Transferência goticular ou por spray.

Ocorre para valores de corrente e tensão maiores que as demais. Gotas pequenas de metal fundido são destacadas da ponta do arame e projetadas em direção a poça de fusão sob a influência de forças eletromagnéticas (Figura 10). Esse tipo de transferência apresenta boa estabilidade do arco, baixo nível de respingos e maior penetração que as demais. Por empregar níveis mais elevados de energia, não é indicado para soldagem de chapas finas nem fora de posição.

Figura 10 - Transferência goticular.



Fonte: (MARQUES, MODENESI e BACARENSE, 2005).

3.1.4.4 Transferência goticular pulsada.

É uma variação da transferência goticular, onde a corrente oscila por pulsos. Desse modo, ora ela está abaixo da corrente de transição e ora ela está acima da corrente de transição. O objetivo desse tipo de transferência é obter uma corrente média inferior que a goticular, resultando em menor aporte térmico, possibilitando soldagem fora da posição e em chapas de menor espessura.

3.1.5 Parâmetros de soldagem

Os parâmetros de soldagem influenciam diretamente nas características do cordão de solda. Os principais parâmetros são a tensão, corrente, polaridade, comprimento energizado do eletrodo, gás protetor, diâmetro do eletrodo e velocidade de soldagem.

3.1.5.1 Tensão

A tensão de soldagem afeta o comprimento do arco, o modo de transferência metálica e a geometria do cordão. Tensões elevadas aumentam a largura do cordão e a tendência de respingos (MARQUES, MODENESI e BACARENSE, 2005).

3.1.5.2 Corrente

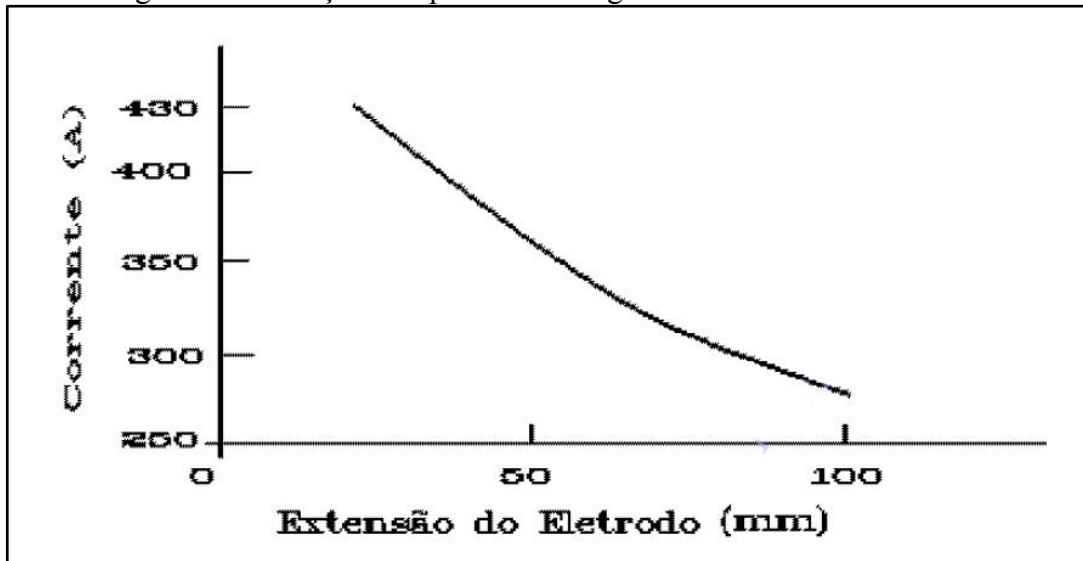
A corrente tem relação direta com a penetração, afeta o modo de transferência metálica e a taxa de deposição (MACHADO, 1996).

3.1.5.3 Extensão do eletrodo

É a extensão energizada do eletrodo, ou seja, é a região que inicia onde ocorre o contato elétrico, geralmente no bico de contato, e se encerra na ponta do eletrodo. Quanto maior é o stickout maior será o aquecimento do arame por efeito joule e menor corrente será necessária para fundir o arame mantendo as demais variáveis inalteradas.

A Figura 11, apresenta a relação entre a corrente e o comprimento de eletrodo energizado.

Figura 11 – Relação comprimento energizado do eletrodo e corrente.



Fonte: (MACHADO, 1996)

3.1.6 Aplicação na indústria

O processo de soldagem com arame tubular, por possuir versatilidade operacional e metalúrgica, dispõe de um amplo campo de aplicação que passa pelas indústrias naval e nuclear, pela construção de plataformas marítimas e na construção de componentes e estruturas de aço.

3.2 Regiões da Solda por Fusão

3.2.1 Zona Fundida

É a região da solda onde ocorreu a fusão do metal, portanto, é caracterizada por temperaturas de pico superior a temperatura de fusão do material.

3.2.2 Zona Afetada pelo Calor

A zona afetada pelo calor (ZAC), é a região do substrato que não fundiu, porém sofreu transformações metalúrgicas relevantes como transformações de fases, precipitação de carbonetos, etc. Ela pode ser subdividida em três regiões:

- ZAC de grão grosseiro, junto à linha de fusão que é submetida à uma temperatura de pico superior a 1200°C. Nela o grão austenítico cresce e a microestrutura resultante irá depender da taxa de resfriamento e da composição química do metal base (MODENESI, MARQUES e SANTOS, 2012).

- ZAC de grão fino: é a região onde a temperatura é inferior a 1200°C e superior a temperatura de início de decomposição da austenita, que varia com o teor de carbono do aço (MODENESI, MARQUES e SANTOS, 2012).
- ZAC intercrítica: essa é a região da ZAC onde a temperatura é acima da eutetóide e não supera os limites do campo bifásico ($\alpha+\gamma$). Para aços hipoeutetóides, perlita presente no metal base se decompõe e os carbonetos tendem a se rearranjar na matriz ferrítica.

3.3 Inclusões não metálicas

Inclusões são partículas não metálicas incorporadas à matriz de metais e ligas e, de forma geral, elas são consideradas prejudiciais, às propriedades dos aços. Dentre as mais prejudicadas estão a resistência a fadiga, tenacidade e trabalhabilidade a quente. Os principais fatores das inclusões podem ser classificados da seguinte forma (GHOSH, 2001):

- Fatores geométricos: tamanho, forma e volume total das inclusões;
- Fatores de propriedade: Deformabilidade e módulo de elasticidade `várias temperaturas, coeficiente de dilatação térmica.

Segundo (GHOSH, 2001), A interface da inclusão com a matriz pode gerar um concentrador de tensão e a aplicação de forças externas durante o serviço podem nuclear e propagar micro trincas, porém, existe um tamanho crítico que abaixo dele, as inclusões apresentam benefícios, como refino de grão, aumento no limite de resistência e dureza.

As impurezas mais comuns encontradas nos aços são fósforo, enxofre, manganês, silício e alumínio. Essas impurezas reagem entre si ou com elementos não metálicos como o oxigênio e o nitrogênio, dando origem as inclusões não metálicas (CHIAVERINI, 2008). Essas inclusões podem ser benéficas ou malélicas ou indiferentes, dependendo do tipo de inclusão e da aplicação do aço.

Segundo (CHIAVERINI, 2008), o alumínio, silício, enxofre e manganês, formam a maioria das inclusões não metálicas. Elas podem ser classificadas como endógenas ou exógenas. As endógenas são originadas na elaboração do aço ou no processo de solidificação e são geralmente causadas pela presença do enxofre e oxigênio, dando origem aos sulfetos, óxidos, silicatos e aluminatos. As inclusões exógenas são provenientes de fontes externas como escória, produtos de corrosão ou erosão.

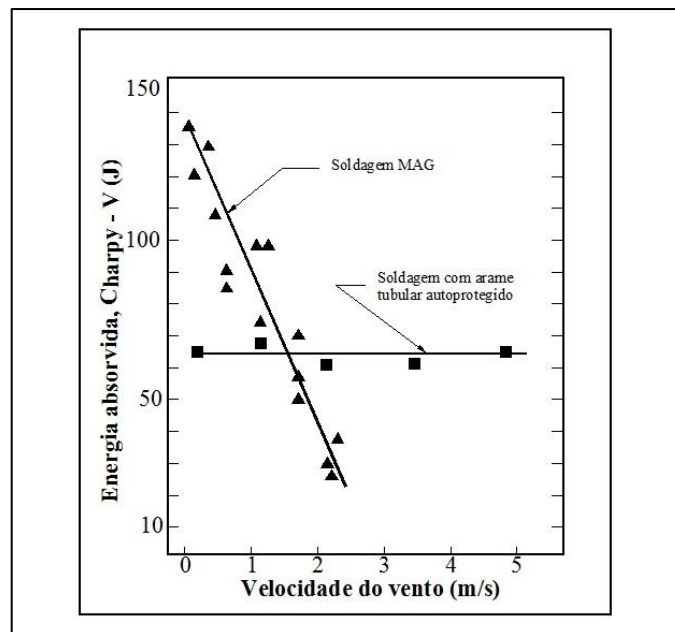
No processo de conformação do aço as inclusões se comportam de forma particular. Os sulfetos e silicatos tendem a se alongar no sentido da conformação, sendo que na extremidade daqueles se forma uma ponta arredondada, enquanto nestes a ponta é agulhada. Essas características afetam na tenacidade do material, tendo em vista que inclusões com a ponta agulhada geram concentradores de tensão.

As inclusões de alumínio se fragmentam em partículas menores durante a conformação, não sendo danoso ao aço.

O fósforo possui limites de tolerância rigorosos no aço, pois ele reduz a solubilidade do carbono na austenita e gera um fenômeno conhecido como textura “ghost lines”, caracterizada por estrias de ferrita com a perlita se agrupando nas beiradas dessas faixas (CHIAVERINI, 2008).

Nos processos de soldagem que utilizam fluxo ou revestimento, as inclusões não metálicas são comuns no metal de solda e elas afetam diretamente na tenacidade do cordão. Portanto, processos que não utilizam fluxo são mais vantajosos nesse quesito. Porém, quando se trata de soldagem sob influência de correntes de ar aqueles processos se tornam mais estáveis do que estes. A Figura 12, apresenta um comparativo entre a energia de impacto absorvida por cordões soldados com MAG e arame tubular sob influência de correntes de ar.

Figura 12 – Comparativo entre a tenacidade de cordões soldados com processo MAG e Arame Tubular autoprotégido, sob influência de correntes de ar.



Fonte: desconhecida

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais

Os materiais utilizados nesse trabalho estão divididos em metal de adição e metal base.

a) Metal de adição:

O metal de adição utilizado neste trabalho foi o eletrodo classe AWS 5.20 E71T-11 com 1,6 mm de diâmetro e sua composição química está apresentada na tabela Tabela 2.

Tabela 2 - Composição química do metal de adição.

| Elemento | C | Si | Mn | P | S | Al |
|-------------|------|-----|------|------|------|------|
| Máximo (%w) | 0,30 | 0,6 | 1,75 | 0,03 | 0,03 | 1,80 |

Fonte: AWS.

b) Metal base:

A soldagem foi realizada em chapas de aço ASTM A36 cuja composição química está apresentada na tabela Tabela 3.

Tabela 3 – Composição Aço ASTM A36.

| Elemento | C | Si | Mn | P | S |
|-------------|------|-----|------|------|------|
| Máximo (%w) | 0,25 | 0,4 | 1,35 | 0,03 | 0,03 |

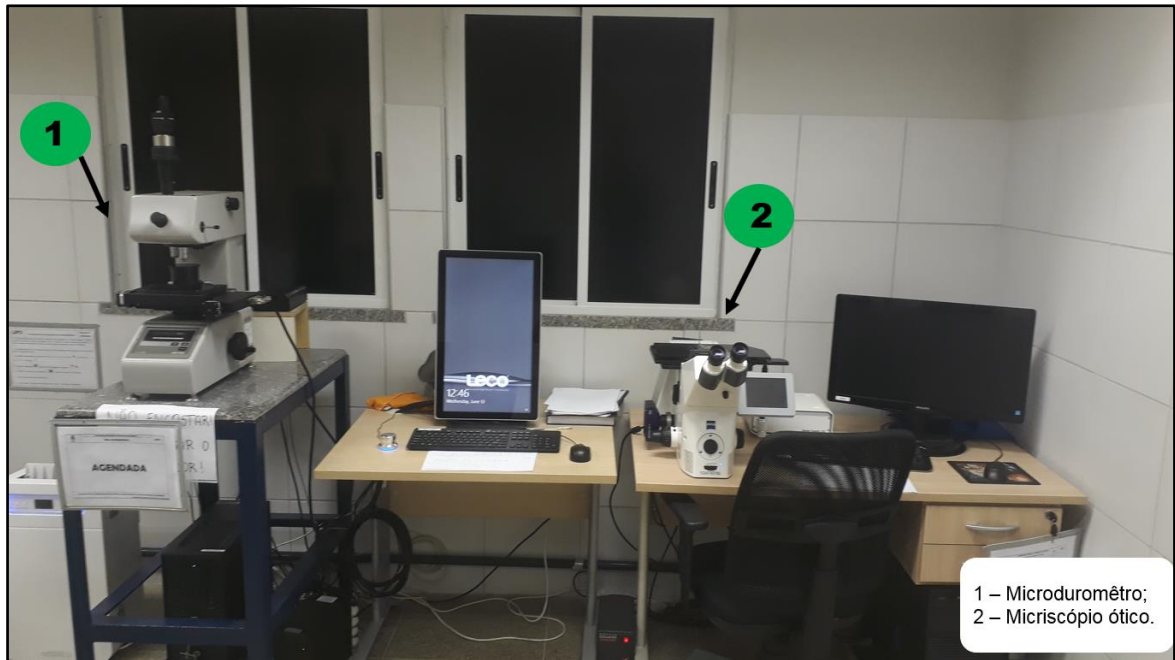
Fonte: ASTM.

4.2 Equipamentos

4.2.1 Preparação e análise das amostras

- Serra de fita;
- Esmerilhadeira;
- Balança digital de precisão;
- Politriz;
- Microscópio ótico, Figura 13;
- Microdurômetro automático LECO AMH55, Figura 13;
- Espectrômetro de emissão ótica Shimadzu PDA-7000
- Microscópio Eletrônico de Varredura, Figura 14.
- Durômetro HPO 250

Figura 13 - Microdurômetro automático e microscópio ótico.



Fonte: autor.

Figura 14 - microscópio eletrônico de varredura.



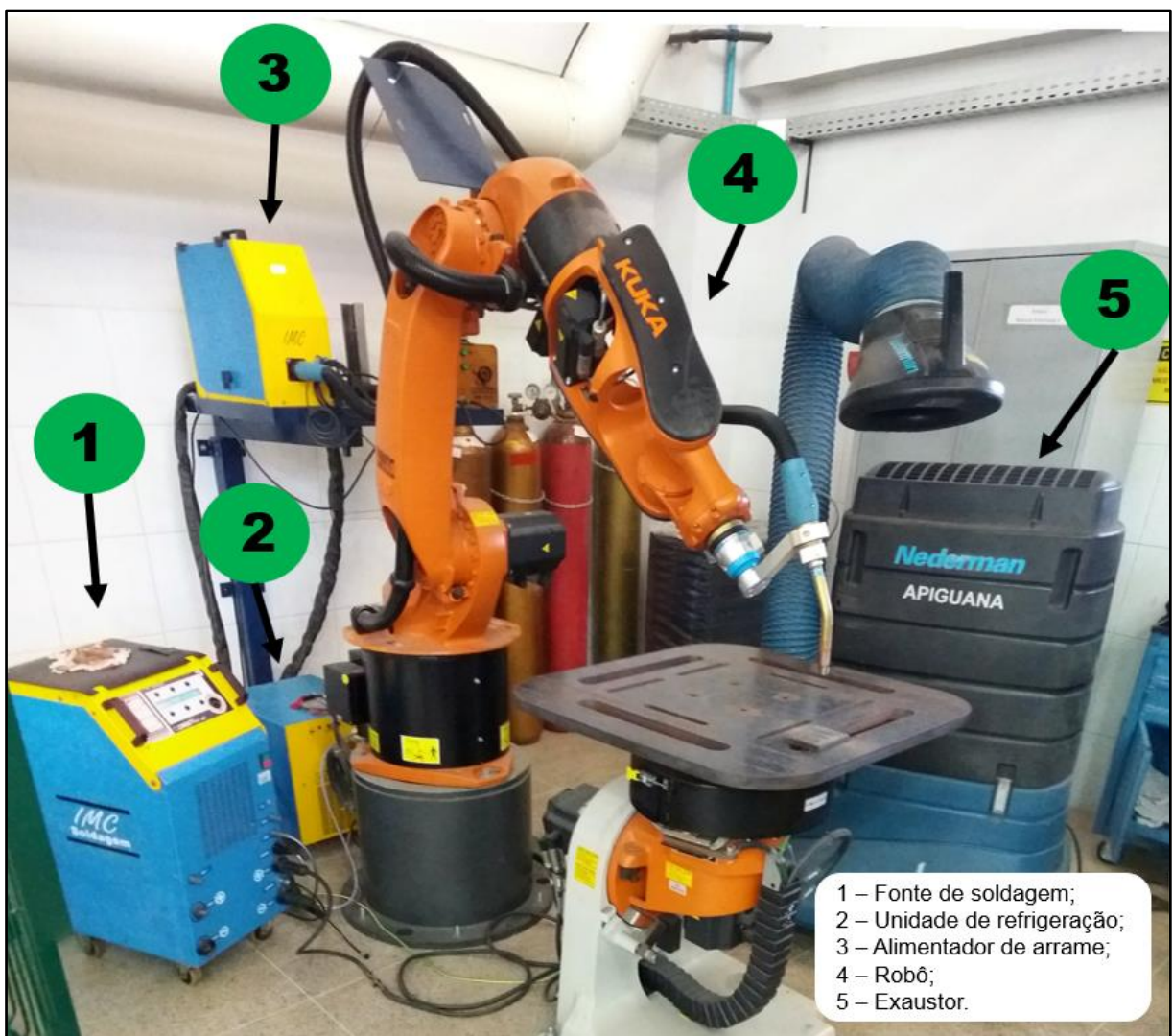
Fonte: autor.

4.2.2 Soldagem

Os equipamentos utilizados na soldagem foram:

- Fonte de soldagem;
- Robô industrial Kuka KR 16 arc HW;
- Sistema portátil de monitoração de processos de soldagem.;
- Anemômetro digital portátil TAR-176;
- Ventilador de coluna.

Figura 15 - Bancada de soldagem.

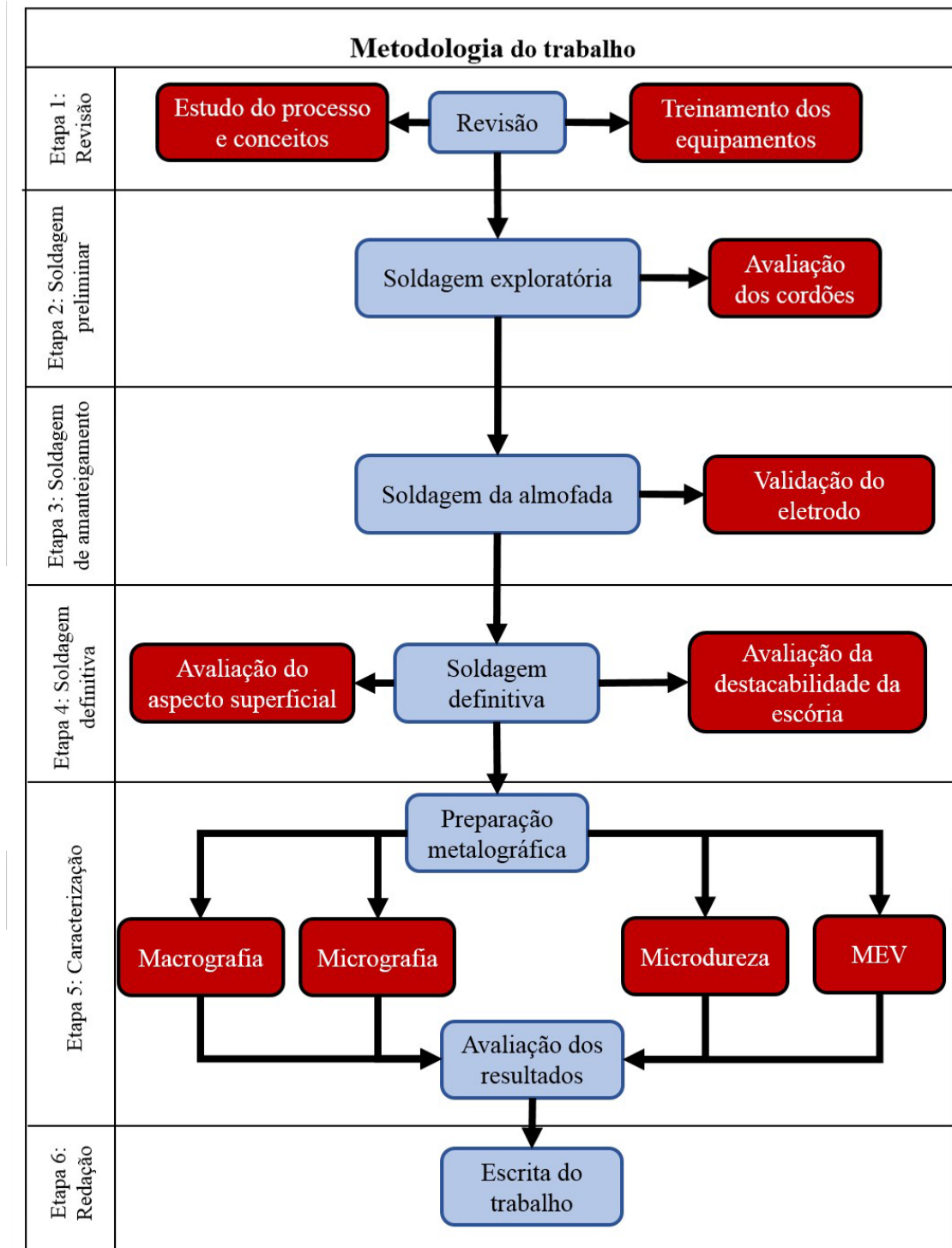


Fonte: autor.

4.3 Metodologia

Para este trabalho foi utilizado o processo de soldagem arame tubular auto protegido, com tensão constante e polaridade direta. A metodologia está apresentada na Figura 16

Figura 16 - Fluxograma do trabalho



Fonte: autor.

4.3.1 Etapa 1: Revisão bibliográfica

Nesta etapa do trabalho, foram revisados os conceitos dos processos de soldagem, bem como os de metalurgia da soldagem. Ainda na revisão, foi reservado um tempo para treinamento operacional nos equipamentos.

4.3.2 Etapa 2: Ensaio preliminares

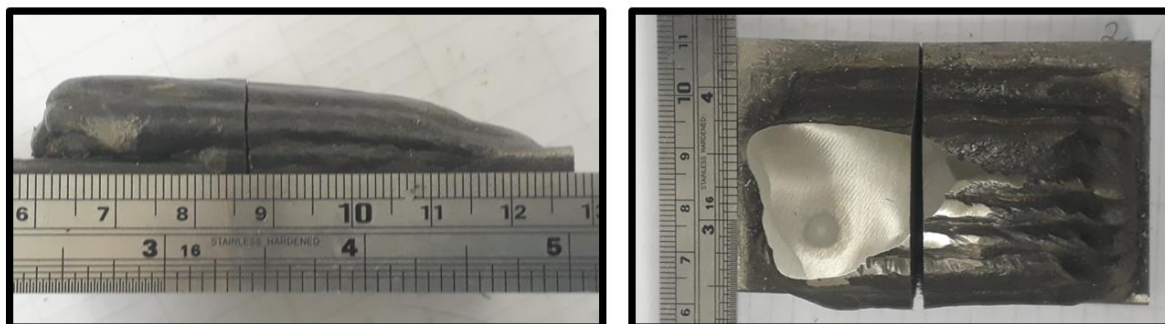
A princípio, foram testados parâmetros baseados no datasheet do fabricante. Dessa forma, foram soldados alguns cordões no modo tensão constante e polaridade direta. Durante a soldagem, foram observados a estabilidade do arco e o nível de respingos.

Por fim, verificou-se que as soldagens realizadas com uma tensão de 23 V, velocidade de soldagem de 0,30 m/min, DBCP de 20 mm e velocidade de alimentação do arame de 4 m/min apresentaram boa estabilidade e nível de respingos aceitável. A soldagem definitiva foi realizada baseada nesses parâmetros.

4.3.3 Etapa 3 - Soldagem de amanteigamento

Após as soldagens preliminares, fez-se uma soldagem de amanteigamento. A Figura 17 mostra a almofada soldada. Por fim, realizou-se uma análise de composição química no topo da mesma.

Figura 17 – Almofada de solda.



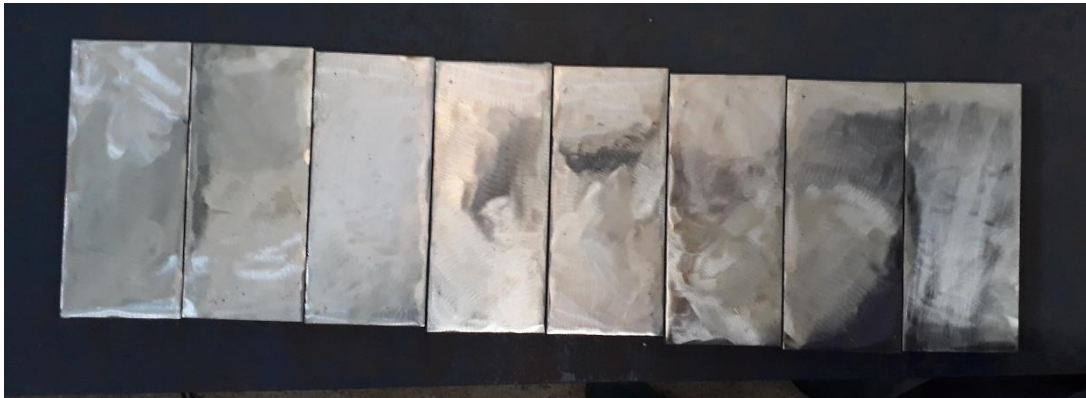
Fonte: autor.

. Após analisar a composição química do metal adicionado e verificar que esse realmente se tratava do eletrodo AWS E71T-11, foi dado prosseguimento ao trabalho.

4.3.4 Etapa 4 - Soldagem definitiva.

Oito chapas de aço ASTM A36 com dimensões de 160 mm x 75 mm x 12,7 mm foram cortadas e esmerilhadas para remoção de óxidos e sujeira. Por fim as chapas foram pesadas. A Figura 18 apresenta as chapas usadas na soldagem definitiva.

Figura 18 - Chapas usadas na soldagem definitiva.



Fonte: autor.

A soldagem ocorreu com a variação da valim e da DBCP . Também foram soldados cordões com e sem a presença de vento. Os valores da velocidade do vento foram medidos antes de cada soldagem com o auxílio de um anemômetro conforme Figura 19. A Figura 20 apresenta o desenho esquemático da simulação de correntes de ar.

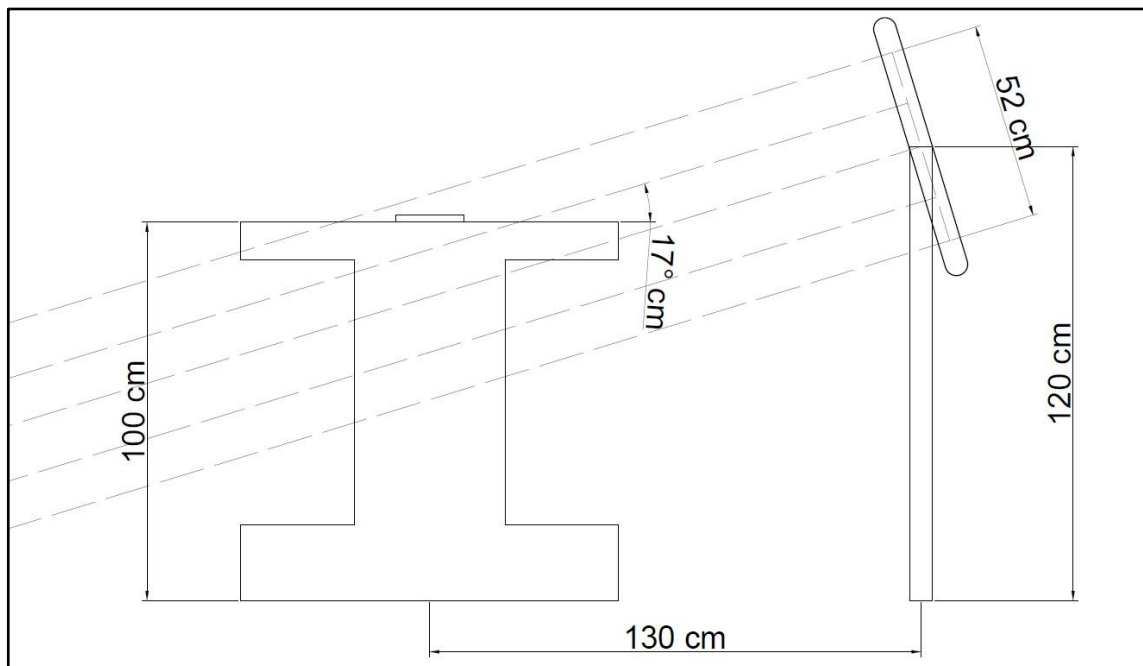
Figura 19 - Medição da velocidade do vento.



Fonte: autor.

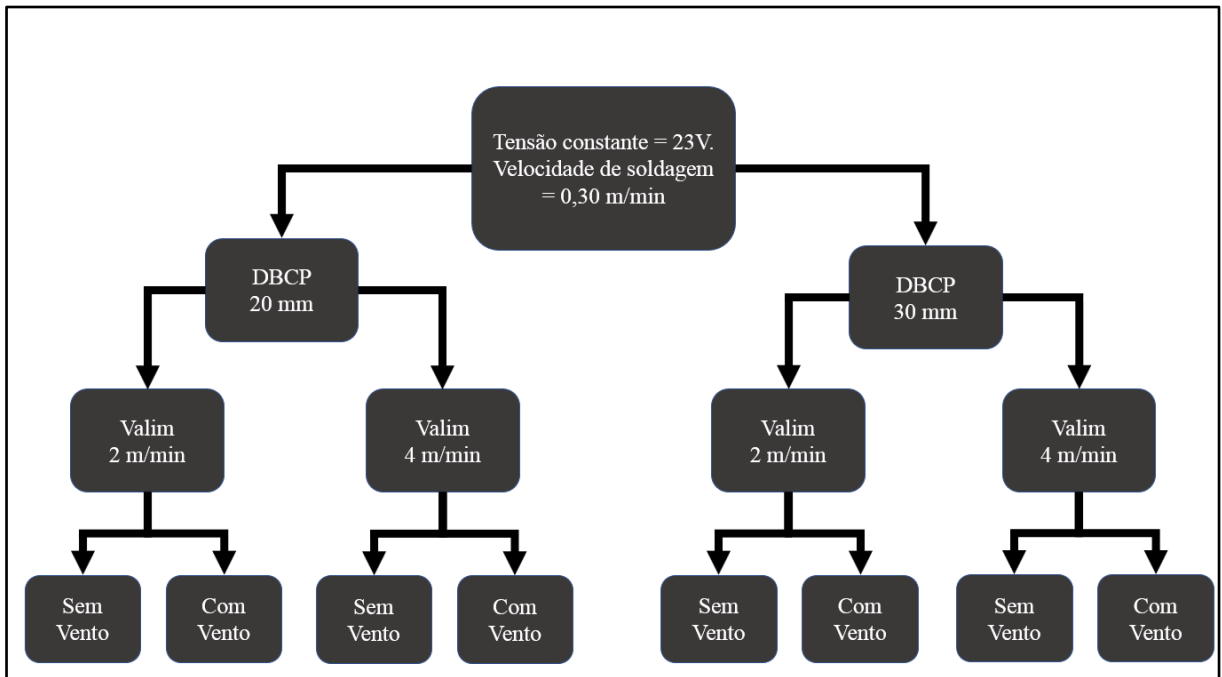
Durante a soldagem, os sinais de corrente e tensão foram registrados via sistema portátil de monitoração de processos de soldagem. A Figura 21 ilustra o procedimento de soldagem.

Figura 20 - Esquema simplificado da simulação de correntes de ar.



Fonte: autor.

Figura 21 - Fluxograma da soldagem definitiva.



Fonte: autor.

Após a soldagem, os cordões foram limpos com escova de cerdas de aço para avaliar a destacabilidade da escória e em seguida com escova rotativa. Por fim, as chapas soldadas foram pesadas.

4.3.5 Etapa 5 - Caracterização

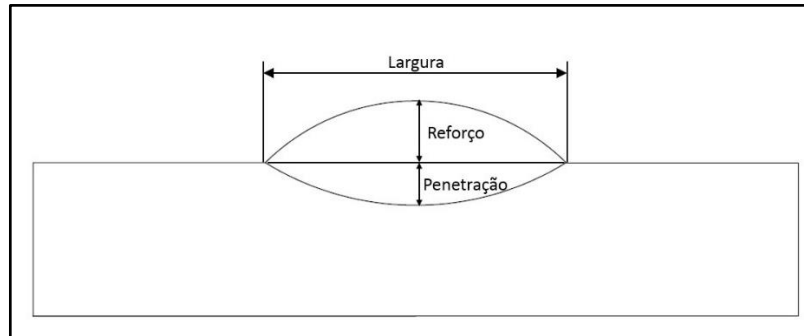
Foram retiradas de cada cordão duas amostras, uma no início e outra no final. As amostras foram lixadas com lixas de granulometria variada de 80 a 1200 mesh, polidas com alumina de 1 μ m e 0,05 μ m e atacadas com nital 2%.

4.3.5.1 - Geometria dos cordões e cálculo da diluição

Foram tiradas fotos de cada amostra após o ataque para avaliação da geometria do cordão e cálculo da diluição.

Os valores da largura, reforço e penetração foram medidos utilizando um software de imagem da forma exemplificada na Figura 22.

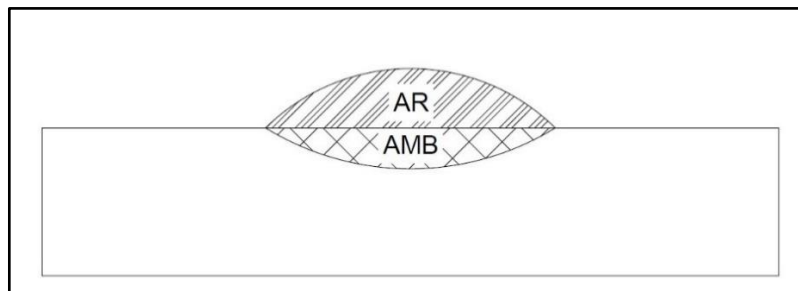
Figura 22 - Geometria do cordão de solda.



Fonte: autor.

Foi medida a área da zona fundida no metal base e área total da zona fundida via software de análise de imagens. A *Figura 23* mostra as regiões consideradas para o cálculo da diluição. A diluição de cada amostra foi calculada segundo a equação 1.

Figura 23 - Regiões para cálculo da diluição.



Fonte: autor.

$$D\% = \frac{AMB}{(AR+AMB)} \times 100 \quad \text{Eq. 1}$$

Onde: AMB é a área do metal de base fundido;

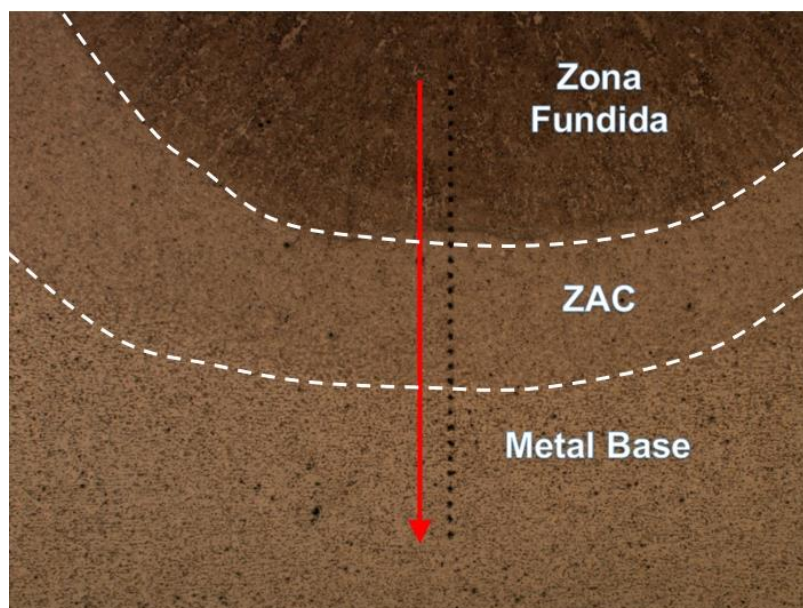
AR é a área do reforço.

4.3.5.2 - Microestrutura e perfil de dureza

A avaliação da microestrutura da ZAC e da zona fundida foi feita por meio de microscopia ótica e microscopia eletrônica de varredura nas amostras previamente Preparadas e atacadas com nital 2%.

Por fim, um ensaio de microdureza Vickers foi realizado nas amostras partindo da zona fundida, passando pela ZAC, até o metal base, Figura 24.

Figura 24 - Perfil de microdureza.



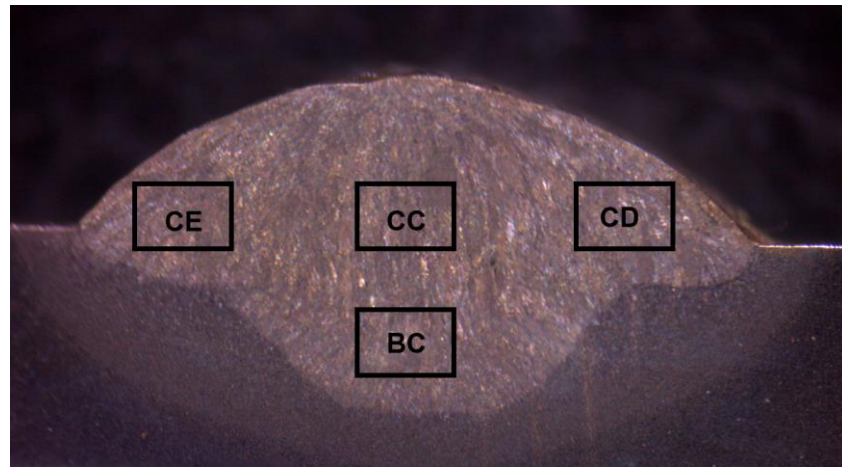
Fonte: autor.

Foi realizado um perfil de microdureza por amostra. A carga aplicada foi de 100gf e tempo de impressão de 15 segundos.

4.3.5.3 - Quantificação das inclusões da zona fundida

Para quantificação das inclusões, as amostras foram lixadas e em seguida polidas com pasta de diamante de 3 μ m e 1 μ m de granulometria. Em seguida, foram testadas algumas combinações de ataque químico, variando o reagente (picral 4% e nital 2%) e os tempos de imersão. Após os testes, constatou-se que as imagens realizadas nas peça apenas polidas, no modo campo claro do microscópio, apresentaram o melhor resultado em termos de contraste. Por fim, foram tiradas imagens de regiões específicas da zona fundida. A Figura 25 apresenta as regiões em que as fotos foram tiradas.

Figura 25 - Regiões de análises das inclusões

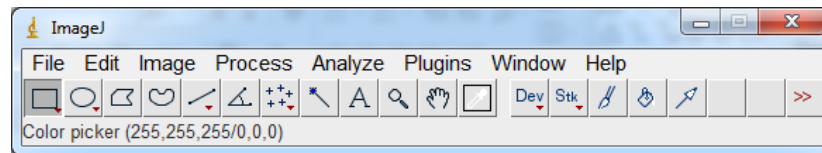


Fonte: autor.

Foram tiradas duas imagens com magnificação de 200x e duas com magnificação de 500x de cada região, totalizando oito imagens de 200x e oito imagens de 500x por amostra.

A quantificação das inclusões foi realizada com o auxílio do software de análise de imagens, ImageJ (Figura 26).

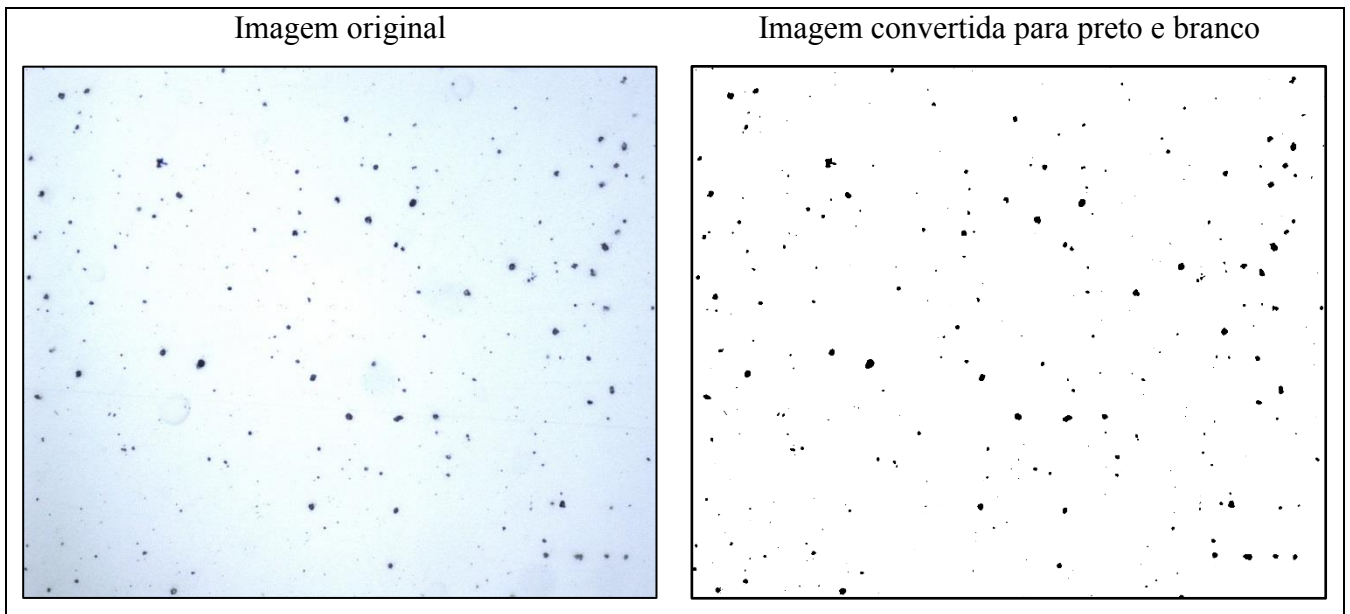
Figura 26 - Software ImageJ.



Fonte: autor.

Para o software conseguir quantificar as inclusões, é necessário converter o modo de cores da imagem original para tons de cinza, em seguida aplica-se um filtro que transforma a imagem de tons de cinza para preto e branco. As imagens foram comparadas visualmente de modo a minimizar os erros, conforme Figura 27. Por fim o software retorna o resultado da quantidade de área preta em relação ao total Figura 28.

Figura 27 – Imagens para avaliação das inclusões.



Fonte: autor.

Figura 28 - Resultado da quantificação.

The screenshot shows a software window titled 'Results' with a menu bar containing 'File', 'Edit', 'Font', and 'Results'. Below the menu bar is a table with two columns: 'Area' and '%Area'. The table contains one row of data: '1 4974312 1.181'.

| | Area | %Area |
|---|---------|-------|
| 1 | 4974312 | 1.181 |

Fonte: autor.

Para a análise qualitativa das inclusões, foi realizada na amostra, um mapa de composição química, usando a técnica de EDS, em um microscópio eletrônico de varredura. Essa técnica faz uma varredura ponto a ponto em uma região previamente selecionada e gera uma imagem que atribui uma cor para cada elemento químico identificado. Dessa forma é possível identificar quais elementos estão presentes nas regiões avaliadas.

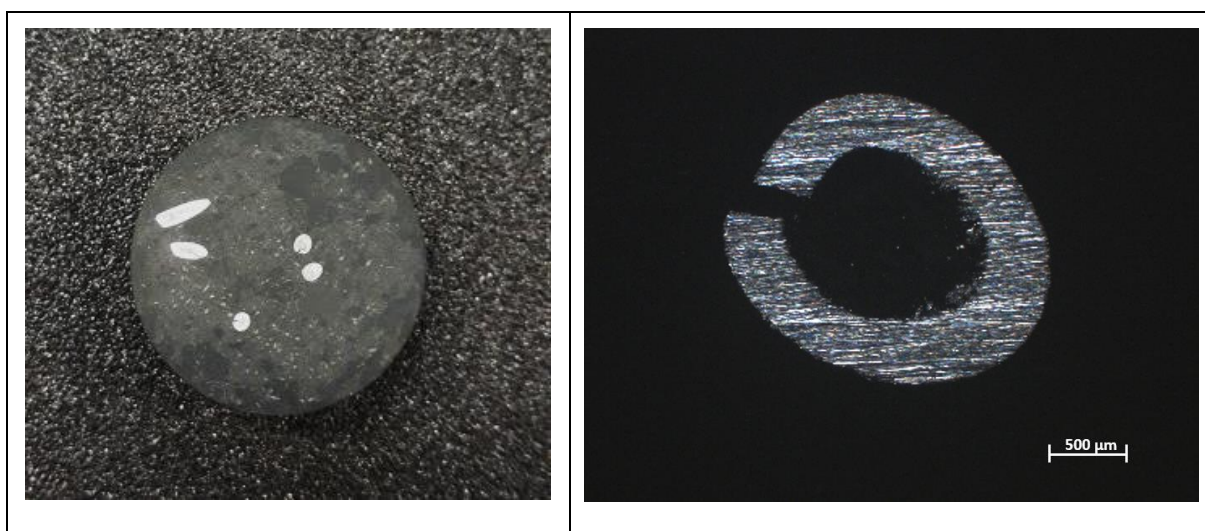
4.3.5.4 Rendimento da soldagem

O rendimento de soldagem foi calculado com base nos seguintes fatores:

- Tempo de arco aberto registrado pelo sistema de aquisição;
- Velocidade de alimentação do arame;
- Área da parede do eletrodo;
- Densidade do aço.

Para calcular a área da parede do eletrodo foram analisadas duas amostras da seção transversal do arame. Essas amostras foram embutidas em baquelite e lixadas (Figura 29). Em seguida fotos foram tiradas via microscópio ótico e a área da parede foi medida por meio do software de imagem ImagePró®.

Figura 29 – Amostras do eletrodo embutidos em baquelite, a esquerda e seção transversal do eletrodo, a direita.



Fonte: autor.

O rendimento calculada nesse trabalho é um valor estimado e tem como finalidade comparar os rendimentos entre os cordões para possibilitar a avaliação da influência dos parâmetros e do vento sob esse resultado.

O rendimento foi calculado de acordo com a equação 2:

$$r = \frac{mc}{mt} \quad \text{Eq. 2}$$

Onde:

- r é o rendimento;
- mt é a massa teórica;
- mc é a massa do cordão.

A massa teórica foi calculada de acordo com a equação 3:

$$m_t = A_a \times v_{alim} \times T_a \times \rho \quad \text{Eq. 3}$$

Onde:

- A_a é a área da parede do arame;
- v_{alim} é a velocidade de alimentação do arame;
- T_a é o tempo de arco aberto;
- ρ é a densidade do aço (7,8 g/cm³).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesse capítulo, serão apresentados e discutidos os resultados obtidos nas análises dos cordões definitivos.

A avaliação qualitativa dos resultados, foi baseada na análise do aspecto superficial do cordão e destacabilidade da escória.

Para a análise quantitativa, avaliou-se o efeito dos parâmetros sobre a geometria dos cordões, diluição, inclusões e rendimento, bem como as durezas da zona fundida, linha de fusão e ZAC. Para avaliar se as variações dos resultados foram realmente influenciadas pelos fatores de controle e não são oriundos de erros de medição, foram realizados testes de hipóteses, onde o valor de probabilidade (valor-p) encontrado, foi comparado com um nível de significância α adotado. Para todos os efeitos que obtiveram valor p inferior a α , foram gerados gráficos de intervalo. Para as análises estatísticas realizados nesse trabalho, o nível de significância adotado foi de 0,05.

Além da avaliação de significância estatística, foram realizadas matrizes de correlação e gráficos dos principais efeitos com o intuito de verificar a relevância dos fatores de controle sobre as respostas.

5.1 – Análises de composição química e resumo da soldagem

Na Tabela 4 e Tabela 5 estão apresentados os resultado da análise de composição química realizada no eletrodo utilizado na soldagem definitiva e no metal base, respectivamente.

Tabela 4 - Composição química do metal depositado.

| Elemento | C | Si | Mn | P | S | Al |
|----------|------|------|------|-------|-------|------|
| %w | 0,27 | 0,34 | 0,59 | 0,014 | 0,006 | 2,07 |

Fonte: autor.

Tabela 5 - Composição química do metal de base

| Elemento | C | Si | Mn | P | S |
|----------|------|------|------|-------|-------|
| %w | 0,10 | 0,19 | 0,35 | 0,029 | 0,029 |

Fonte: autor.

A Tabela 6 apresenta o resumo dos valores da soldagem.

Tabela 6 - Resumo da soldagem no modo tensão constante com 23 V e a velocidade de soldagem de 0,3 m/min

| Cordão | Valim (m/min) | Tempo de arco aberto (s) | DBCP (mm) | Velocidade do vento (m/s) | Im (A) | Um (V) | ENERGIA (kJ/mm) |
|--------|---------------|--------------------------|-----------|---------------------------|--------|--------|-----------------|
| 1 | 2 | 28,42 | 20 | 0 | 173,6 | 23,2 | 0,81 |
| 2 | 2 | 28,48 | 20 | 5,57 | 178,5 | 23,2 | 0,83 |
| 3 | 4 | 29 | 20 | 0 | 269,6 | 23,2 | 1,25 |
| 4 | 4 | 28,76 | 20 | 5,15 | 266,9 | 23,2 | 1,24 |
| 5 | 2 | 27,93 | 30 | 0 | 152,6 | 23,3 | 0,71 |
| 6 | 2 | 28,15 | 30 | 5,15 | 152,9 | 23,3 | 0,71 |
| 7 | 4 | 29,09 | 30 | 0 | 227,6 | 23,2 | 1,06 |
| 8 | 4 | 29,08 | 30 | 5,45 | 231,7 | 23,3 | 1,08 |

Fonte: autor.

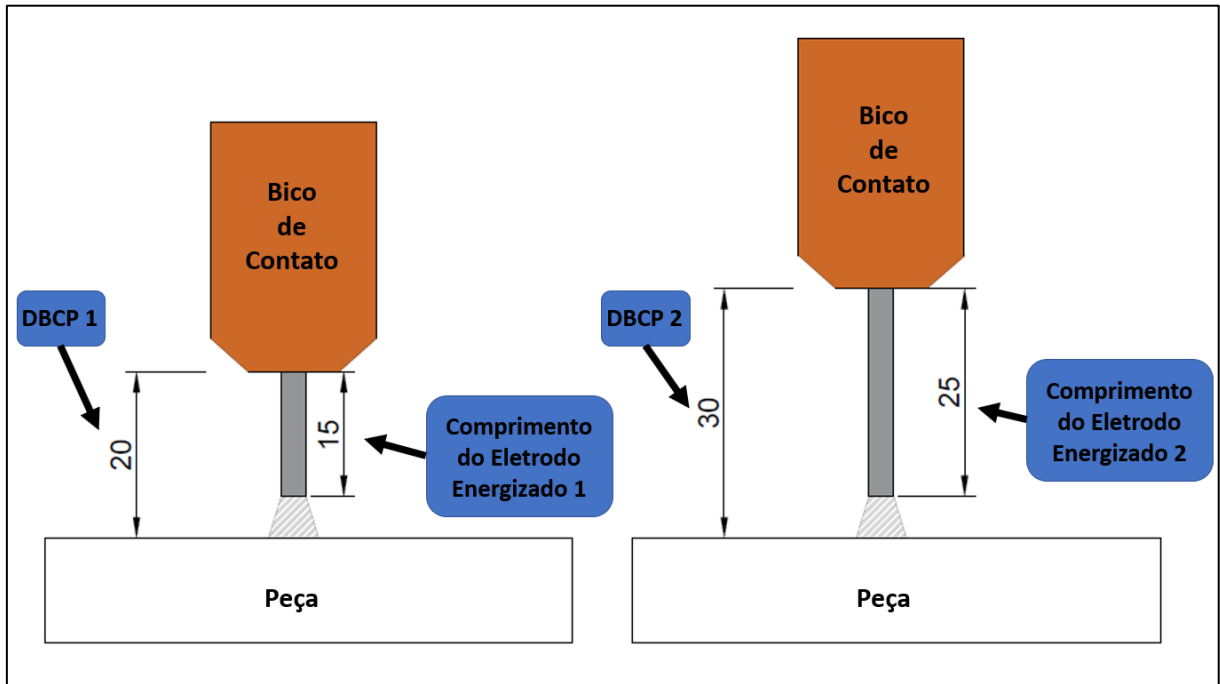
Observa-se que a corrente é levemente reduzida, a medida em que se eleva a DBCP. Isso acontece, porque ao aumentar a DBCP, no modo tensão constante, aumenta-se o comprimento de eletrodo energizado, conforme ilustrado na Figura 30. Dessa forma, o valor da resistência é maior, conforme equação 4. Ao elevar a resistência, para um mesmo valor de tensão (modo tensão constante), a corrente diminui.

$$R = \rho \times \frac{l}{A} \quad \text{Eq. 4}$$

Onde:

- R é a resistência;
- ρ é a resistividade do condutor;
- l é o comprimento do condutor;
- A é a área da seção transversal do condutor.

Figura 30 – Acréscimo do comprimento do eletrodo energizado com a elevação da DBCP.



Fonte: autor.

A partir dos dados apresentados nela, foi construída uma matriz de correlação (Tabela 7) que irá facilitar na discussão.

Tabela 7 – Matriz de correlação para corrente, tensão e energia.

| | <i>Valim)</i> | <i>DBCP</i> | <i>VENTO</i> |
|-----------|---------------|-------------|--------------|
| <i>Im</i> | 0,94 | -0,34 | 0,01 |
| <i>Um</i> | -0,26 | 0,77 | 0,25 |
| ENERGIA | 0,94 | -0,34 | 0,02 |

Fonte: autor.

Na Tabela 7 é possível observar que a corrente possui correlação muito alta com a *valim*. Isso ocorre nos processos que são operados no modo tensão constante, porque o controle do arco é feito pela alteração da taxa de fusão. Observa-se também que a energia possui correlação com a *valim*. Isso é explicado pois a energia é diretamente proporcional a corrente, conforme equação 5.

$$H = \frac{U \times I}{v} \quad \text{Eq. 5}$$

Onde:

- H é a energia de soldagem;
- U é a tensão de soldagem;
- I é a corrente de soldagem

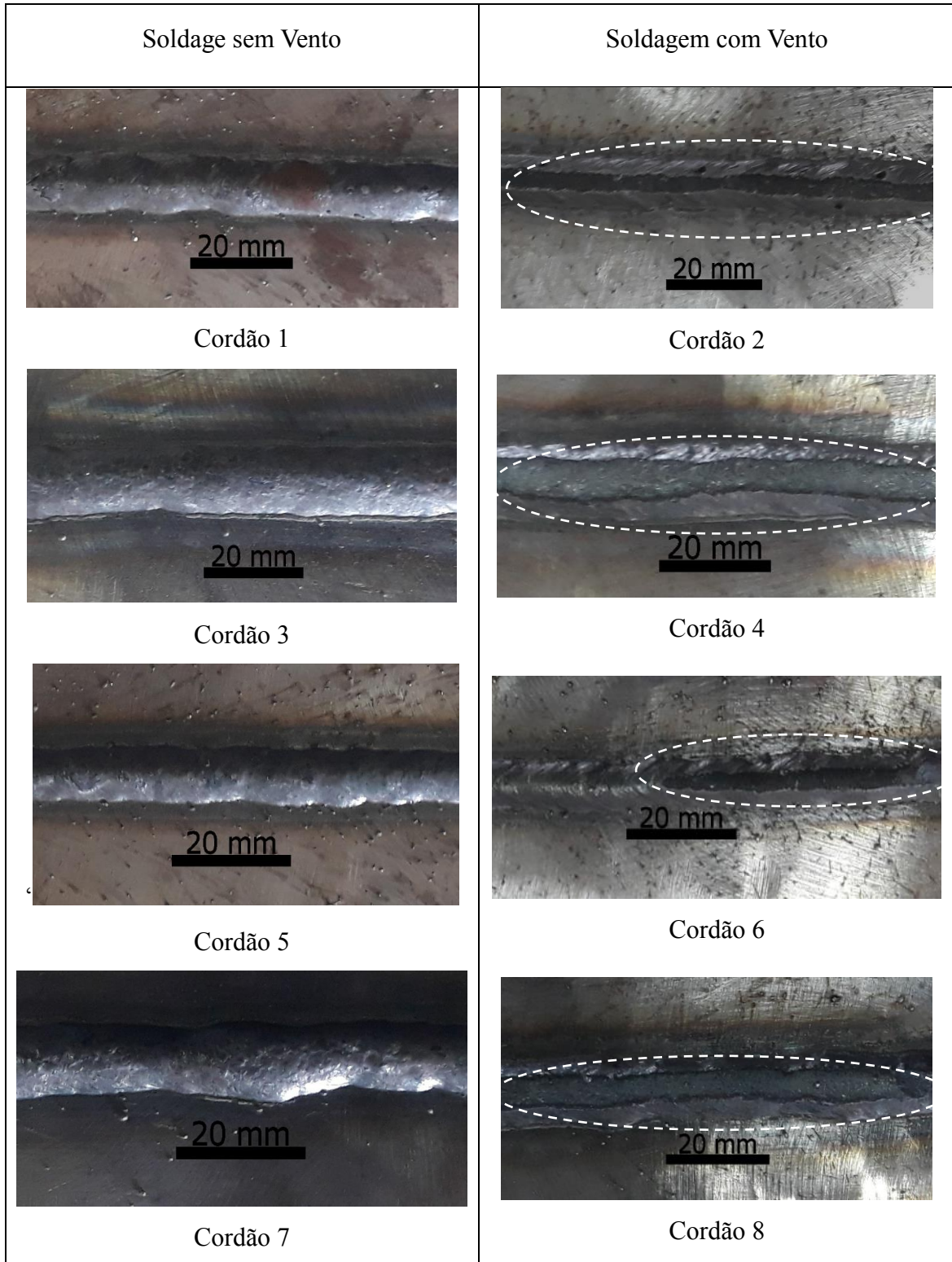
- V é a velocidade de soldagem.

Nota-se também uma correlação positiva entre a DBCP e a tensão média. Acredita-se que por aumentar a DBCP ocorre um leve aumento no comprimento do arco, ocasionando em maiores tensões.

5.2 Destacabilidade da escória:

A avaliação da destacabilidade da escória foi realizada de forma qualitativa. Com auxílio de uma escova com cerdas de aço, foi realizada limpeza dos cordões após a soldagem e verificou-se que os cordões soldados sob influência de correntes de ar apresentaram maior dificuldade na remoção da escória. Ela ficou acumulada na parte superior dos cordões (Figura 31) sendo necessário o uso de uma escova rotativa para completar a limpeza. Portanto, por motivos desconhecidos pelo autor, os cordões soldados sob influência do vento apresentaram pior destacabilidade de escória.

Figura 31 - Influência do vento na destacabilidade da escória. Cordões soldados sem vento (ímpares) e cordões soldados com vento (pares). A região pontilhada destaca a escória presente nos cordões após limpeza manual



Fonte: autor.

5.3 Aspecto superficial do cordão

Após a soldagem os cordões foram limpos, fotografados (Figura 32) e dois avaliadores atribuíram notas de 0 a 5, onde a nota zero é a pior classificação e 5 a melhor, para a continuidade do cordão, nível de respingos, ranhuras e poros. A Tabela 8, apresenta os valores da avaliação.

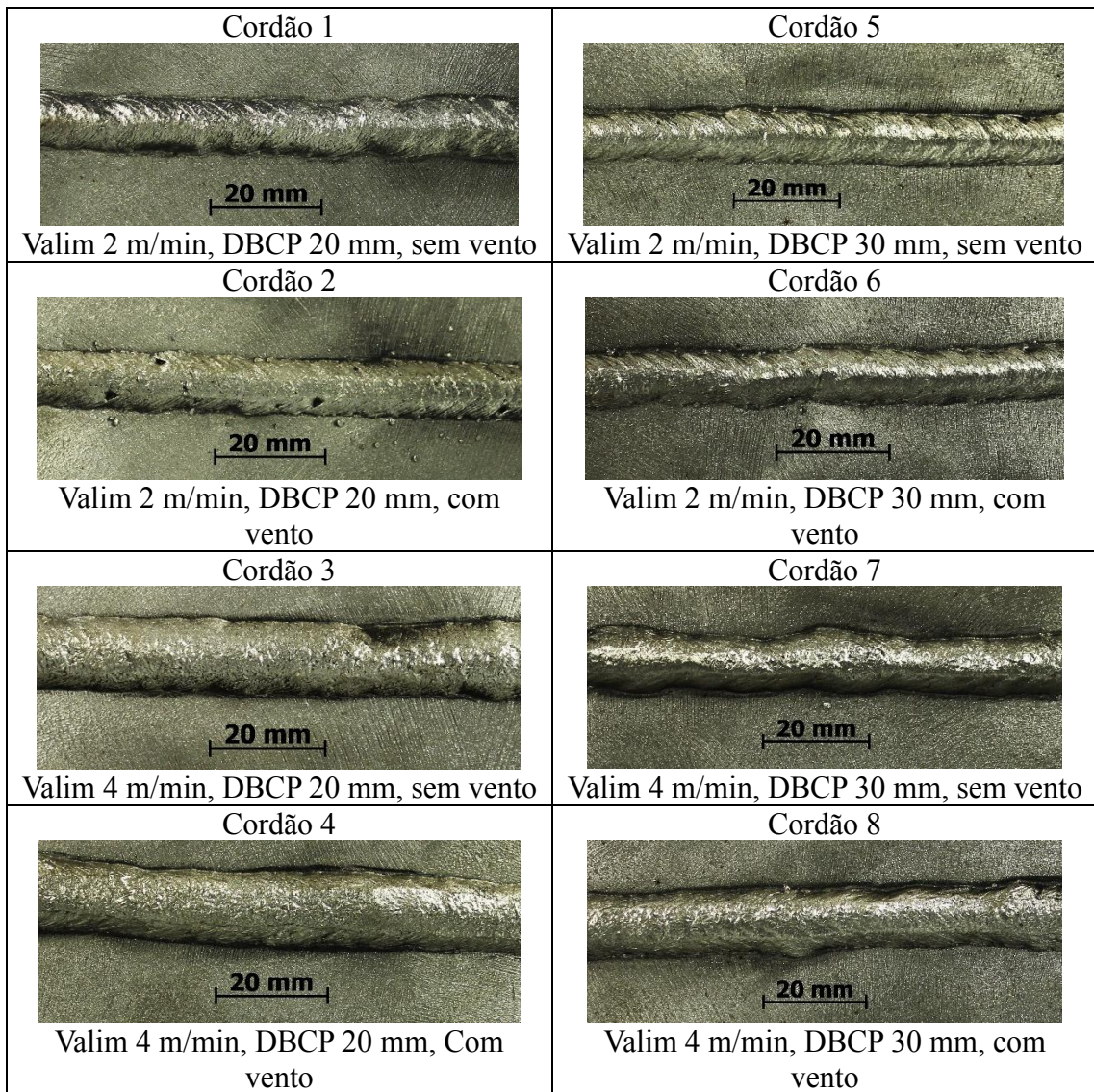
Tabela 8 - Avaliação superficial dos cordões.

| Cordão | Continuidade | | Respingos | | Ranhuras | | Poros | | Média |
|--------|--------------|-------|-----------|-------|----------|-------|-------|-------|-------|
| | Av. 1 | Av. 2 | Av. 1 | Av. 2 | Av. 1 | Av. 2 | Av. 1 | Av. 2 | |
| 1 | 3 | 3 | 5 | 5 | 5 | 3 | 4 | 5 | 4,13 |
| 2 | 4 | 4 | 3 | 2 | 5 | 3 | 1 | 2 | 3,00 |
| 3 | 3 | 3 | 5 | 5 | 5 | 4 | 5 | 5 | 4,38 |
| 4 | 4 | 4 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 4,75 |
| 5 | 4 | 5 | 4 | 5 | 5 | 5 | 4 | 5 | 4,63 |
| 6 | 3,5 | 4 | 3,5 | 4 | 5 | 4 | 5 | 5 | 4,25 |
| 7 | 2,5 | 4 | 4,5 | 5 | 5 | 4 | 5 | 5 | 4,38 |
| 8 | 4 | 3 | 4,5 | 5 | 5 | 4 | 5 | 5 | 4,44 |

Fonte: autor.

O cordão 2, (valim 2m/min, DBCP de 20mm e soldado sob influência de correntes de ar) foi avaliado como o pior em termos visuais. Ele apresentou um nível elevado de respingos e poros. O cordão 4 (valim 4m/min, DBCP de 20mm e soldado sob influência do vento), recebeu a melhor avaliação, pois não apresentou respingos, poros ou ranhuras.

Figura 32 - Aspecto superficial dos cordões.



Fonte: autor.

5.4 Geometria do cordão e diluição

A Tabela 9 apresenta a média dos valores medidos da geometria, dos cordões e da diluição.

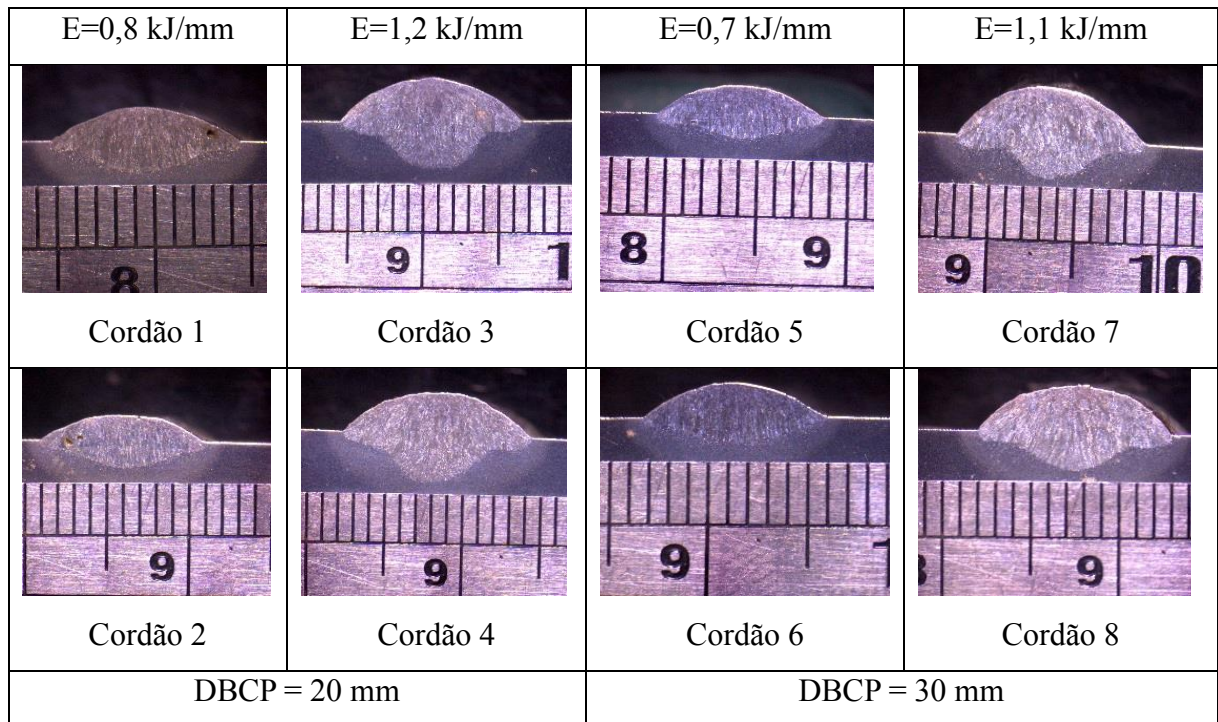
Tabela 9 Geometria do cordão. C – Cordão; L – largura; P – penetração; R – reforço; AMB – área do metal base na ZF; AR – área do reforço; AT – área total do ZF.

| C | Valim (m/min) | DBCP (mm) | VV (m/s) | Energia (KJ/mm) | L (mm) | P (mm) | R (mm) | AMB (mm ²) | AR (mm ²) | AT (mm ²) | D |
|---|------------------|--------------|-------------|--------------------|-----------|-----------|-----------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|-------|
| 1 | 2 | 20 | 0 | 0,81 | 9,82 | 1,60 | 1,71 | 9,51 | 11,13 | 20,64 | 46,1% |
| 2 | 2 | 20 | 5,57 | 0,83 | 10,09 | 1,57 | 1,49 | 9,64 | 10,31 | 19,95 | 48,3% |
| 3 | 4 | 20 | 0 | 1,25 | 11,54 | 3,00 | 2,74 | 20,08 | 20,99 | 41,06 | 48,9% |
| 4 | 4 | 20 | 5,15 | 1,24 | 12,09 | 3,12 | 2,64 | 20,56 | 21,90 | 42,46 | 48,4% |
| 5 | 2 | 30 | 0 | 0,71 | 9,27 | 1,19 | 1,67 | 6,64 | 10,24 | 16,88 | 39,4% |
| 6 | 2 | 30 | 5,15 | 0,71 | 9,22 | 1,27 | 1,72 | 7,05 | 10,27 | 17,32 | 40,7% |
| 7 | 4 | 30 | 0 | 1,06 | 11,06 | 2,27 | 2,99 | 13,02 | 22,52 | 35,55 | 36,6% |
| 8 | 4 | 30 | 5,45 | 1,08 | 10,97 | 2,12 | 2,62 | 12,86 | 20,38 | 33,24 | 38,7% |

Fonte: autor.

A Figura 33 se refere as macrografias da seção transversal dos cordões.

Figura 33 – Macrografia da seção transversal dos cordões.



Fonte: autor.

Testes de hipóteses estatísticas foram realizados a partir dos dados apresentados na Tabela 9, para saber se a variação nos níveis dos fatores foi suficiente para alterar as características geométricas dos cordões. As hipóteses adotadas foram as seguintes:

- H_0 : Os níveis não afetaram a geometria do cordão;
- H_1 : Os níveis afetaram a geometria do cordão.

Para os testes que apresentaram um valor-p maior que o índice de significância 0,05 foi adotada a hipótese H_0 e as mudanças registradas não foram atribuídas aos níveis e sim a variabilidade amostral e erros de medição. Contudo, para valor-p abaixo de 0,05, assumiu-se que os níveis tiveram influência estatisticamente significativa e gráficos de intervalo foram construídos para esses efeitos. A Tabela 10 apresenta os resultados do valor-p e de F dos testes.

Tabela 10 – Resultados do teste de hipóteses dos fatores sobre a penetração, largura, reforço e diluição. $\alpha = 0,05$.

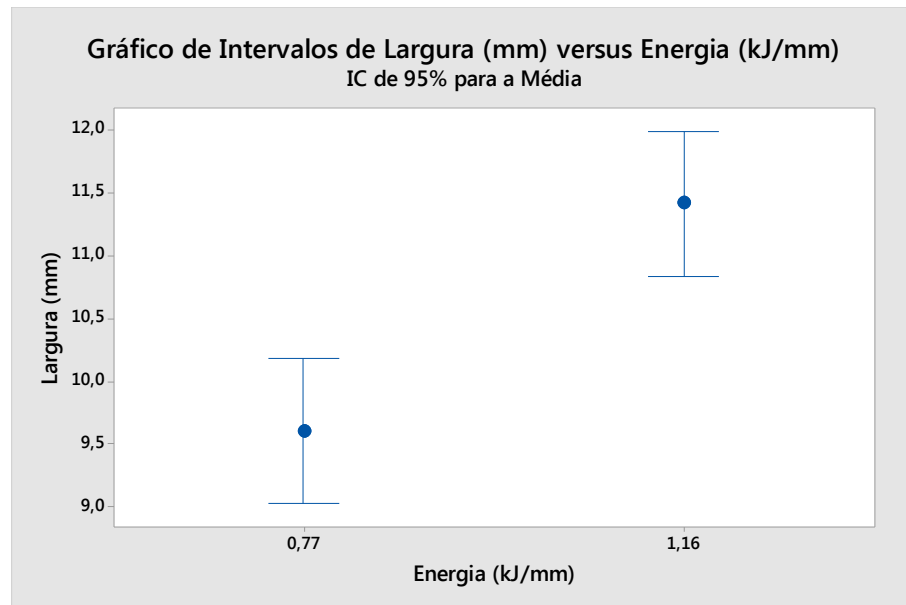
| | Energia | | DBCP | | Vento | |
|------------|---------|--------|---------|-------|---------|------|
| | valor-p | F | valor-p | F | valor-p | F |
| Largura | 0,002 | 29,54 | 0,353 | 1,01 | 0,842 | 0,04 |
| Penetração | 0,004 | 20,19 | 0,28 | 1,41 | 0,994 | 0 |
| Reforço | 0 | 119,79 | 0,824 | 0,05 | 0,737 | 0,12 |
| Diluição | 0,909 | 0,01 | 0 | 74,13 | 0,748 | 0,11 |

Fonte: autor.

Para a largura, o reforço e a penetração, segundo os critérios adotados nesse trabalho, a energia foi o único fator que interferiu de forma significativa. Para a diluição, a variação da DBCP foi quem resultou em diferenças estatisticamente significantes.

O Figura 34 relaciona a largura com a energia, nota-se a largura aumenta com o aumento de energia. Isso ocorre devido ao maior aporte, térmico proporcionado pelo aumento de energia, que torna a poça mais larga. Outra explicação é que o acréscimo na energia ioniza mais o arco, aumentando a área da seção transversal do mesmo, implicando na largura do cordão.

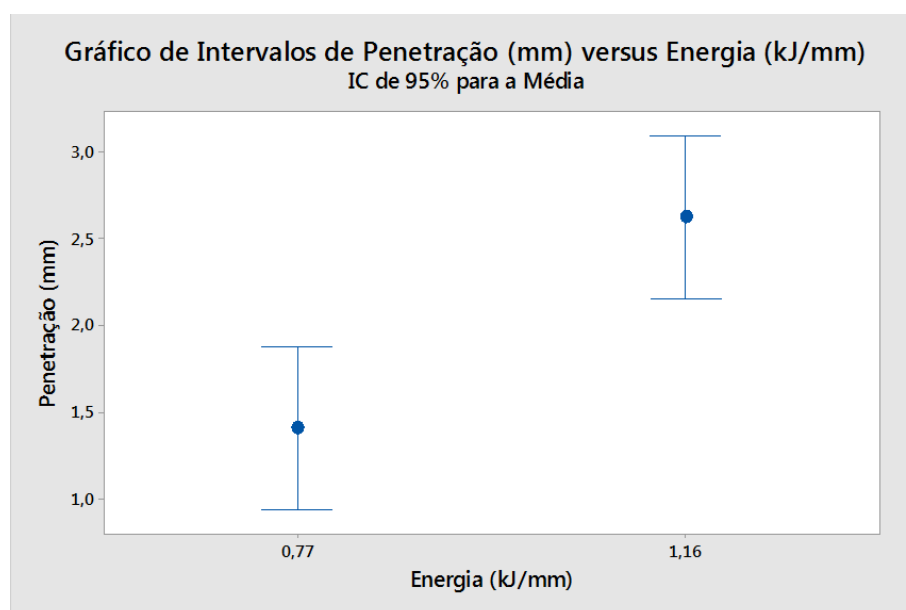
Figura 34 - Influência da energia sobre a largura do cordão



Fonte: autor.

O Figura 35 mostra que a penetração aumenta com o aumento da energia. Segundo (MACHADO, 1996), a penetração é diretamente proporcional a corrente e como já foi citado, esta tem forte correlação positiva com a energia. Um aumento na energia significa em um maior aporte térmico sobre a peça e um volume maior do metal de base é fundido, portanto, maior penetração.

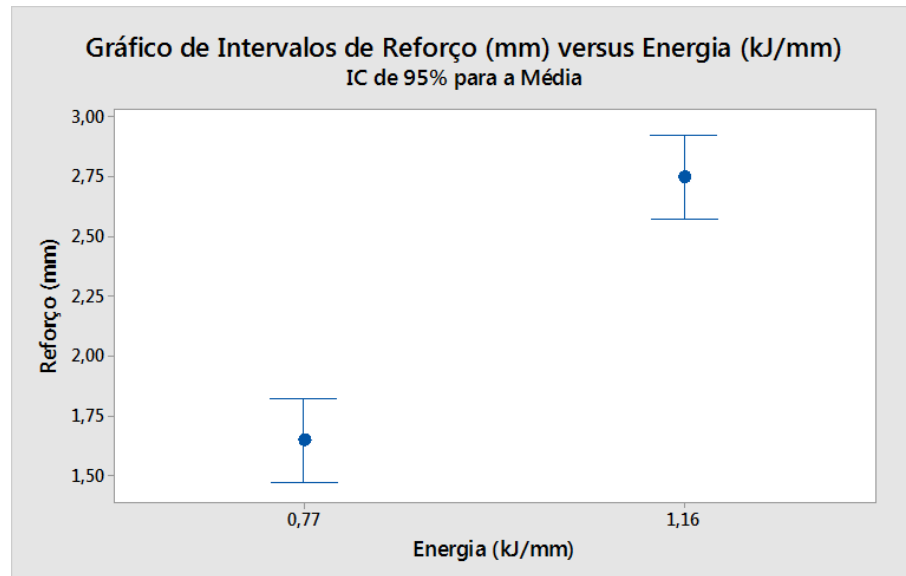
Figura 35 - Influência da energia sobre a penetração do cordão.



Fonte: autor.

A Figura 36 informa que ao aumentar a energia aumenta-se também o reforço do cordão. Como a soldagem foi realizada em modo tensão constante, o acréscimo da energia é atribuído exclusivamente ao aumento da corrente, como já foi citado a corrente maior, resulta em maior consumo e taxa de fusão, dessa forma, mais metal é adicionado no cordão.

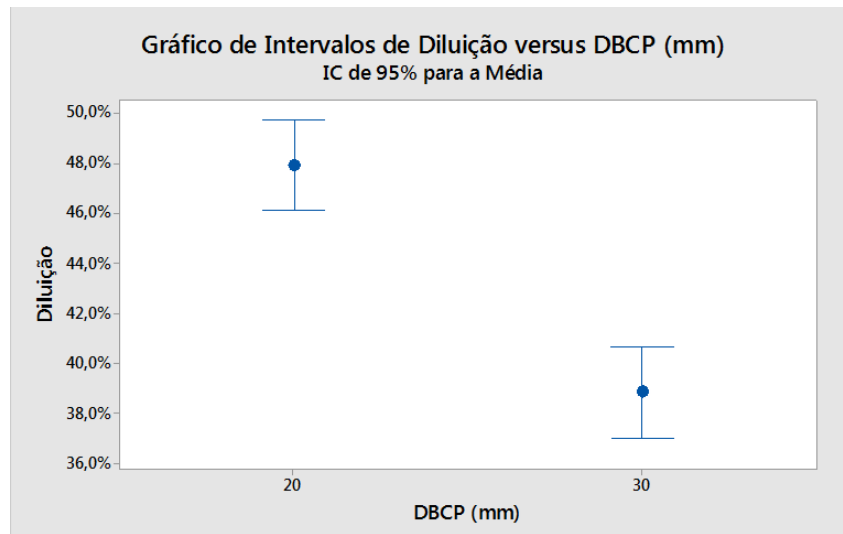
Figura 36 - Influência da energia sobre o reforço do cordão.



Fonte: autor.

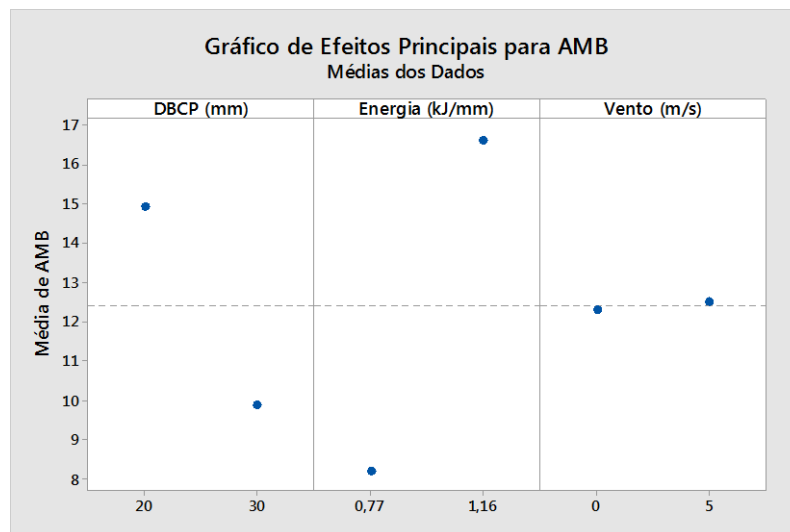
Para a diluição, verificou-se que o aumento da DBCP implica em redução na diluição (Figura 37). A medida em que se aumenta a DBCP, reduz-se o valor da corrente média, como explicado anteriormente. Essa redução na corrente acarreta em menor penetração e, portanto, menos metal de base é fundido (Figura 38). Contudo a massa de metal adicionado não se altera de forma relevante (Figura 39) e a combinação entre menor metal de base fundido com a mesma quantidade de metal depositado, resulta em uma diluição menor

Figura 37 - Influência da DBCP na diluição.



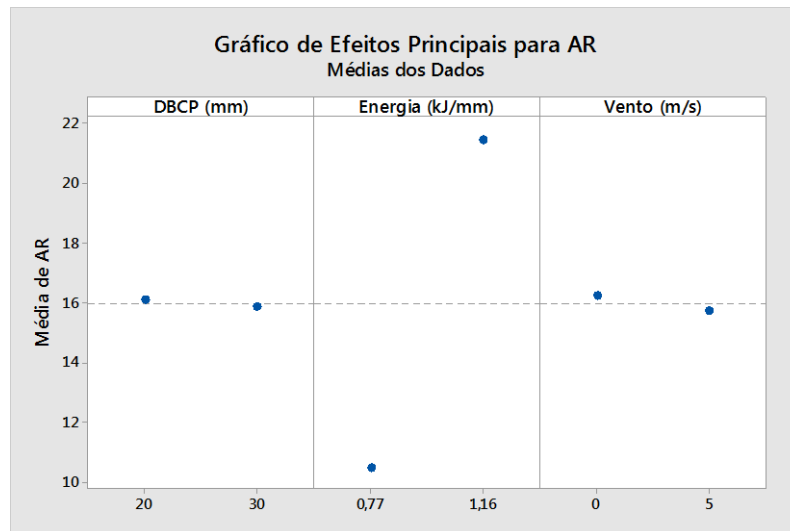
Fonte: autor.

Figura 38 - Principais efeitos para área fundida do metal de base.



Fonte: autor

Figura 39 - Principais efeitos para área adicionada.



Fonte: autor

A Tabela 11 apresenta a matriz de correlação dos parâmetros, geometria e diluição

Tabela 11 – Matriz de correlação entre os parâmetros e os fatores geométricos

| | Energia | DBCP | Vento |
|------------|---------|-------|-------|
| Largura | 0,91 | -0,38 | 0,08 |
| Penetração | 0,88 | -0,44 | 0,00 |
| Reforço | 0,98 | 0,09 | -0,14 |
| AMB | 0,83 | -0,50 | 0,02 |
| AT | 0,96 | -0,26 | -0,01 |
| AR | 0,99 | -0,02 | -0,05 |
| Diluição | -0,05 | -0,96 | 0,14 |

Fonte: autor.

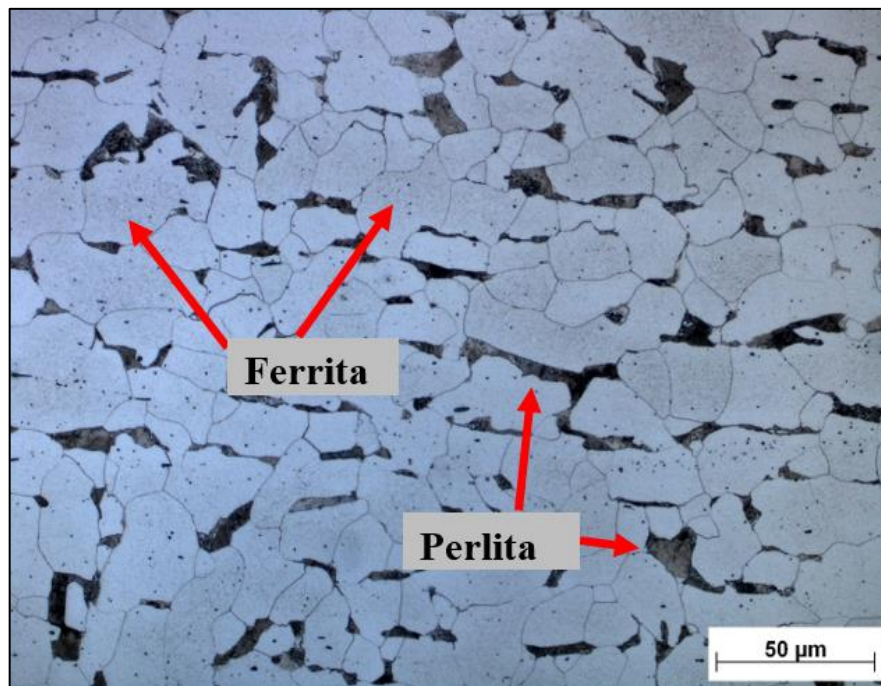
Observa-se que a energia possui uma correlação muito alta com todos os componentes geométricos e não apresenta correlação com a diluição que, para esse trabalho, sofreu maior influência da DBCP, como discutido anteriormente. O vento não apresentou correlação com nenhum fator analisado.

5.5 Microestrutura

5.5.1 Metal base

A Figura 40 apresenta a microestrutura do metal base. Ao analisar a microestrutura, após a devida preparação metalográfica, observou-se ilhas de perlita em uma matriz ferrítica que é uma microestrutura típica de um aço ASTM A36 no estado recozido ou normalizado.

Figura 40- Microestrutura do metal base. Magnificação 500X - ataque nital 2%.

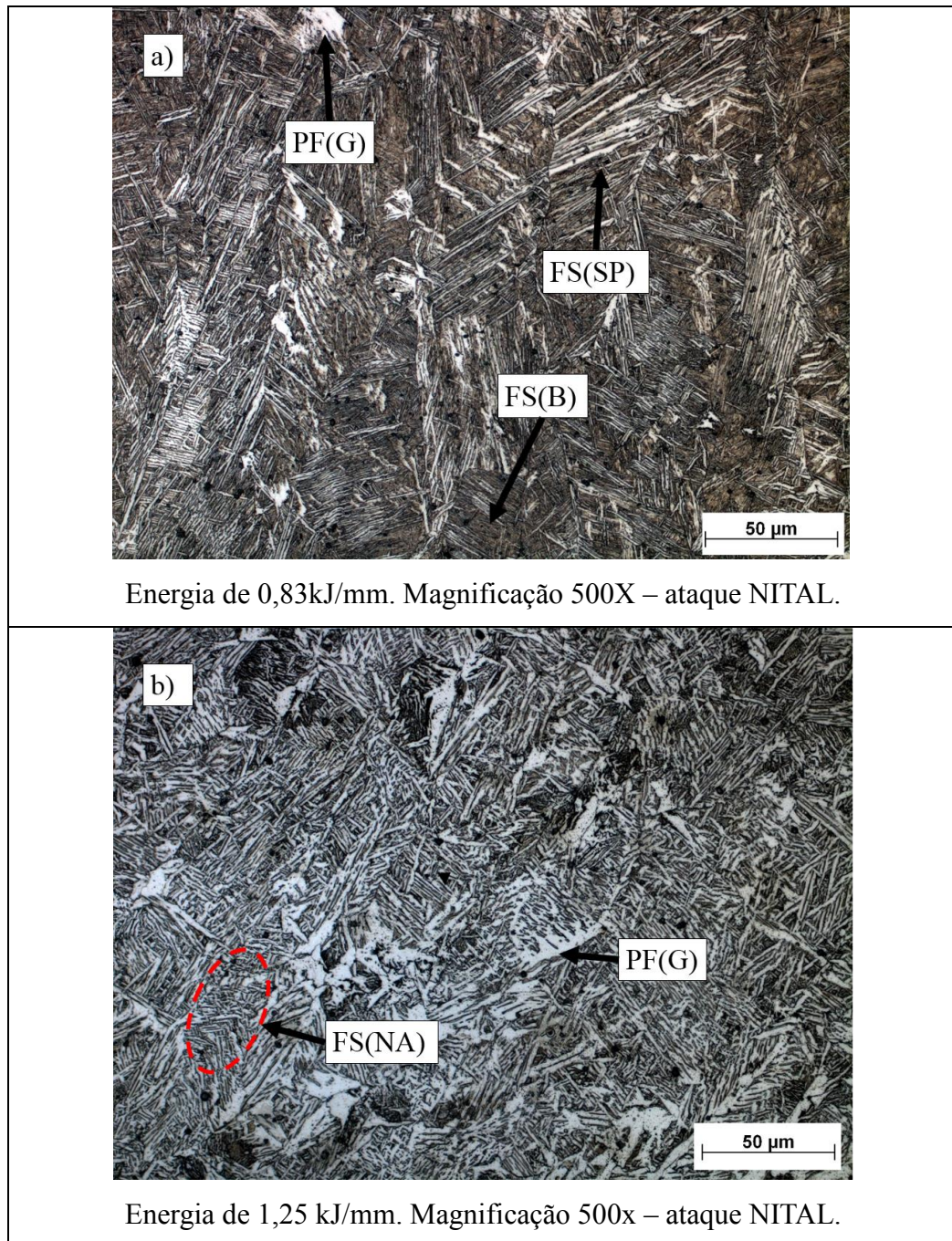


Fonte: autor.

5.5.2 Zona Fundida (ZF)

Na zona fundida, foram identificados dois padrões de microestrutura, um padrão para os cordões com energia mais baixa (Figura 41 a) e outro para os cordões de energia mais alta (Figura 41 b). Para essas amostras não se esperava encontrar martensita em grande quantidade, pois o teor de carbono da zona fundida era de aproximadamente 0,2%, ou seja, muito baixo.

Figura 41 - Padrões de microestrutura presentes na zona fundida dos cordões.

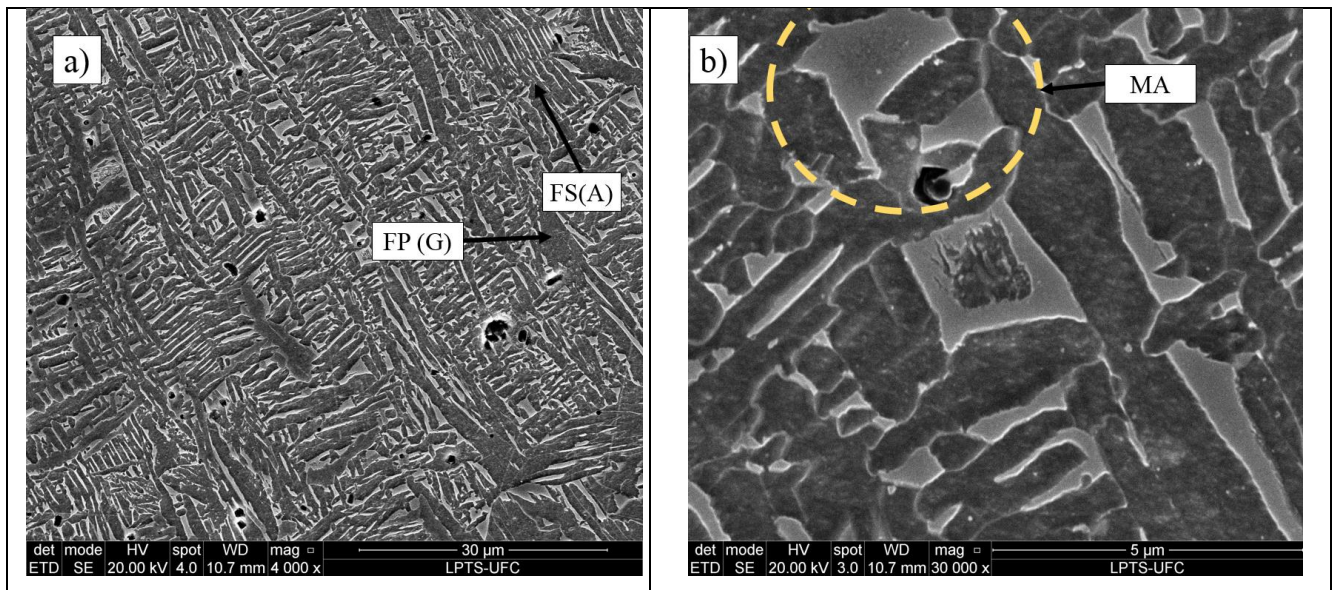


Fonte: autor.

Nota-se que, para os cordões soldados com menor energia, devido a uma taxa de resfriamento mais elevada, formou uma microestrutura refinada e dura, sendo esta constituída por ferrita com segunda fase bainita FS(B), que é uma fase mais dura, ferrita primária de contorno de grão PF(G) e ferrita de segunda fase alinhada FS(A). Para os cordões soldados com maior energia é possível observar ferrita de segunda fase não alinhada FS(NA) e ferrita primária de contorno de grão. Isso ocorre, porque, para uma energia de soldagem maior, a

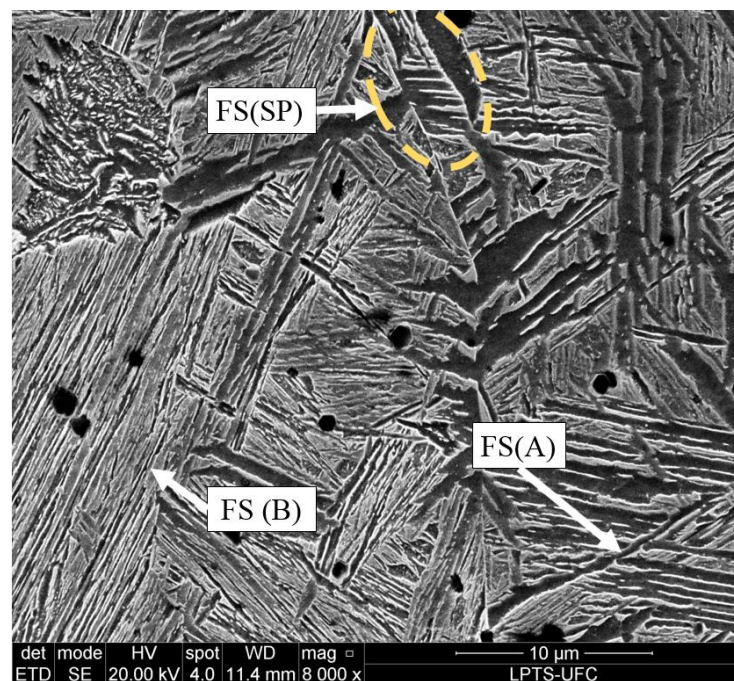
velocidade de resfriamento diminui (MODENESI, MARQUES e SANTOS, 2012). Uma velocidade de resfriamento menor proporciona o surgimento de fases difusionais, ou seja, que dependem, além do estímulo termodinâmico, de tempo para nuclear e crescer, como a ferrita primária de contorno de grão. Com uma magnificação maior, observou-se também, partículas de martensita-austenita (Figura 42). Para uma velocidade de resfriamento maior, a tendência é ocorrer a formação de fases que não estão previstas no diagrama de equilíbrio, como a bainita, por exemplo (Figura 43).

Figura 42 - Microestrutura da ZF, alta energia.



Fonte: autor.

Figura 43 - Microestrutura da ZF, alta energia.



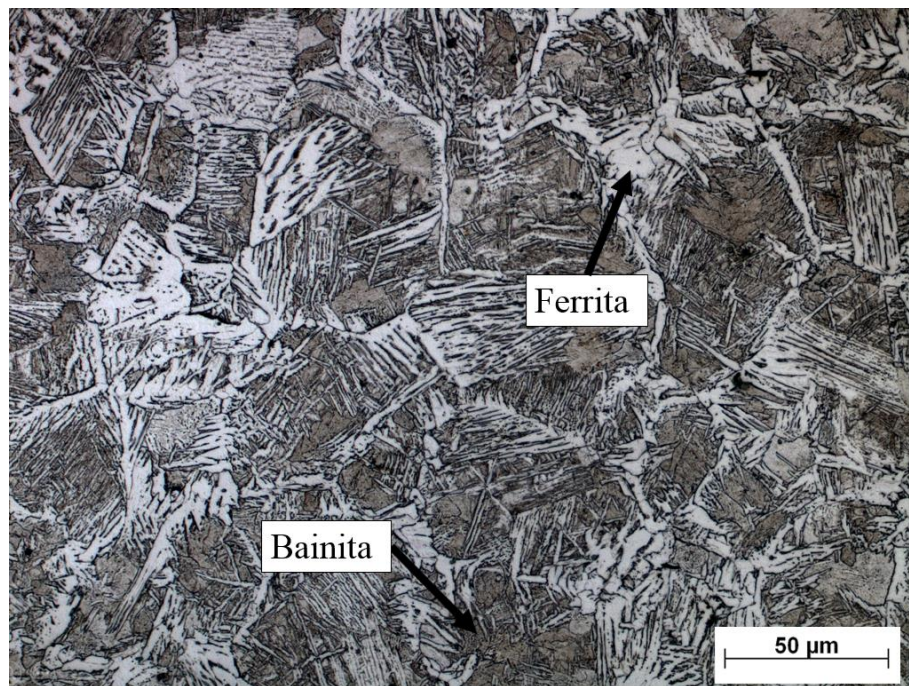
Fonte: autor.

5.5.3 Zona Afetada pelo Calor (ZAC)

5.5.3.1 ZAC GG

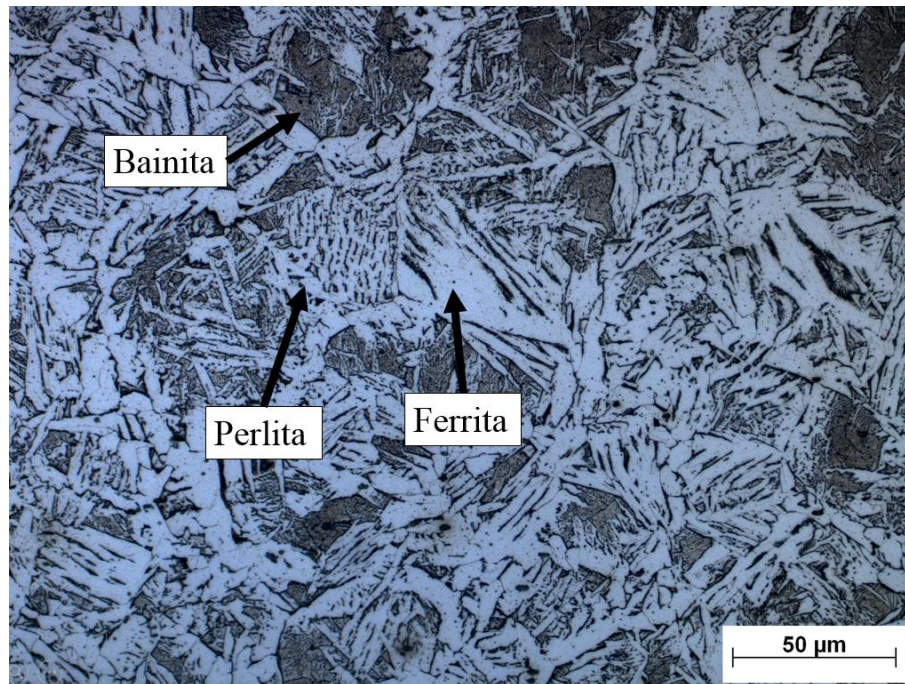
Assim como na zona fundida, foram encontrados dois padrões de microestrutura para a ZAC GG. Na amostra do cordão de baixa energia, Figura 44, foi encontrado uma quantidade visivelmente maior de bainita. No cordão soldado com maior energia, Figura 45, foi identificado ferrita primária e ilhas de bainita e perlita.

Figura 44 – ZAC GG baixa energia. Magnificação 500X



Fonte: autor.

Figura 45 – ZAC GG alta energia. Magnificação 500X

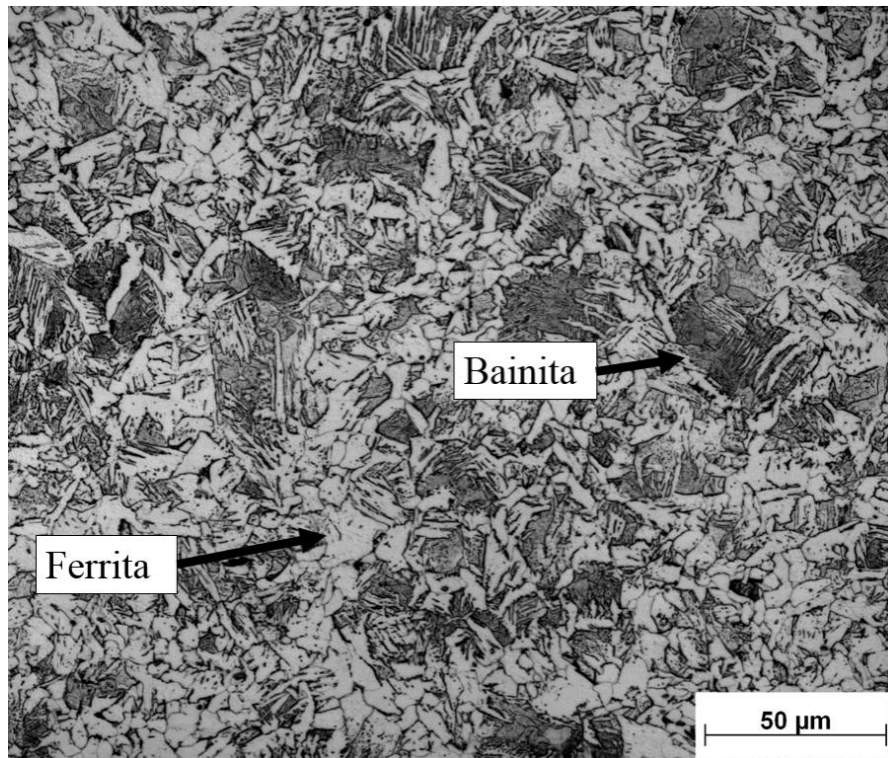


Fonte: autor.

5.5.3.2 ZAC GF

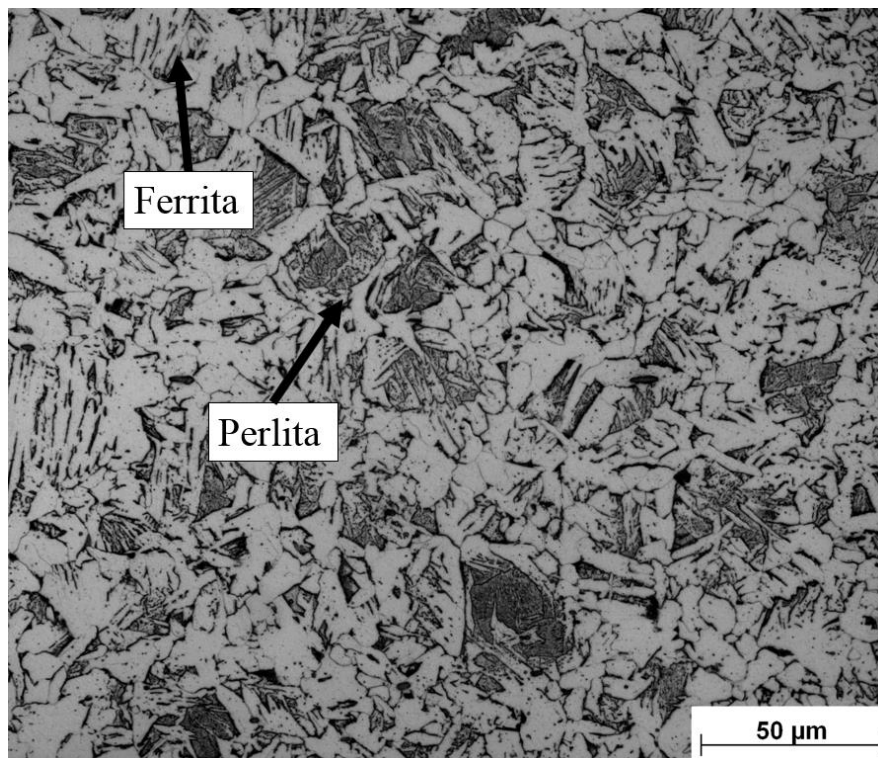
No cordão soldado com baixa energia, Figura 46, é possível identificar ferrita primária e bainita. Contudo, na amostra referente ao cordão de alta energia, Figura 47, observa-se ferrita e perlita.

Figura 46 – ZAC GF, baixa energia. Magnificação 500X



Fonte: autor.

Figura 47 – ZAC GF, baixa energia. Magnificação 500X

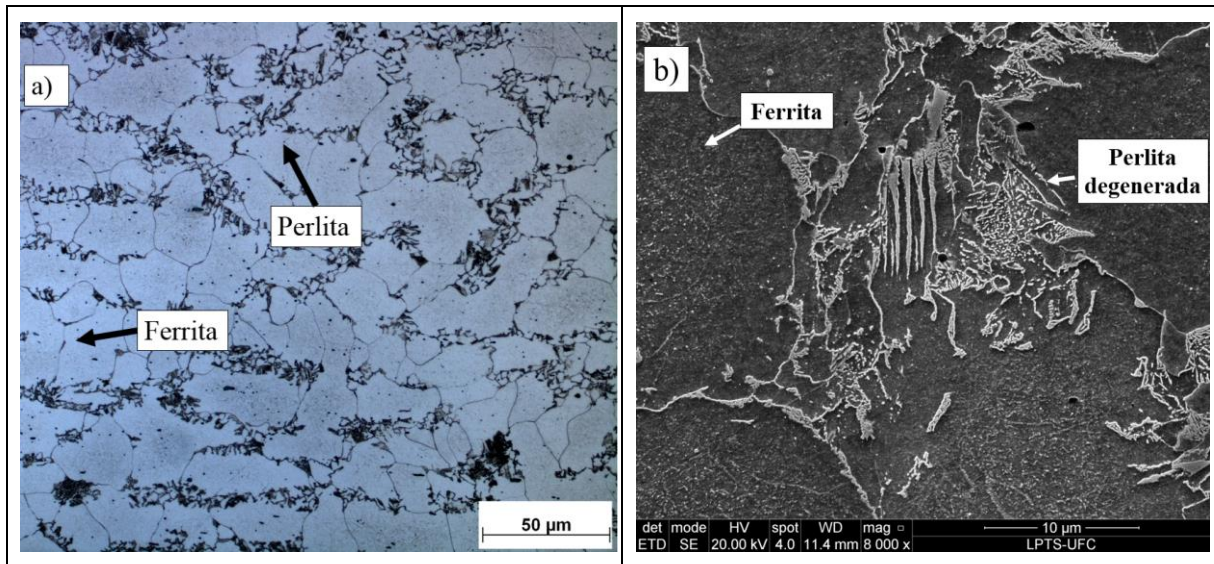


Fonte: autor.

5.5.3.2 ZAC intercrítica

Não se identificou diferenças significativas na microestrutura da ZAC intercrítica dos cordões. Observa-se uma matriz ferrítica com grãos degenerados de perlita, conforme mostra a Figura 48.

Figura 48 - ZAC intercrítica



Fonte: autor.

5.6 Rendimento

Com base no tempo de arco aberto, na velocidade de alimentação de arame, na área da seção sólida do eletrodo e na densidade do aço, foi calculado o rendimento de cada cordão.

Como citado anteriormente, esse cálculo não tem como objetivo computar o rendimento do processo, mas sim fornecer um valor quantitativo, de modo a possibilitar a comparação entre e os cordões soldados nesse trabalho e verificar a influência dos parâmetros de soldagem e do vento no rendimento nos mesmos.

A Tabela 12 apresenta os valores dos parâmetros de entrada, da massa de metal de adição soldado, da massa teórica calculada e do rendimento.

Tabela 12 - Rendimento dos cordões soldados. C: Cordão; Ta: Tempo de arco aberto; Vv :Velocidade do vento; H: Energia; Mc: massa do cordão; Mt: massa teórica calculada; R: Rendimento.

| C | Valim (m/min) | Ta (s) | DBCP (mm) | Vv (m/s) | H (kJ/mm) | Mc (g) | Mt (g) | R |
|---|---------------|--------|-----------|----------|-----------|--------|--------|-------|
| 1 | 2 | 28,42 | 20 | 0 | 0,81 | 10,6 | 13,8 | 76,5% |
| 2 | 2 | 28,48 | 20 | 5,57 | 0,83 | 10,5 | 13,9 | 75,7% |
| 3 | 4 | 29 | 20 | 0 | 1,25 | 24 | 28,3 | 84,9% |
| 4 | 4 | 28,76 | 20 | 5,15 | 1,24 | 23,9 | 28,0 | 85,3% |
| 5 | 2 | 27,93 | 30 | 0 | 0,71 | 10,4 | 13,6 | 76,4% |
| 6 | 2 | 28,15 | 30 | 5,15 | 0,71 | 10,3 | 13,7 | 75,1% |
| 7 | 4 | 29,09 | 30 | 0 | 1,06 | 22,7 | 28,4 | 80,1% |
| 8 | 4 | 29,08 | 30 | 5,45 | 1,08 | 22,8 | 28,3 | 80,4% |

Fonte: autor.

Ao analisar os dados, observa-se que os cordões 3 e 4 apresentaram o melhor rendimento dentre todos, algo em torno de 85%. Vale destacar que eles foram soldados com os mesmos parâmetros de soldagem e o único fator que os difere é a exposição ao vento.

Da mesma forma que para a geometria e diluição, foram realizados testes de hipótese para avaliar a influência dos parâmetros no rendimento, conforme Tabela 13

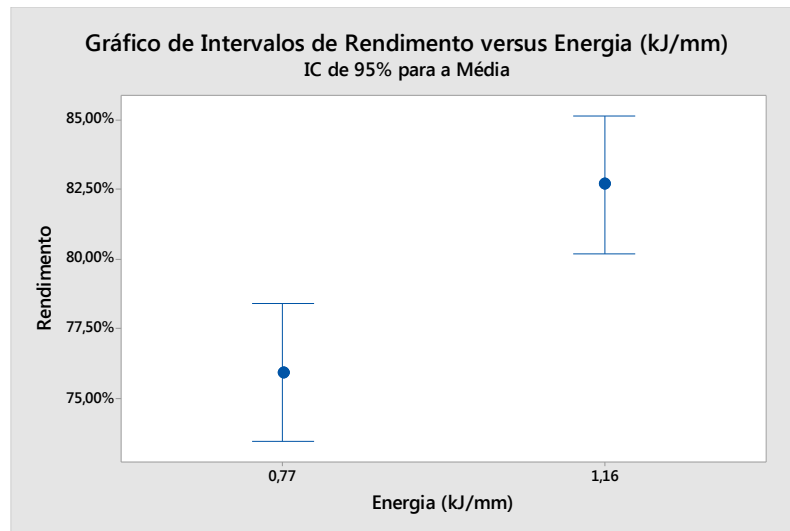
Tabela 13 – Resultados dos testes de hipóteses para o rendimento. $\alpha = 0,05$.

| | Energia | | DBCP | | Vento | |
|------------|---------|-------|---------|------|---------|------|
| | valor-p | F | valor-p | F | valor-p | F |
| Rendimento | 0,003 | 21,97 | 0,41 | 0,79 | 0,909 | 0,01 |

Fonte: autor.

Como observado, o único fator que apresentou significância estatística foi a energia. A Figura 49 apresenta essa relação.

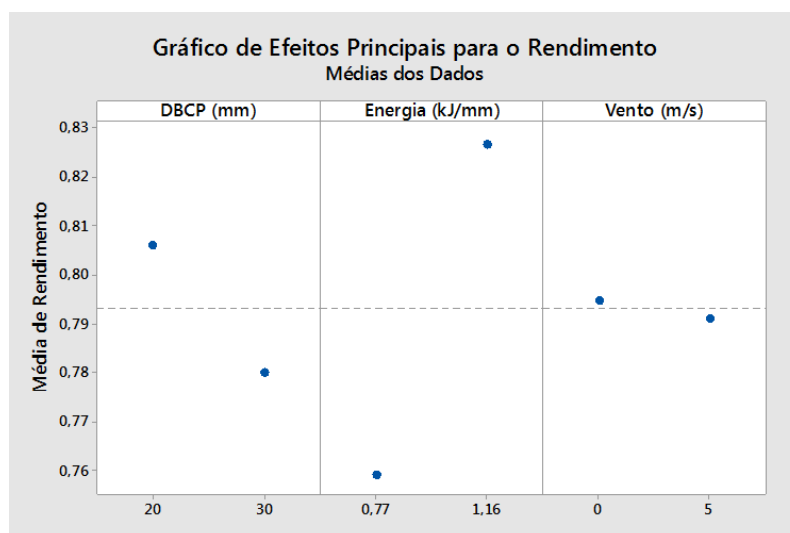
Figura 49 - Influência da energia de soldagem sobre o rendimento.



Fonte: autor.

A Figura 50 apresenta os efeitos dos parâmetros sobre o rendimento. A partir dele é possível concluir que o rendimento é influenciado, de forma direta, pela energia de soldagem. Observa-se também que ele decresce com o aumento da DBCP. Isso é justificável tendo em vista que a medida que se eleva a DBCP, se reduz a energia, pela redução da corrente. Por fim, conclui-se que o vento influencia muito pouco no rendimento.

Figura 50 - Principais efeitos para o rendimento



Fonte: autor

5.7 Microdureza.

A Tabela 14 mostra as médias das durezas por região obtidas no ensaio.

Tabela 14 - Média das microdurezas Vickers da zona fundida (ZF) da linha de fusão (LF) da zona afetada pelo calor (ZAC) e do metal base (MB)

| C | Valim (m/min) | DBCP (mm) | VENTO (m/s) | ENERGIA (KJ/mm) | ZF (HV) | LF (HV) | ZAC (HV) | MB (HV) |
|---|------------------|--------------|----------------|--------------------|------------|------------|-------------|------------|
| 1 | 2 | 20 | 0 | 0,81 | 315 | 251 | 194 | 174 |
| 2 | 2 | 20 | 5,57 | 0,83 | 328 | 280 | 195 | 183 |
| 3 | 4 | 20 | 0 | 1,25 | 256 | 226 | 188 | 171 |
| 4 | 4 | 20 | 5,15 | 1,24 | 246 | 220 | 179 | 171 |
| 5 | 2 | 30 | 0 | 0,71 | 370 | 303 | 208 | 179 |
| 6 | 2 | 30 | 5,15 | 0,71 | 408 | 318 | 199 | 178 |
| 7 | 4 | 30 | 0 | 1,06 | 272 | 218 | 183 | 168 |
| 8 | 4 | 30 | 5,45 | 1,08 | 270 | 207 | 174 | 174 |

Fonte: autor.

A Tabela 15, apresenta os resultados do valor-p e F encontrados após os testes de hipóteses. Conclui-se que a energia é o único fator estatisticamente significante.

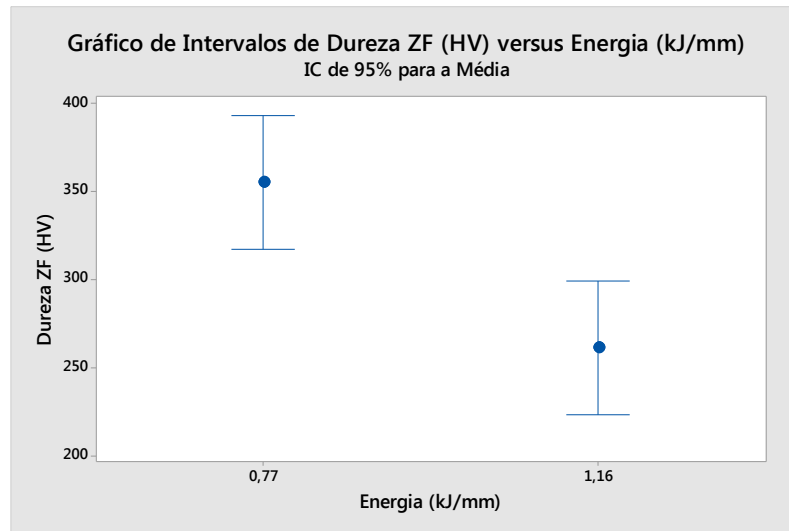
Tabela 15 – Resultados dos testes de hipóteses para as durezas, $\alpha = 0,05$.

| | Energia | | DBCP | | Vento | |
|------------|---------|-------|---------|------|---------|-------|
| | valor-p | F | valor-p | F | valor-p | F |
| Dureza ZF | 0,005 | 18,39 | 0,325 | 1,15 | 0,833 | 0,05 |
| Dureza LF | 0,004 | 21,56 | 0,605 | 0,3 | 0,841 | 0,04 |
| Dureza ZAC | 0,007 | 16,35 | 0,837 | 0,05 | 0,449 | 0,66 |
| Dureza MB | 0,014 | 11,67 | 0,966 | 0 | 1,03 | 0,349 |

Fonte: autor.

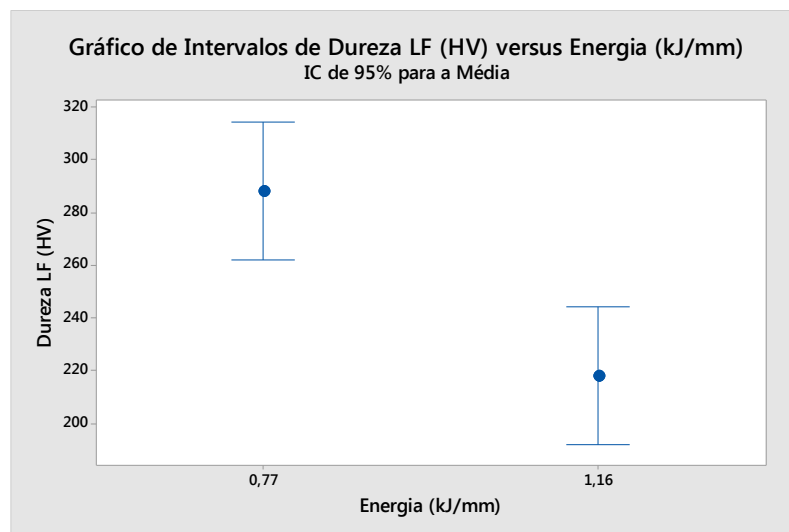
As Figura 51, Figura 52 e Figura 53, apresentam a influência da energia nas médias de dureza da zona fundida, linha de fusão e ZAC, respectivamente. Ao observá-los é possível concluir que a média de dureza reduz a medida em que se aumenta a energia. Isso ocorre, pois, a energia de soldagem altera a microestrutura presente nessas regiões, como foi explicado na seção 5.4. Um maior aporte térmico favorece a formação de fases menos duras e mais grosseiras e a energia mais baixa, aumenta a taxa de resfriamento e favorece a formação de uma microestrutura bainítica, ou seja, mais dura e refinada.

Figura 51 - Influência da energia na dureza da ZF.



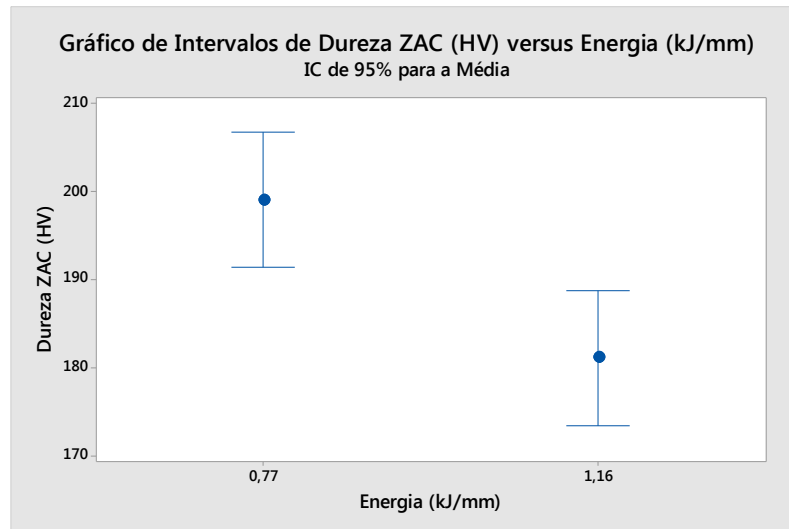
Fonte: autor

Figura 52 - Influência da energia na dureza da linha de fusão.



Fonte: autor

Figura 53 - Influência da energia na dureza ZAC.



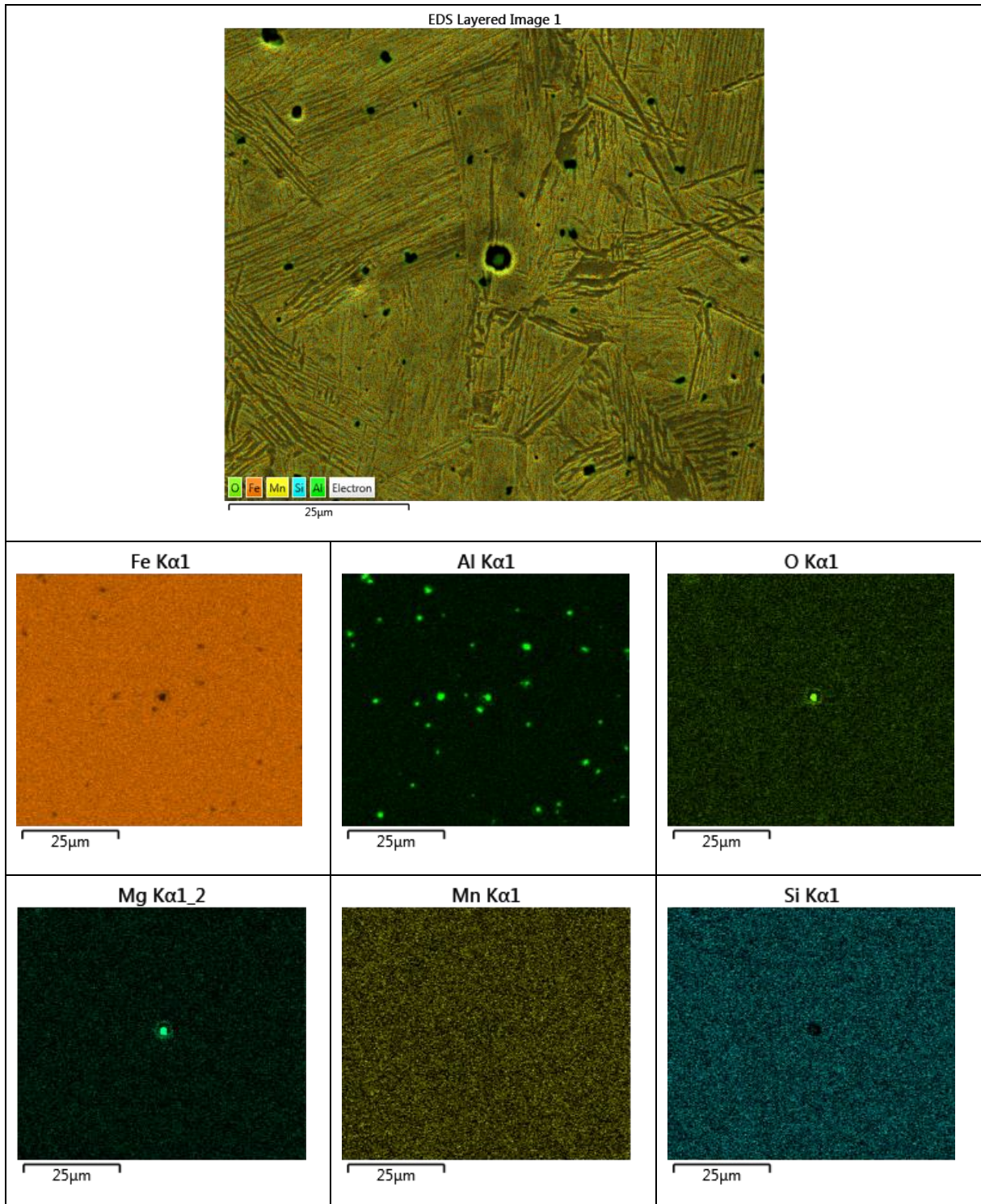
Fonte: autor

5.8 Análise das inclusões.

Ao analisar as imagens das amostras polidas no microscópio, observou-se inclusões de morfologia globular.

A Figura 54 mostra o mapa de composição química realizado pela técnica de EDS na zona fundida de uma amostra. É possível verificar que em grande parte as inclusões são compostas por partículas de alumínio, muito provavelmente Al_2O_3 , porém, foram encontrado vestígios de magnésio, em uma inclusão que não tinha sido totalmente arrancada no polimento, possivelmente se trate de um espinélio (óxido duplo de alumínio e magnésio). O alumínio presente na zona fundida é proveniente do fluxo do eletrodo. Esse elemento possui alta afinidade química com o oxigênio e é bastante utilizado quando se deseja reduzir os teores deste elemento no aço. Na poça de fusão, o alumínio se liga com oxigênio, formando a alumina que se torna inclusão não metálica no término da solidificação.

Figura 54- Mapa de composição química das inclusões da zona fundida.



Fonte: autor.

A Tabela 16 apresenta os dados referentes a quantidade de inclusão em porcentagem de área das imagens analisadas. Para avaliar a significância estatística dos resultados, realizou-se testes de hipóteses (Tabela 17).

Tabela 16 - Porcentagem de inclusões na zona fundida

| Cordão | Valim (m/min) | DBCP (mm) | VENTO (m/s) | ENERGIA (KJ/mm) | Inclusão 200X (%Área) | Inclusão 500X (%Área) |
|--------|------------------|--------------|----------------|--------------------|--------------------------|--------------------------|
| 1 | 2 | 20 | 0 | 0,81 | 1,47 | 1,08 |
| 2 | 2 | 20 | 5,57 | 0,83 | 1,71 | 1,32 |
| 3 | 4 | 20 | 0 | 1,25 | 1,05 | 0,75 |
| 4 | 4 | 20 | 5,15 | 1,24 | 1,26 | 0,99 |
| 5 | 2 | 30 | 0 | 0,71 | 1,47 | 1,12 |
| 6 | 2 | 30 | 5,15 | 0,71 | 1,66 | 1,26 |
| 7 | 4 | 30 | 0 | 1,06 | 0,93 | 0,66 |
| 8 | 4 | 30 | 5,45 | 1,08 | 1,48 | 1,12 |

Fonte: autor.

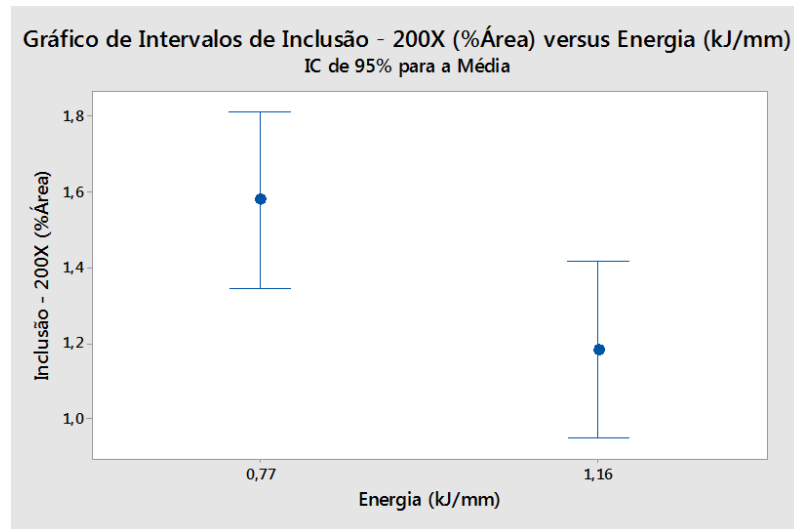
Tabela 17 - Resultados dos testes de hipótese para as inclusões, $\alpha = 0,05$

| | Energia | | DBCP | | Vento | |
|-------------------|---------|------|---------|---|---------|------|
| | valor-p | F | valor-p | F | valor-p | F |
| Inclusões 200x | 0,026 | 8,64 | 0,959 | 0 | 0,139 | 2,91 |
| Inclusões 500x | 0,038 | 7,05 | 0,978 | 0 | 0,1 | 3,78 |

Fonte: autor.

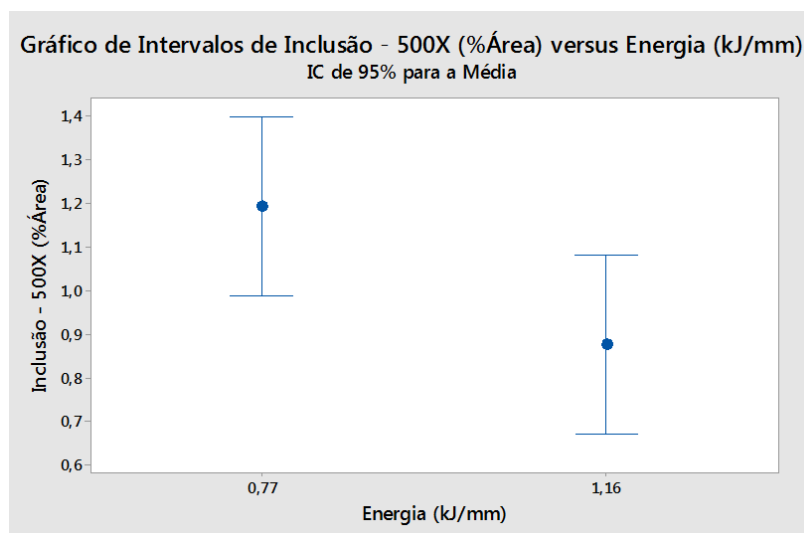
Observando os resultados, constata-se que, para esse trabalho, apenas a energia apresenta significância estatística. As Figura 55 e Figura 56 apresentam os gráficos de intervalo realizados para os dados obtidos a partir das imagens de magnificação de 200X e 500X, respectivamente.

Figura 55 - influência da energia sobre a quantidade de inclusões na ZF - 200X



Fonte: autor.

Figura 56 - influência da energia sobre a quantidade de inclusões na ZF - 500X.

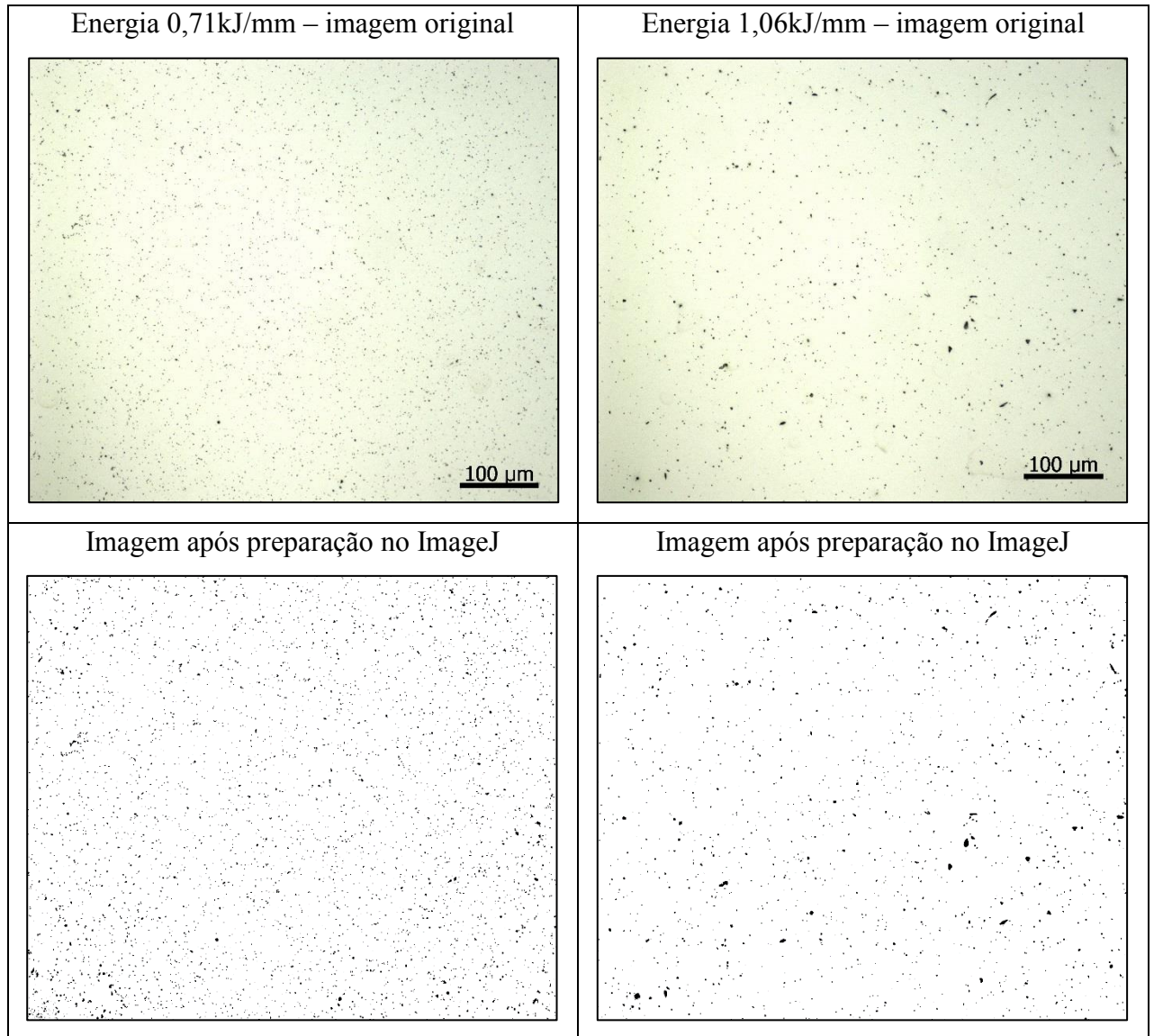


Fonte: autor.

A solubilidade do oxigênio no aço é maior no estado líquido e ao solidificar, o oxigênio que estava em solução começa a ser expulso da matriz (GHOSH, 2001). O alumínio depositado na poça de fusão pelo eletrodo, se combina com o oxigênio, formando óxidos, Al_2O_3 . Por possuir menor densidade, esses óxidos tendem a sobrenadar a poça e se concentrar na escória. Contudo, o tempo de solidificação não é suficiente e parte desses óxidos solidificam no interior da zona fundida, formando as inclusões não metálicas. Como já discutido, a medida em que a energia de soldagem é reduzida, mais rápido é o resfriamento. Dessa forma, os óxidos têm menos tempo para sair da zona fundida e como resultado, verifica-se um maior número de inclusões no metal de solda.

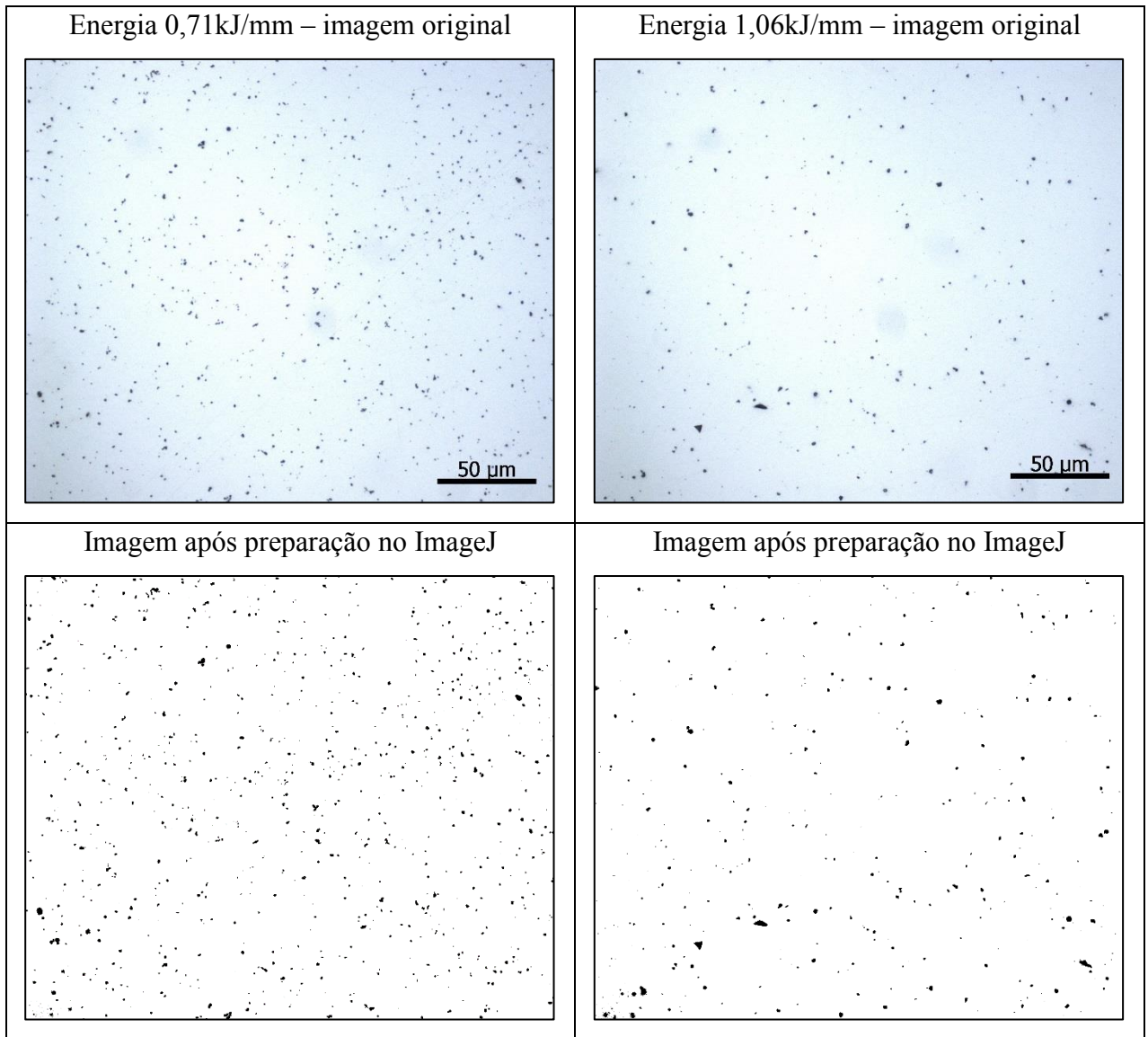
As Figura 57 e Figura 58, mostram a influência da energia na quantidade de inclusões. Nelas é possível verificar, como foi dito anteriormente, a maior quantidade de inclusões no cordão de menor energia.

Figura 57 – Nível de inclusões da zona fundida – influência da energia de soldagem. Aumento 200X, DBCP 30mm, soldagem sem influência de correntes de ar forçado.



Fonte. Autor.

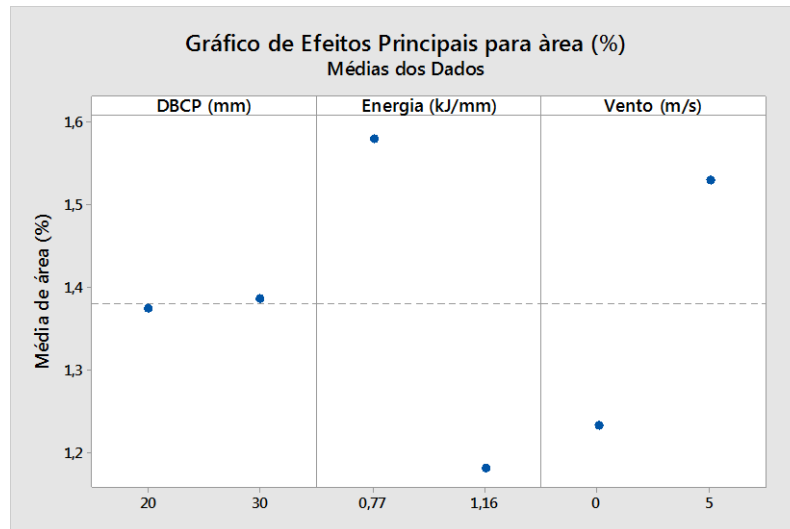
Figura 58 – Nível de inclusões da zona fundida – influência da energia de soldagem. Aumento 500X, DBCP 30mm, soldagem sem influência de correntes de ar forçado.



Fonte: autor.

A Figura 59 apresenta os efeitos principais sobre o teor de inclusões.

Figura 59 - Principais efeitos sobre a quantidade de inclusões da ZF - 200X



Fonte: autor.

Conclui-se que, apesar de não possuir significância estatística, o vento possui certa relevância sobre a quantidade de inclusões na zona fundida. Portanto, foi observado que o número de inclusões tende a aumentar quando se está soldando sob os efeitos de correntes de ar.

A Tabela 18, apresenta a correlação entre os fatores de controle e a quantidade de inclusões na zona fundida.

Tabela 18 – Correlação entre os fatores e o nível de inclusões.

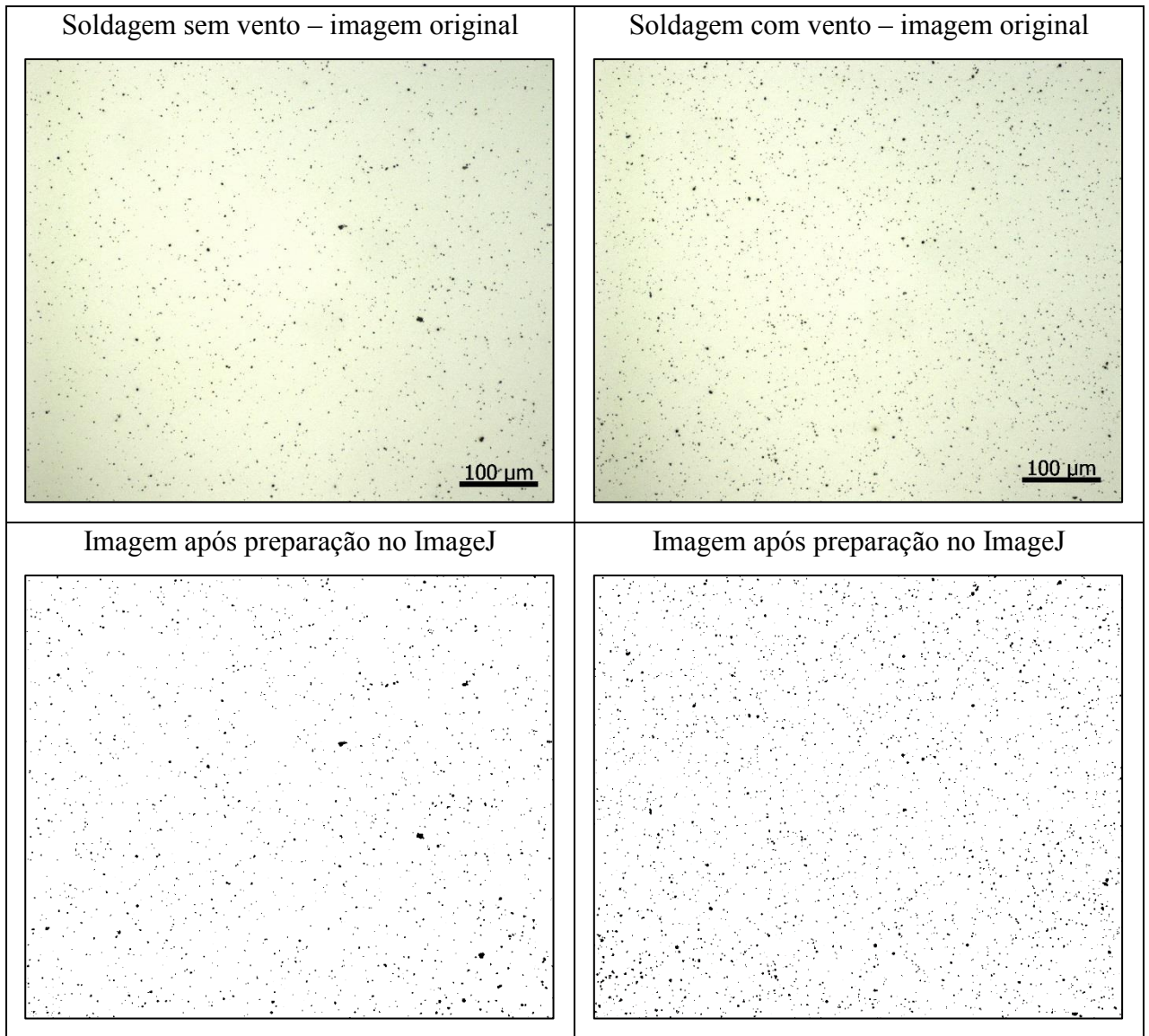
| | <i>DBCP</i> | <i>VENTO</i> | <i>ENERGIA</i> |
|-----------------|-------------|--------------|----------------|
| Inclusão - 200X | 0,02 | 0,58 | -0,71 |
| Inclusão - 500X | 0,01 | 0,63 | -0,68 |

Fonte: autor.

Observa-se que existe uma correlação média e positiva com o vento e uma correlação maior, porém negativa com a energia. Conclui-se, portanto que apesar de não possuir significância, o vento possui relevância.

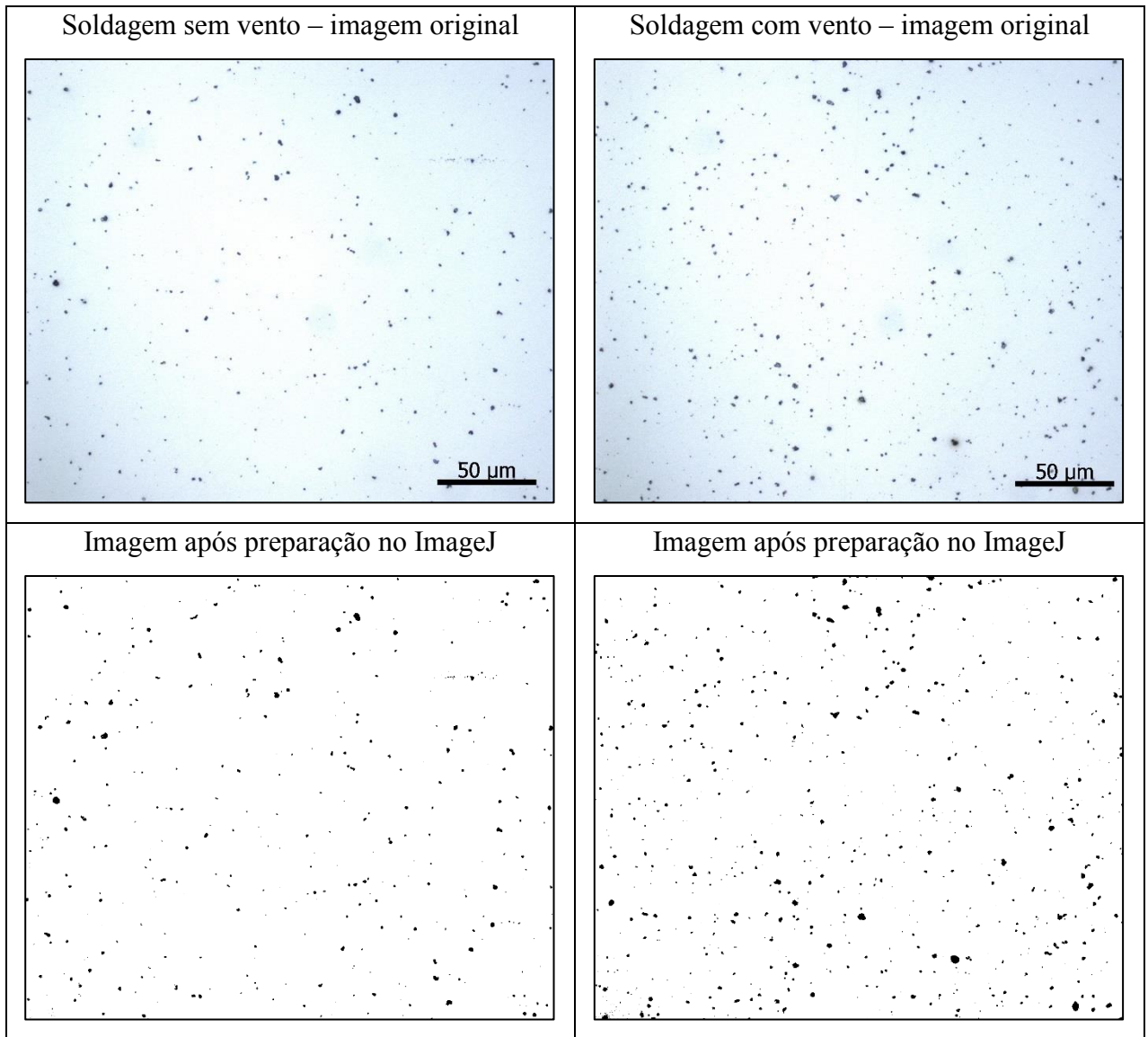
As Figura 60 e Figura 61 apresentam a influência do vento na quantidade de inclusões. Como já discutido, a presença de correntes de ar influencia diretamente no nível de inclusões.

Figura 60 - Nível de inclusões da zona fundida – influência de correntes de ar. Aumento 200X, DBCP 30mm, energia de soldagem 1,06kJ/mm.



Fonte: autor.

Figura 61 - Nível de inclusões da zona fundida – influência de correntes de ar. Aumento 500X, DBCP 30mm, energia de soldagem 1,06kJ/mm.



Fonte: autor

6 - CONCLUSÃO

Baseado nos resultados obtidos e discutidos nesse trabalho, conclui-se que:

- O eletrodo utilizado, apresentou resultados satisfatórios, tendo em vista que o arco se manteve estável durante as soldagens e mesmo quando sobre influência de correntes de ar, nenhuma propriedade estudada foi alterada de forma estatisticamente significativa por influência do vento;
- A alteração da DBCP não prejudicou estabilidade do arco nem influenciou significativamente nos resultados, com exceção da diluição, que reduziu de 50% para 40%, em média, com o aumento da distância do bico de contato em relação a peça.
- A energia de soldagem influenciou nas microestruturas da zona fundida e zona afetada pelo calor e, por conseguinte, na média de dureza destas regiões. Apresentou, para os níveis testados, influência na geometria e diluição, bem como na quantidade de inclusões presentes na zona fundida. Por fim, melhorou o rendimento, quando se elevou o nível energético.
- As inclusões presentes na zona fundida possuem morfologia globular e são, basicamente, óxidos de alumínio duplo óxidos de alumínio e magnésio. Verificou-se que a quantidade desses elementos é influenciada inversamente pela energia e diretamente pela presença de correntes de ar.

7- SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

- Avaliar a influência da distância do bico de contato a peça na diluição.
- Examinar a interferência da energia de soldagem e do vento na tenacidade da junta soldada com eletrodo autoprottegido.

8 - REFERÊNCIAS

- CALLISTER, W. D. **Fundamentos de Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Abordagem Integrada**. Rio de Janeiro: LTC, 2014.
- CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**. São Paulo: ABM, 2008.
- COLPAERT, H. **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns**. São Paulo: Blucher, 2008.
- COSTA E SILVA, A. L. V. **Aços e Ligas Especiais**. São Paulo: Blucher, 2006.
- FORTES, C.; ARAÚJO, W. **Arames Tubulares OK.**: ESAB BR, 2004.
- GHOSH, A. **Secondary Steelmaking: Principles and Applications**. USA: CRC Press LLC, 2001.
- MACHADO, I. G. **Soldagem e Técnicas Conexas: Processos**. Porto Alegre: Editado pelo autor, 1996.
- MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BACARENSE, A. Q. **Soldagem: Fundamentos e Tecnologia**. Belo Horizonte: UFMG, 2005.
- MIRANDA, H. C. D. **Reconhecimento e Controle da Transferência Metálica no Processo MIG/MAG Pulsado**. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, p. 248. 2002.
- MODENESI, P. J. **Soldabilidade dos Aços Transformáveis**. Belo Horizonte: UFMG, 2012.
- MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V.; SANTOS, D. B. **Introdução à Metalurgia da Soldagem**. Belo Horizonte: UFMG, 2012.
- OKUMARA, T.; TANIGUCHI, C. **Engenharia de Soldagem e Aplicações**. Rio de Janeiro: LTC, 1982.
- ORDÓÑEZ, R. E. C. **Soldagem e Caracterização das Propriedades Mecânicas de Dutos de Aço API 5L-X80 com Diferentes Arames Tubulares**. Dissertação (Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica). Campinas, p. 111. 2004.
- ROCHA, C. R. **Estudo sobre a Influência das Correntes de Ar durante a Execução da Solda pelos Processos de Soldagem por Eletrodo Revestido (SMAW), Eletrodo Tubular (FCAW) e Eletrodo Tubular Auto Protegido (FCAW-S)**. Scientia Plena, Fevereiro 2015.
- WAINER, E. **Soldagem: processos e metalurgia**. São Paulo: Blucher, 1992.