

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

GULLIVER CATÃO SILVA

**ANÁLISE COMPARATIVA DO CORDÃO DE SOLDA GERADO PELOS
PROCESSOS DE SOLDAGEM FCAW E SMAW NA SOLDAGEM DE AÇOS DE
BAIXO TEOR DE CARBONO**

JUIZ DE FORA

2016

GULLIVER CATÃO SILVA

**ANÁLISE COMPARATIVA DO CORDÃO DE SOLDA GERADO PELOS
PROCESSOS DE SOLDAGEM FCAW E SMAW NA SOLDAGEM DE AÇOS DE
BAIXO TEOR DE CARBONO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Moisés Luiz Lagares Júnior

JUIZ DE FORA

2016

GULLIVER CATÃO SILVA

**ANÁLISE COMPARATIVA DO CORDÃO DE SOLDA GERADO PELOS
PROCESSOS DE SOLDAGEM FCAW E SMAW NA SOLDAGEM DE AÇOS DE
BAIXO TEOR DE CARBONO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Aprovada em 18 de fevereiro de 2016.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Moisés Luiz Lagares Júnior (Orientador)

Universidades Federal de Juiz de Fora.

Prof. Dr. Lecino Caldeira.

Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Sudeste de Minas Gerais.

Prof. Dr. Raphael Fortes Marcomini

Universidade Federal de Juiz de Fora

Dedico este trabalho a minha mãe
Maria do Carmo e a meu pai Paulo
César, pelo amor incondicional e
suporte.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelas oportunidades concedidas em minha vida, e pelo seu imenso amor.

Aos meus pais, que com todo amor e apoio, me permitiram chegar até aqui, sem eles essa conquista não teria sido possível.

Agradeço a Laís Carneiro por toda a paciência e apoio durante a confecção deste trabalho, tornando meus dias mais agradáveis.

Ao meu orientador Prof. Dr. Moises Lagares pela orientação, atenção e contribuição científica, e também, ao Prof. Dr. Raphael Fortes Marcomini por ter prontamente aceitado o convite para minha banca.

Ao prof. Dr. Lecino Caldeira pelo companheirismo, imensa ajuda e coorientação deste trabalho; e por ter, juntamente com o Departamento de Metalurgia do IFSUDEST-JF, permitido a utilização de toda a estrutura do mesmo.

A Paula Graciele, técnica do laboratório de Metalografia do Ifsudest-JF, por todo apoio e ajuda, e aos funcionários dos laboratórios da UFJF, Guilherme e Matheus, pelo apoio e participação durante a fase de realização dos ensaios.

Ao Matheus Albertoni e a ESAB pela doação dos materiais.

Aos meus amigos André, Artur, Claudio, Pelegrino e Thiago, pelos dias de faculdade.

Aos amigos da MRS, em especial, ao Marcelo Neder, pelo apoio durante essa fase em minha formação que, prontamente permitiram que eu me ausentasse algumas vezes para realização deste trabalho

E, finalmente, a todos aqueles que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

*Seremos homens melhores onde
estivermos. O mundo é que está
errado!*

(Dead Fish- Bem-Vindo ao Clube!)

RESUMO

A formação dos cordões de soldas gerados pelos processos de soldagem por Eletrodo Revestido (SMAW – Shielded Metal Arc Welding) e Eletrodo Tubular (FCAW – Flux Cored Arc Welding) apresentam diferenças quanto à estabilidade do arco, densidades de correntes, qualidade dos cordões, produtividade e geometrias. A escolha de um dos dois processos, para uma determinada aplicação deve considerar como cada uma das variáveis citadas afeta a qualidade das soldas, além de considerar o custo benefício da utilização de equipamentos mais robustos e mais caros (custos de soldagem). Para subsidiar esta escolha, este trabalho tem como objetivo avaliar os cordões de solda gerados por ambos os processos na soldagem de aços de baixo teor de carbono, mantendo-se como parâmetro de comparação a mesma energia de soldagem entre os processos. Além disso, estudou-se como a mudança na energia de soldagem fornecida à peça afeta o cordão de solda. Para a realização do experimento utilizou-se um planejamento fatorial 2^2 com repetição, tendo como metal de base o aço ABNT 1010, e como metais de adição, o arame tubular ASME SFA 5.20 e o Eletrodo Revestido ASME E7018, ambos de fabricação nacional. Os resultados mostraram que para baixos níveis de energia de soldagem os cordões de ambos os processos possuem características semelhantes e para maiores energias de soldagem o cordão de solda formado por eletrodos revestidos possuem maiores frações volumétricas de constituintes de menor dureza e tenacidade.

Palavras-chave: Soldagem; FCAW; SMAW.

ABSTRACT

The formation of welding beads generated by welding processes for coated electrode (SMAW - Shielded Metal Arc Welding) and Electrode Tubular (FCAW - Flux Cored Arc Welding) present differences in the arc stability, current densities, bead quality, productivity and geometries. The choice of one of two types for a particular application should consider how each of those variables affects the quality of the welds, in addition to considering the cost benefit of using more robust and more expensive equipment (welding costs). To support this choice, this study aims to evaluate the weld beads generated by both processes in welding of low carbon steels, while remaining as a benchmark the same energy welding between processes. In addition, it was studied how the change in the supplied base metal welding energy affects the weld bead. For the experiment it was used a factorial design 2^2 with repetition, ABNT 1010 base metal steel, and as filler metals, the cored wire ASME SFA 5.20 and stick welding ASME E7018, both manufactured in Brazil. The results showed that for the low levels of welding power beads of both processes have similar characteristics and for the higher energy welding the weld bead formed by coated electrodes have higher volume fractions of constituents of lower hardness and toughness

Keywords: Welding; FCAW; SMAW.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Região do arco na soldagem.....	20
Figura 2: Esquema de Classificação AWS A 5.1 Para eletrodos de Aço carbono e Baixa Liga.....	23
Figura 3: Esquema de Classificação AWS Para Arames Tubulares.....	25
Figura 4: Microestrutura do cordão de solda mostrando diferentes microconstituintes segundo IIW.....	31
Figura 5: Fonte de Soldagem IMC Digiplus A7 (a) e Central Refrigeradora (b).....	36
Figura 6: Tartilope V2.....	36
Figura 7: Sistema de Aquisição de dados SAP V4.....	37
Figura 8: Oscilogramas de corrente de soldagem e tensão do arco obtidos para nível baixo de ES. (a) Eletrodo Revestido $I = 136,93 \pm 13$ A (9%) e $V = 23,73 \pm 4,0$ V (17%). (b) Arame Tubular $I = 172,36 \pm 23$ (13%) A, $V = 27,35 \pm 1,17$ V (4%), $VA = 6,88 \pm 0,13$ m/min (2%).....	45
Figura 9: Oscilogramas de corrente de soldagem e tensão do arco obtidos para nível alto de ES. (a) Eletrodo Revestido $I = 234,47 \pm 6,7$ A (3%) e $V = 26,32 \pm 4,6$ A (17%). (b) Arame Tubular $I = 247,86 \pm 15$ (6%) A, $V = 30,00 \pm 0,81$ V (3%), $VA = 10,10 \pm 0,38$ m/min (4%).....	46
Figura 10: Oscilogramas de corrente de soldagem e tensão do arco obtidos para nível baixo de ES para a Repetição. (a) Eletrodo Revestido $I = 137,0 \pm 14,9$ A (11%) e $V = 23,36 \pm 4,6$ A (14%). (b) Arame Tubular $I = 183,00 \pm 18$ (10%) A, $V = 27,27 \pm 0,91$ V (3%), $VA = 6,83,10 \pm 0,25$ m/min (4%).....	46
Figura 11: Oscilogramas de corrente de soldagem e tensão do arco obtidos para Nível Alto de ES para a Repetição. (a) Eletrodo Revestido $I = 228,0 \pm 5,5$ A (2%) e $V = 26,38 \pm 4,3$ V (16%). (b) Arame Tubular $I = 252,83 \pm 12,2$ (5%) A, $V = 30,36 \pm 0,71$ V (2%), $VA = 9,93 \pm 0,36$ m/min (4%).....	47

Figura 12: Aspecto superficial dos cordões obtidos. (a) Eletrodo Revestido ES -. (b) Arame Tubular ES-. (c) Eletrodo Revestido ES+. (d) Arame Tubular ES+.....	49
Figura 13: Aspecto superficial dos cordões obtidos para as Repetições. (a) Eletrodo Revestido ES -. (b) Arame Tubular ES-. (c) Eletrodo Revestido ES+. (d) Arame Tubular ES+.....	50
Figura 14: Aspecto Macrográfico do Cordão de Solda, Seção Transversal, Nital 3%. (a) Eletrodo Revestido ES -. (b) Arame Tubular ES-. (c) Eletrodo Revestido ES+. (d) Arame Tubular ES+.....	52
Figura 15: Aspecto Macrográfico do Cordão de Solda, Seção Transversal, Nital 3%, Repetição. (a) Eletrodo Revestido ES -. (b) Arame Tubular ES-. (c) Eletrodo Revestido ES+. (d) Arame Tubular ES+.....	52
Figura 16: Aspecto Micrográfico do Cordão de Solda, Seção Transversal, Sem ataque. (a) Eletrodo Revestido ER - 01. (b) Arame Tubular AT – 02.....	54
Figura 17: Aspecto Micrográfico do Metal de Base, Seção Transversal, Nital 3%, 200x.....	54
Figura 18: Aspecto Micrográfico da zona de transição, Seção Transversal, Nital 3%, 50x. (a) Eletrodo Revestido (ER-01). (b) Arame Tubular (AT – 01).....	55
Figura 19: Soldagem SMAW. Comparação da Fração volumétrica (%) entre os níveis de energia de soldagem com repetição.....	56
Figura 20: Soldagem FCAW. Comparação da Fração volumétrica (%) entre os níveis de energia de soldagem com repetição.....	56
Figura 21: Aspecto Micrográfico da zona fundida, Seção Transversal, Nital 3%, 500x. (ER-01).....	57
Figura 22: Aspecto Micrográfico da zona fundida, Seção Transversal, Nital 3%, 500x. (AT – 01).....	57

Figura 23: Fração Volumétrica Média (%) dos Constituintes da Zona Fundida. Barra de Erro 5% para a série selecionada. FCAW58

Figura 24: Aspecto Micrográfico da zona fundida com frações volumétricas dos tipos PF(G) e PF(I), Seção Transversal, Nital 3%, 1000x. (ER+01).....59

Figura 25: Aspecto Micrográfico da zona fundida com frações volumétricas dos tipos AF, PF(G) e FS(NA). Seção Transversal, Nital 3%, 200x. (AT+01).....59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Dados do Arame Tubular Fornecido pelo fabricante.....	34
Tabela 2: Dados do Eletrodo Revestido Fornecido Pelo Fabricante.....	34
Tabela 3: Composição Química Metal de Base.....	35
Tabela 4: Dados Técnicos Fonte Eletrônica Transistorizada DigiPlus A7.....	35
Tabela 5: Planejamento Fatorial 2 ² com repetição.....	38
Tabela 6: Corrente (A), Tensão (V), Velocidade de Soldagem (VS) e Energia de Soldagem (ES) obtidas em cada teste.....	47
Tabela 7: Aspectos Geométricos do Cordão de Solda. W – Largura, h – reforço, Pmax – penetração máxima, Ad – Área depositada, Ap – Área de Penetração e δ – Diluição.....	51
Tabela 8: Fração volumétrica dos microconstituintes presentes na zona fundida. Intervalo de confiança: 95 %.....	55
Tabela 9: Dureza Vickers (HV) e Limite de Resistência Mecânica Na região da zona fundida. Intervalo de confiança de 95%.....	60

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AF - Ferrita Acicular.

ASME - American Society of Mechanical Engineers

ASTM - American Society for Testing and Materials.

AT - Arame Tubular.

AWS – American Welding Society

BOP - Bead on Plate.

DBCP - Distância bico de contato peça.

ER - Eletrodo Revestido.

Es - Energia de Soldagem.

FCAW – Flux Cored Arc Welding.

FS(A) - Ferrita com Segunda Fase Alinhada

FS(NA) - Ferrita com Segunda Fase não Alinhada

GMAW - Gás Metal Arc Welding.

Mf - Massa final do Metal de Base depois da Soldagem.

MIG/MAG – Metal Inert Gas/Metal Active Gas

Mi - Massa inicial do Metal de Base antes da Soldagem.

PF - Ferrita Primária.

PF(G) - Ferrita Primária de Contorno de Grão.

PF(I) - Ferrita Poligonal Intragranular.

SAP - Sistema de aquisição portátil

SMAW – Shielded Metal Arc Welding,

TD – Taxa de deposição.

TF- Taxa de Fusão.

Ts – Tempo de soldagem.

Vs - Velocidade de Soldagem.

ZTA - Zona Termicamente Afetada.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	16
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	16
1.2 JUSTIFICATIVA.....	16
1.3 ESCOPO DO TRABALHO.....	17
1.4 OBJETIVOS.....	17
1.5 DEFINIÇÃO DA METODOLOGIA.....	17
1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	18
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
2.1 O PROCESSO DE SOLDAGEM SMAW.....	19
2.1.1 Classificação dos eletrodos.....	21
2.1.2 Classificação dos eletrodos quanto ao revestimento.....	22
2.2 O PROCESSO DE SOLDAGEM FCAW.....	24
2.2.1 Consumíveis.....	24
2.2.2 Influência da composição dos gases de proteção.....	27
2.2.2.1 Influência do Argônio na soldagem de arame tubulares.....	27
2.2.2.2 Influência do Dióxido de Carbono na soldagem de arame tubulares.....	28
2.2.3 Soldabilidade dos Aços Carbono.....	29
2.2.3.1 Microestrutura da Zona Fundida dos Aços de Baixo teor de Carbono.....	30
2.2.3.2 Influência da composição química e da velocidade de resfriamento na formação da poça de fusão.....	31
2.2.3.3 – Microestrutura da Zona Fundida em Soldas de Vários Passes.....	32

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	34
3.1 MATERIAIS.....	34
3.2 DESCRIÇÃO DOS EQUIPAMENTOS.....	35
3.2.1 Central de Soldagem Multiprocessos.....	35
3.2.2 Equipamentos para Ensaio Metalográficos.....	37
3.3 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL.....	37
3.4 METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	40
3.4.1 Elaboração dos cordões.....	40
3.4.2 Preparação das amostras para análise macrográfica e micrográfica.....	40
3.4.3 Avaliação macro e micrográfica do Cordão de Solda.....	41
3.4.3 Metodologia experimental para avaliação da microdureza e Limite de Resistência mecânica.....	42
3.4.4 Metodologia experimental para análise da taxa de deposição e rendimento de deposição.....	42
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
4.1 AVALIAÇÃO DOS OSCIOGRAMAS DE CORRENTE E TENSÃO.....	44
4.2 ANÁLISE SUPERFICIAL E MACROGRÁFICA DOS CORDÕES.....	48
4.3 AVALIAÇÃO MICROESTRUTURAL DA REGIÃO FUNDIDA.....	53
5. CONCLUSÃO.....	61
6. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	63
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	64
8. ANEXO I - TERMO DE AUTENTICIDADE.....	67

1. INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A indústria atual tem buscado a maximização da produção com o menor custo de fabricação possível, que juntamente com a eficiência energética compõe os principais desafios técnicos da indústria moderna. Devido à necessidade de um aumento na produtividade é que os processos de soldagem utilizando gases inertes ganharam força nas últimas décadas, uma vez que, são capazes de fornecer elevadas densidades de correntes fornecidas pelas fontes modernas e, principalmente, pela tendência à automatização do processo, foram pioneiros na possibilidade de se conectar um computador em uma máquina de solda, sendo capazes de acompanhar as variáveis obtendo respostas mais rápidas e eficientes (MOREIRA FILHO, 2008).

O processo de soldagem por eletrodo revestido SMAW (Shielded Metal Arc Welding), é o processo de soldagem mais conhecido e dominado por grande parte dos envolvidos na soldagem de materiais metálicos, especialmente os aços carbonos. Porém, por se tratar de um processo que oferece baixa densidade de corrente e conseqüentemente baixa taxa de deposição, sua produção comparada com os processos que são facilmente automatizados é limitada. Em contrapartida, a soldagem usando arames eletrodos oferece uma alta taxa de deposição e produção, além de nos oferecer um maior ganho em qualidade e acabamento, especialmente a soldagem utilizando arames tubulares (Fluxed Cored Arc Welding - FCAW), pois é capaz de unir as características da soldagem MIG/MAG convencional com os da soldagem por arco submerso devido à utilização de um fluxo interno em seus arames eletrodos garantindo o aumento da produção e proteção do cordão de solda. Sendo possível utilizar em todas as posições de soldagem, torna o processo altamente versátil e de fácil automatização e controle manual. Para determinadas aplicações, principalmente as que envolvem ganho de produtividade, tem-se substituído a utilização de eletrodos revestidos pelos arames tubulares, logo torna-se necessário entender sobre quais circunstâncias a substituição de um método de soldagem pelo outro afeta a qualidade final do cordão de solda.

1.2 JUSTIFICATIVA

Dado que a utilização dos arames tubulares tem evoluído nas últimas décadas, estudos têm sido feitos visando à substituição dos métodos convencionais de soldagem por métodos que são de fácil automatização. Existe um gama de trabalhos visando entender o

comportamento dos arames tubulares para que a substituição dos métodos convencionais seja feita da melhor forma possível, principalmente em materiais de alta resistência, porém, não se encontrou na literatura especializada referências relevantes quanto a utilização da soldagem FCAW em substituição aos eletrodos revestidos do tipo ASME E7018, que é um dos tipos mais utilizados na soldagem de aços de baixo teor de carbono. O que se encontrou na bibliografia foram citações de alguns fabricantes estabelecendo que há uma semelhança no comportamento de ambos os cordões formados, porém, sem destacar sobre quais condições essa semelhança é estabelecida.

1.3 ESCOPO DO TRABALHO

Para que se possa ter um parâmetro de escolha entre um desses processos, foram estudadas as principais características do cordão de solda gerado pelos dois tipos de soldagem, em dois níveis diferentes de aporte térmico com repetição de pelo menos uma amostra, totalizando quatro condições distintas e um total de 8 amostras (uma repetição). Os cordões foram feitos no Laboratório de Soldagem da UFJF e a análise metalográfica foi feita no departamento de metalurgia do Instituto Federal de Ciência e Tecnologia do Sudeste de Minas Gerais (IFSudeste – Campus Juiz de Fora). Após a realização de todos os ensaios e pré-testes, foram feitas comparações entre os cordões de solda obtidos em cada processo.

1.4 OBJETIVOS

Este trabalho tem por objetivo comparar o cordão de solda gerado pelo processo de soldagem por arame tubular, utilizando o arame ASME SFA 5.20 do tipo básico, com o cordão de solda gerado pelo processo de soldagem utilizando eletrodos revestidos do tipo ASME E7018 na soldagem de aços de baixo carbono, mantendo-se como parâmetro de comparação a mesma energia de soldagem entre os processos. Além disso, estudou-se como a mudança na energia de soldagem fornecida à peça pode afetar o cordão de solda.

1.5 DEFINIÇÃO DA METODOLOGIA

Para que tal estudo seja feito, utilizou-se um planejamento fatorial do tipo 2^2 com repetição de pelo menos uma condição de soldagem. Os fatores do planejamento foram os dois tipos de soldagem (FCAW e SMAW) e os níveis do planejamento serão duas diferentes energias de soldagem fornecida à peça, um nível mais baixo e um nível cerca de 50% maior

do que o nível “baixo”, chamado de nível “alto”. Foram elaborados cordões tanto para eletrodos revestidos quanto para arames tubulares com os mesmos níveis de energia estabelecidos, e então, foi avaliado; a estabilidade operacional através da avaliação dos oscilogramas de corrente e tensão, o aspecto superficial, geometria do cordão; fração volumétrica de cada microconstituente formado através da análise metalográfica e por fim, foi feito o ensaio de dureza para avaliação aproximada do limite de resistência mecânica. Através de todos esses dados será possível comparar os cordões formados por cada tipo de soldagem.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho encontra-se organizado em seis capítulos. O primeiro capítulo compreende a estrutura da análise que será realizada. O segundo capítulo apresenta a revisão bibliográfica do assunto a ser abordado. Este capítulo apresenta o conceito de cada tipo de processo de soldagem utilizado neste trabalho, e apresenta conceitos importantes que foram necessários para análise dos resultados obtidos.

O terceiro capítulo apresenta a metodologia que foi utilizada para realização dos ensaios e comparação dos dois processos de soldagem. Além de descrever os principais materiais e equipamentos utilizados, apresenta a metodologia e o procedimento experimental utilizado a fim de cumprir o objetivo de comparação deste trabalho.

O quarto capítulo apresenta os resultados obtidos dos experimentos realizados com a realização de comentários pertinentes. O quinto capítulo estabelece a conclusão das análises realizadas no capítulo anterior e apresenta uma sugestão para aplicação de cada um dos processos de soldagem. O sexto capítulo apresenta algumas sugestões para trabalhos futuros. E, por fim, o sétimo capítulo traz as referências bibliográficas utilizadas neste trabalho.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Segundo a ASTM (American Society for Testing and Materials) a soldagem pode ser definida com o “Processo de união de materiais usados para obter coalescência (união) localizada de metais e não metais, produzida por aquecimento até uma temperatura adequada com ou sem a utilização de pressão e/ou material de adição”. Porém alguns processos de soldagem têm sido utilizados para depositar materiais sobre uma superfície visando a proteção ou recuperação contra o desgaste, formando uma espécie de revestimento especial, logo esse conceito é limitador. Assim, levando em consideração todos os processos envolvidos, na união, proteção e o aspecto conceitual, a soldagem pode ser definida como “O processo de união baseado no estabelecimento de forças de ligação química de natureza similar às atuantes no interior dos próprios materiais, na região de ligação entre os materiais que estão sendo unidos” (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009, pp.18-19).

2.1 O PROCESSO DE SOLDAGEM SMAW

O processo de soldagem utilizando eletrodo revestido ou SMAW (Shielded Metal Arc Welding) é o mais conhecido e empregado processo de união de materiais devido à sua facilidade de uso e equipamentos de custo relativamente mais baixo se comparado a outros processos de soldagem. A soldagem é realizada pelo calor liberado por um arco elétrico mantido entre a extremidade de um eletrodo metálico revestido e a peça de trabalho. O calor 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, onde protege o metal de solda da atmosfera durante a solidificação (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

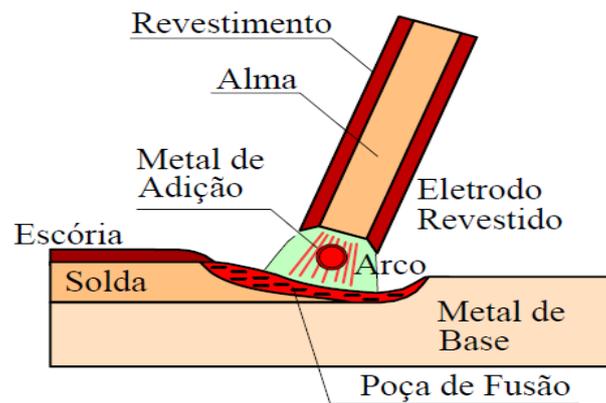


FIGURA 1: Região do arco na soldagem SMAW. MARQUES; MONDESI; BRACARENSE, 2009.

Fonte: Soldagem Fundamentos e Tecnologia, 3ª edição. pp 180.

O equipamento básico para soldagem com eletrodo revestido possui umas das mais simples configurações possível, em comparação aos outros processos elétricos, consiste basicamente de:

- Fonte de energia
- Alicates para fixação dos eletrodos
- Cabos de interligação
- Eletrodos
- Pinça para ligação à peça
- Equipamento para limpeza de solda

Em todos os processos de soldagem por arco elétrico, a aplicação e utilização dos equipamentos corretos são de grande importância para a garantia de um cordão de solda livre de discontinuidades. O termo parâmetro de soldagem se refere a todas as variáveis do processo de soldagem necessárias para a deposição de material em uma junta soldada. Uma característica importante da soldagem com eletrodos revestidos é que a tensão do arco não é controlada, ou seja, é função dos outros parâmetros de soldagem como a corrente e o comprimento do arco, uma vez que o controle da distância entre o eletrodo e a peça é realizado manualmente, sem grande precisão, a transferência metálica está associada a

variações no comprimento efetivo do arco e maiores tensões são requeridas para operação à medida que a corrente de soldagem é aumentada.

A corrente de soldagem exerce influência sobre praticamente todas as características operatórias do processo; o aspecto do cordão, propriedades da junta da soldada, penetração e geometria do cordão. Fixados todos os outros parâmetros de soldagem a intensidade da corrente elétrica é determinante na taxa de deposição do material e no aporte térmico fornecido à peça. A velocidade de avanço é a segunda variável mais importante no processo, apesar de seu controle ser impreciso no caso de operações manuais, a altura e a largura do cordão variam inversamente com a velocidade de avanço. (WAINER; BRANDI; MELLO, 2008).

2.1.1 Classificação dos eletrodos

Os Eletrodos Revestidos para soldagem de aços carbono consistem de apenas dois elementos principais: a alma metálica e o revestimento. Os revestimentos consistem de misturas de compostos minerais e/ou orgânicos com a finalidade de proteger a poça de fusão. A alma metálica contém alguns elementos residuais, porém os teores de fósforo e enxofre devem ser muito baixos para evitar fragilização no metal de solda. A matéria prima para a alma metálica é um fio-máquina laminado a quente na forma de bobinas, que é posteriormente trefilado a frio até o diâmetro adequado do eletrodo. A alma metálica tem as funções principais de conduzir a corrente elétrica e fornecer metal de adição para a junta (WAINER; BRANDI; MELLO, 2008).

As funções do revestimento são:

- Proteção do metal de solda - Proteger a poça de fusão do oxigênio e do nitrogênio do ar quando transferido através do arco, e enquanto está se solidificando. A proteção é necessária para garantir que o metal de solda seja livre de bolhas de gases e tenha a resistência e a ductilidade adequadas uma vez que a altas temperaturas o nitrogênio e o oxigênio se combinam com o ferro e formam nitretos de ferro e óxidos de ferro que podem causar fragilidade e porosidade.
- Estabilização do arco - Facilidade na abertura do arco de soldagem mesmo a baixas correntes, e ajudar a manter o arco elétrico estável independentemente do seu comprimento.

- Adição de elementos de liga ao metal de solda - Elementos de liga tais como cromo, níquel, molibdênio, vanádio e cobre, podem ser adicionados ao metal de solda para melhorar as propriedades da junta soldada (Esab, 2005).
- Direcionamento do arco elétrico - Facilitam o direcionamento do fluxo do arco elétrico.
- Agente fluxante - A função da escória é fornecer proteção adicional contra os contaminantes atmosféricos, agir como purificadora e absorver impurezas que são levadas à superfície e ficam aprisionadas pela escória e reduzir a velocidade de resfriamento do metal fundido para permitir o escape de gases (Esab, 2005).
- Características da posição de soldagem - Facilidade na abertura do arco em diferentes posições.

2.1.2 Classificação dos eletrodos quanto ao revestimento

Segundo Wainer, Brandi e Mello (2008) os principais tipos de revestimentos encontrados nos eletrodos são os celulósicos, rutilicos, básicos e ácidos, sendo sua classificação baseada no tipo de escória e gases de proteção que são formados após o aumento de temperatura, segue abaixo a descrição de cada um dos principais revestimentos.

- Eletrodos Rutilicos: O revestimento destes eletrodos possui mais de 20% de óxido de titânio, obtido através da areia de rutilo ou ilmenita. São capazes de conferir alta estabilidade ao arco, com tensões comparativamente baixas, pequena quantidade de respingos e bom aspecto superficial do cordão. A proteção gasosa do arco contém H_2 , CO , CO_2 e N_2 . A resistência mecânica e a ductilidade obtida são boas e a adição de pó de ferro ao revestimento possibilita a obtenção de altas taxas de deposição e ambas correntes, contínua ou alternada, podem ser usadas.
- Eletrodos Ácidos: O revestimento destes eletrodos é baseado em óxidos de ferro e manganês e em silicatos. A escória é abundante e possui caráter ácido, resulta em intensas reações e de fácil remoção.
- Eletrodos Básicos: O revestimento é baseado no carbonato de cálcio e fornece depósitos com mais baixos teores de hidrogênio e inclusões que qualquer outro tipo. A proteção gasosa do cordão é devida a formação de CO e CO_2 isento de hidrogênio.

- Eletrodos celulósicos: Possuem elevada quantidade de material orgânico responsáveis por uma grande quantidade de gases que protegem a poça de fusão. A quantidade de escória é pequena e o arco gerado é instável causando grande quantidade de respingos, porém, causam alta penetração. Segundo Marques, Modenesi e Bracarense (2009) o aspecto do cordão não é bom, apresentando aspecto irregulares.

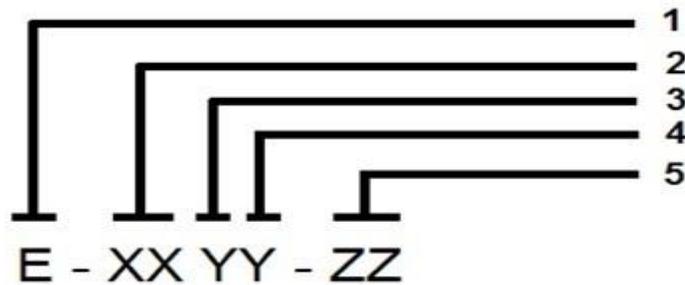


Figura 2: - Esquema de Classificação AWS A 5.1 Para eletrodos de Aço carbono e Baixa Liga.

1. A letra “E” designa Eletrodo.
2. Indicam o limite de resistência á tração do metal de adição.
3. Indica as posições em que o eletrodo pode ser empregado.
4. Este dígito pode variar de 0 a 8 e fornece informações sobre: Correntes, polaridades, arco, penetração, revestimento.
5. Este sufixo se compõe de letras e algarismos que indicam a composição do metal de solda.

Neste trabalho foram utilizados os eletrodos revestidos ASME E7018, que são do tipo básico. Trata-se de um dos eletrodos mais usados na soldagem SMAW, apresentando baixos teores de hidrogênio. Usado geralmente em aços carbonos comuns depositando um metal de alta qualidade sendo possível a soldagem em todos os tipos de juntas.

2.2 O PROCESSO DE SOLDAGEM FCAW

O processo de soldagem FCAW, ou soldagem a arco elétrico utilizando arames tubulares, nasceu da tentativa de reunir a praticidade do processo de soldagem por eletrodos revestidos com a produtividade e qualidade do processo GMAW (Gás Metal Arc Welding). Surgiu, por volta de 1954, combinando a proteção gasosa a base de CO₂ com o uso de arames contendo um fluxo interno, proporcionando um avanço ainda maior na qualidade do cordão de solda gerado. Tal processo foi denominado FCAW (“Flux Cored Arc Welding”). Como forma de evolução do processo algumas variações surgiram, por exemplo, a soldagem que utiliza arames tubulares que não necessitam de gases de proteção (auto-protegidos) ou aqueles que usam fluxo externo aglomerado para a proteção do cordão conhecido com soldagem a arco submerso (SAW “Submerged Arc Welding”). (MOREIRA, 2008).

Os benefícios da soldagem por eletrodos tubulares incluem elevadas taxas de deposição em função da densidade de corrente elevada, facilidade de variar os elementos de liga, além da grande qualidade superficial, isento de escórias de difícil remoção. Em contrapartida, os inconvenientes dos arames tubulares incluem quantidades relativamente grandes de fumos (menores do que a soldagem por eletrodos revestidos, porém maiores do que a SMAW), um custo mais elevado dos arames o que não necessariamente significa um custo total superior e radiação térmica elevada tornando-se problemático em correntes elevadas. A soldagem com arame tubular possui inúmeras semelhanças em relação ao processo GMAW no que diz respeito aos equipamentos e princípios de funcionamento tanto que o equipamento utilizado neste trabalho é o mesmo utilizado para na soldagem MIG/MAG convencional.

2.2.1 Consumíveis

Os consumíveis utilizados na soldagem FCAW são os arames tubulares contendo um fluxo interno, gases de proteção e produtos anti-respingos.

Os arames tubulares são classificados pela AWS no qual diversos fatores são considerados, como o enchimento de pó metálico “metal cored” ou fluxo interno, uso do gás de proteção, tipo de corrente, posição de soldagem recomendada, composição química e propriedades do cordão obtido. De acordo com a AWS os arames tubulares podem ser classificados da seguinte maneira:

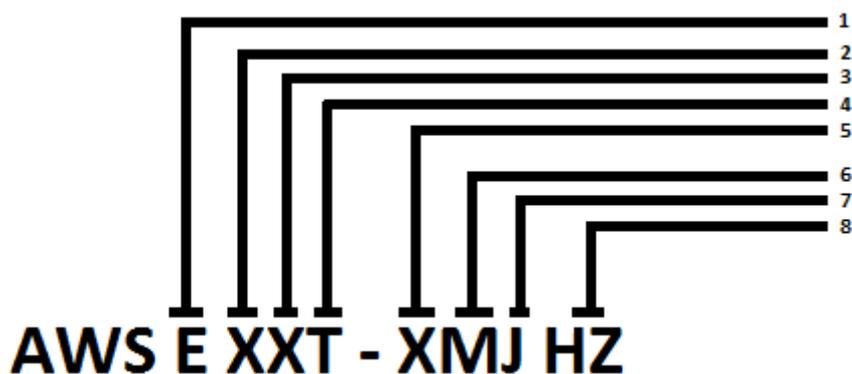


Figura 1: Esquema de Classificação AWS Para Arames Tubulares.

1. Eletrodo para Soldagem a Arco.
2. Limite de resistência mínimo do metal depositado em ksi.
3. Indica a posição de soldagem. 1- todas as posições e 0- plana ou horizontal.
4. Indica arame tubular com fluxo interno
5. Usabilidade e desempenho (Polaridade e Aplicação, passes)
6. Indica mistura de proteção gasosa entre 80 e 75% de Ar. Opcional
7. Indica os requisitos de tenacidade
8. Indica o teor de hidrogênio difusível no metal.

Os Arames tubulares possuem em seu interior fluxos que auxiliam na proteção e estabilidade do arco, além de poder conter elementos de liga para melhorar o cordão de solda formado. O fluxo contido no interior dos arames tubulares pode ser do tipo rutílico, básico ou metálico “metal cored”, no qual o uso depende do cordão de solda desejado. Devido a sua versatilidade, é utilizado na soldagem de praticamente todos os tipos de aços, variando dos aços carbonos comum, aos de alta resistência, além de poderem ser depositadas sobre superfícies sujeita a abrasão, atuando como revestimento protetor.

As variáveis do processo são responsáveis diretamente pelas características finais do cordão de solda, isto é, pelos aspectos superficiais, geometria do cordão e propriedades mecânicas. Sendo também responsáveis pela ocorrência, ou não, de defeitos como trincas, poros, mordeduras e outros. As principais variáveis elétricas e operacionais da soldagem FCAW são os mesmos da soldagem GMAW convencional, isto é, corrente de soldagem, tensão do arco, velocidade de soldagem, velocidade de alimentação, diâmetro do eletrodo,

posição de soldagem, proteção gasosa e a velocidade de alimentação do arame (NANCY, 2011).

A corrente de soldagem é responsável diretamente pela taxa de deposição do metal de solda, modo de transferência metálica e pela geometria do cordão. Uma corrente de soldagem muito alta pode fornecer um grande aporte de calor para o metal de base aumentando a taxa de deposição do metal de adição, porém há a possibilidade de que o aporte térmico seja responsável por descontinuidades e instabilidade do arco durante a deposição podendo até mesmo furar o metal de base e gerar grande quantidade de respingos durante a deposição do metal de solda (WAINER; BRANDI; MELLO, 2008). Por outro lado, uma corrente muito baixa também pode causar pouca estabilidade do arco elétrico sendo responsável pela falta de penetração e extinção do arco. Outro fator importante, que é influência direta da intensidade da corrente de soldagem, é a velocidade de alimentação do arame eletrodo que, segundo Giraldo et al (2009), quando há uma alteração na velocidade de alimentação do arame a corrente de soldagem varia no mesmo sentido.

O modo de transferência metálica relaciona-se intimamente com a corrente gerada, por exemplo, corrente contínua com polaridade reversa aliada a utilização de misturas ricas de argônio como gás de proteção podem ter diferentes formas de transferência metálica (globular, curto circuito, voo livre ou até mesmo pulsada). Já a utilização de CO₂ ou misturas ricas em CO₂ há a predominância das transferências globular e por curto circuito.

A tensão de soldagem afeta tanto o modo de transferência metálica quanto a geometria do cordão, pois exerce influência diretamente na energia de soldagem fornecida ao cordão, ou seja, quando a tensão do arco diminui, a penetração e a largura diminui e quando a tensão aumenta a penetração também aumenta. Conforme o valor da tensão aumenta há o surgimento de defeitos como porosidade, excesso de respingos e mordedura, por outro lado um valor baixo pode favorecer o aparecimento de porosidade e sobreposição (WAINER; BRANDI; MELLO, 2008).

A Distância Bico de Contato Peça (DBCP) influi na eficiência do gás de proteção e na estabilidade do arco. Para uma taxa de alimentação fixa do arame, qualquer aumento desta distância reduz a energia de soldagem fornecida ao cordão.

A velocidade de soldagem (V_s), é a velocidade de propagação da tocha de soldagem em relação à peça a ser soldada. A medida que se aumenta a velocidade, menor será a taxa de deposição do arame transferida por unidade de tempo devido a uma redução na quantidade de calor transferida ao cordão de solda por área, porém quando a velocidade é reduzida tem-se a tendência a um aumento na quantidade de material depositado por unidade de comprimento do

cordão. Já um aumento na velocidade de alimentação do eletrodo diminui a distância entre a ponta do eletrodo e a peça a ser soldada, diminuindo assim a distância do arco e aumentando o comprimento energizado do eletrodo, aumentando então a energia necessária para fusão do consumível, que pela eletrônica de potência proporciona a volta da distância do arco original.

2.2.2 Influência da composição dos gases de proteção

Os gases de proteção constituem a parte dos consumíveis responsáveis pela formação da atmosfera protetora do metal de solda fundido contra a atmosfera circundante, assim como os revestimentos dos eletrodos ou o fluxo da soldagem por arco submerso. Esses gases podem ser gases inertes ou ativos, mas são largamente usadas misturas a fim de aliar a propriedades dos dois tipos de gases. Na soldagem com arames tubulares auto-protégidos não é necessário à utilização de gás de proteção uma vez que os próprios arames geram sua atmosfera protetora devido à queima do fluxo interno. Os gases de proteção além de protegerem a poça de fusão contra a oxidação são responsáveis pela geometria do cordão de solda, como destacado por Starling, Modenesi e Borba (2011) no qual um aumento de CO_2 na composição da atmosfera protetora na soldagem de aços de baixo carbono com arames tubulares do tipo rutilico é capaz de gerar maiores variações na corrente e tensão do arco aumentando a largura do cordão devido à alta condutividade térmica que o dióxido de carbono possui.

2.2.2.1 Influência do Argônio na soldagem de arame tubulares

O Argônio, assim como o Hélio, atua na proteção da região soldada, auxiliando na abertura e manutenção do arco sendo preferido por razões metalúrgicas, fornecendo um bom aspecto visual, penetração razoavelmente boa e baixa formação de respingos. Argônio puro é considerado como o gás de proteção que possibilita as melhores aberturas e estabilidade do arco na soldagem GMAW (Barbedo, 2011).

Estudos realizados por Starling, Modenesi e Borba (2011) na soldagem de aços carbonos com eletrodos rutilicos mostrou que um aumento no teor de Argônio (e diminuição do gás ativo CO_2) gerou menores variações nos oscilogramas I x U além de ter fornecido uma superfície mais limpa, quase isenta de respingos, sendo que a soldagem com 25% de Argônio puro apresentou maior estabilidade operacional.

Segundo Moreira Filho (2008) as características básicas que o argônio deve ter para ser utilizado como gás de proteção são:

- Pureza exigida para soldagem 99,99%;
- Penetração reduzida;
- Favorece a limpeza;
- Menor custo;
- Maior disponibilidade;
- Baixo potencial de ionização (em torno de 15,7 V);
- Baixa condutividade térmica;
- Ideal para soldagem de chapas finas;
- Facilita a abertura do arco;
- Arco estável;
- Baixa quantidade de respingos

2.2.2.2 Influência do Dióxido de Carbono na soldagem de arame tubulares

O CO_2 é utilizado como gás de proteção em razão do seu menor custo, porém, seu uso tem sido limitado devido a problemas com instabilidade operacional, perdas de elementos de liga por oxidação e baixa performance na soldagem fora de posição, fato esse que é comprovado por Starling, Modenesi e Borba (2011) no qual para uma mesma polaridade do eletrodo e velocidade de alimentação do arame, um aumento do teor de CO_2 no gás de proteção de eletrodos rútflicos resultou em uma redução na eficiência de deposição, além disso, um aumento do teor de CO_2 gerou uma pequena variação no valor médio da corrente e aumento na tensão média de soldagem reduzindo a estabilidade operacional.

O processo de difusão do carbono e de sua oxidação é desenvolvido a partir da reação química desencadeada com os elementos presentes no metal de solda que são capazes de

reagir com o oxigênio e com o carbono promovendo a entrada ou saída do carbono no metal de solda. (Moreira Filho, 2008).

O Argônio puro também é indesejável na soldagem de aços, pois existe grande dificuldade em se conferir características geométricas ideais gerando muitas vezes falta de penetração. Por isso, uma mistura à base de Argônio contendo certa quantidade de CO₂ é necessária para obter um arco estável e de maior energia garantindo não só qualidade do cordão, mas uma boa penetração devido à alta condutividade térmica do CO₂. Mukhopadhyay (2006) diz que a quantidade de CO₂ não deve ser muito alta, pois pode levar a uma grande formação de escória superficial e tornar impossível a obtenção de um arco “spray”, quando necessário.

2.2.3 Soldabilidade dos Aços Carbono

Segundo a AWS soldabilidade é definida como a capacidade que um material oferece ao ser unido através de um processo de soldagem obtendo uma estrutura final que satisfaça as propriedades desejadas em projeto (Propriedades mecânicas x aspecto superficial x descontinuidades) (Welding Handbook, 2012).

Os aços são definidos como uma liga de Ferro-Carbono, no qual a porcentagem de carbono varia de 0,008% a 2,2% com o mínimo de impurezas possíveis (teores de manganês e silício são, em geral, inferiores a 1,0 e 0,4%, respectivamente) podendo ser adicionado ou não elementos de liga a fim de melhorar suas propriedades. As propriedades dos aços carbono são profundamente afetadas pelas variações de sua composição química e pela variação da sua microestrutura decorrente dos processos de tratamentos térmicos no qual podem ser submetidos. Podemos dizer que a resistência mecânica dos aços carbono aumenta, e a sua ductilidade e soldabilidade diminuem à medida que o teor de carbono aumenta. Devido ao grande aporte de calor fornecido no momento da soldagem alterações na microestrutura na região da junta soldada podem ocorrer, devido à transformação produzida durante o resfriamento da poça de fusão, como o surgimento de constituintes que aumentam a resistência mecânica da junta, porém, é possível que as novas microestruturas formadas não sejam favoráveis à melhoria da resistência mecânica fragilizando a junta soldada. Os aços carbono comuns apresentam em sua composição, além do carbono, somente elementos resultantes de seu processo de fabricação com baixos teores de manganês, silício, enxofre e fósforo.

2.2.3.1 Microestrutura da Zona Fundida dos Aços de Baixo teor de Carbono

A poça de fusão dos aços com baixo teor de carbono, normalmente, solidifica-se sob a forma de ferrita, (podendo sofrer em alguns casos uma reação que favorece a formação de austenita). Ao passo que a temperatura da zona fundida diminui, a ferrita remanescente transforma-se em austenita. Em temperaturas inferiores a 900 °C, a austenita se decompõe, resultando em diferentes microconstituintes. Em uma solda em um só passe, a microestrutura da zona fundida será produto da decomposição da austenita em ferrita durante o resfriamento, sendo que a ferrita assume diferentes formas. Devido ao processo dinâmico da formação do cordão de solda, em soldas multipasse, a formação das microestruturas resultantes do ciclo de resfriamento será um pouco mais complexa, uma vez que há regiões reaquecidas e alteradas pelos ciclos térmicos dos passes seguintes e por regiões que permaneceram basicamente inalteradas. Tais variações no ciclo térmico da região do cordão de solda são fundamentais na determinação das propriedades finais da zona fundida (MODENESI, 2012).

A identificação das fases mais comuns do cordão de solda presentes nos aços de baixo teor de carbono sem adição de elementos de liga seguindo a terminologia do IIW (*International Institute of Welding*) conforme feito por Starling, Modenesi e Borba (2008), e que serão utilizadas nesse trabalho são listadas abaixo:

- Ferrita Primária (PF): Ferrita que é nucleada nos contornos da austenita, conhecida também como ferrita alotriomorfa. É caracterizada pelo seu aspecto claro e liso, pode ocorrer sobre dois aspectos diferentes: Ferrita de Contorno de Grão PF(G) e Ferrita Poligonal Intragranular PF(I).

- Ferrita Primária de Contorno de Grão PF(G): É constituída por veios de ferrita associados a contornos de grãos austeníticos. Apresenta-se em forma de veios claros e lisos, delineando o contorno de grão colunar da austenita conferindo-lhe uma forma alongada. De uma forma geral, uma quantidade elevada de PF(G) é indesejada em soldas que devem apresentar elevada resistência à fratura frágil, uma vez que entre os seus grãos podem ser observados constituintes ricos em carbono e em impurezas.

- Ferrita Poligonal Intragranular PF(I): Apresenta grãos poligonais, nucleando-se no interior dos grãos austeníticos onde as taxas de resfriamento são mais lentas. É mais comum em soldas com baixa velocidade de resfriamento e com baixo teor de elementos de liga.

- Ferrita com Segunda Fase Alinhada FS(A): Aparece na forma de grãos grosseiros e paralelos, crescendo sempre ao longo de um plano bem definido, formando duas ou mais ripas de ferrita paralelas. Essa morfologia juntamente com a presença de filmes de constituintes

ricos em carbono e frágeis em seus contornos fazem com que a FS(A) seja pouco desejada na zona fundida de soldas que devam apresentar um certo grau de tenacidade.

- Ferrita com Segunda Fase não Alinhada FS(NA): É encontrada próxima a ripas de ferrita, isto é, circundante às microfases ou às ripas de ferrita acicular.

- Ferrita Acicular (AF): Encontra-se normalmente na forma de grãos finos de ferrita não paralela, separadas por contornos de alto ângulo, nucleando-se sempre no interior do grão da austenita sob altas taxas de resfriamento, sendo mais elevadas do que a temperatura necessária para a nucleação da ferrita primária. É um constituinte intragranular de grão fino, com uma morfologia emaranhada em grãos com diferentes orientações cristalinas sem forma bem definida no qual sua formação é favorecida pela presença de precipitados e inclusões resultantes da presença de oxigênio. Devido a essa morfologia e seu pequeno tamanho de grão é o constituinte mais desejável para se garantir uma elevada tenacidade da região da junta soldada (Modenesi, 2012).

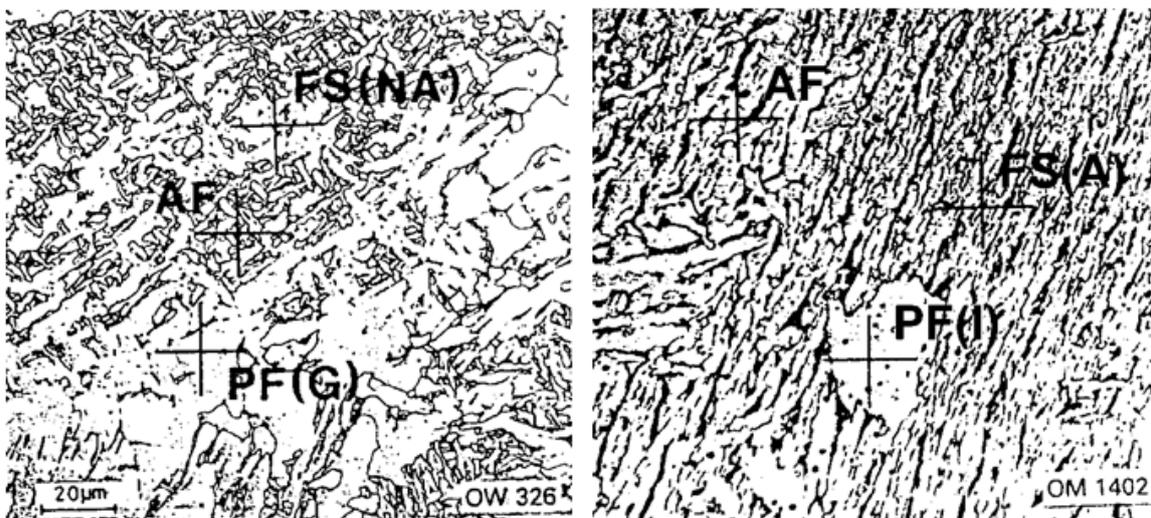


Figura 2: Microestrutura do cordão de solda mostrando diferentes microconstituintes segundo IIW. Fonte: Soldabilidade dos Aços Transformáveis, Modenesi, 2012.

2.2.3.2 Influência da composição química e da velocidade de resfriamento na formação da poça de fusão

De acordo com Modenesi (2012) a composição química e a presença de precipitados juntamente com a velocidade de resfriamento são os maiores responsáveis pela formação dos diferentes constituintes encontrados na zona fundida. Em seu texto, ele afirma que a presença

de certos elementos de liga diminui a velocidade de decomposição da austenita, ou seja, diferentes elementos podem afetar de formas diferentes a reação de decomposição da austenita. O Carbono é o elemento mais representativo na formação da microestrutura da solda dos aços, em geral o teor de carbono deve ficar entre 0,05 e 0,15% para que se tenha um maior controle da quantidade de carbonetos formados favorecendo a formação de ferrita acicular em lugar da ferrita primária de contorno de grão. Já teores elevados de Manganês promove um refinamento da microestrutura. Um aumento de seu teor (até cerca de 1,5%) promove formação de ferrita acicular em lugar de ferrita primária de contorno de grão. O Silício é o principal desoxidante do metal de solda sendo mais efetivo que o Manganês, porém quando se trata em formação de ferrita acicular não é muito efetivo, favorecendo mais estruturas de placas laterais. (Modenesi, 2010)

2.2.3.3 – Microestrutura da Zona Fundida em Soldas de Vários Passes

Na soldagem com vários passes, cada passe é responsável por impor ao cordão de solda um novo ciclo térmico afetando os passes que foram depositados anteriormente. A microestrutura das regiões adjacentes ao novo passe que está sendo depositado é alterada como ocorre na zona termicamente afetada do metal, em outras palavras, as regiões mais próximas serão reaquecidas a temperaturas próximas da de fusão, sendo reaustenitizadas gerando um crescimento de grão, assim durante o resfriamento da austenita são encontrados microconstituintes similares aos existentes nas regiões não alteradas da zona fundida. As regiões mais afastadas do cordão que está sendo depositado não atingem temperaturas o suficiente para serem austenitizadas. A microestrutura da ZTA (zona termicamente afetada) é produto das transformações estruturais do metal de base associadas ao aporte térmico no qual o cordão é submetido. Na soldagem multipasses, a estrutura da ZTA torna-se mais complexa devido à influência, sobre um dado passe, dos ciclos térmicos devidos aos passes posteriores. As partes das diferentes regiões da ZTA de um passe são alteradas por passes novos passes, e assim sucessivamente (Modenesi, 2012).

- Região de granulação grosseira: Região de crescimento de grão resultante da decomposição da austenita quando aquecida acima de sua temperatura de crescimento de grão tendo uma microestrutura caracterizada pelo seu elevado tamanho de grão. Um maior tamanho de grão austenítico leva a formação de uma estrutura final mais dura e grosseira na região da ZTA.

- **Região de granulação fina:** Como possui uma estrutura de granulação fina, similar à dos aços normalizados é conhecida como região de normalização, localiza-se mais afastada da linha de fusão do que a zona de granulação grosseira. Para aços temperados e revenidos pode ser uma região problemática se ela apresentar uma menor resistência mecânica do que a do metal-base.

- **Região intercrítica:** Região caracterizada por uma pequena esferoidização da perlita. Apresentando uma queda de dureza em relação ao metal de base uma vez que em aços temperados e revenidos podem ocorrer alterações microestruturais mais intensas, ocorrendo um super-revenido das regiões da ZTA. Nestas condições, a região intercrítica é mais extensa e apresenta uma queda de dureza em relação ao metal de base.

- **Região subcrítica:** Nesta região, a ZTA é aquecida até a temperatura eutetóide sofrendo uma transformação parcial em austenita e em seguida se decompõe durante o resfriamento.

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 MATERIAIS

As Tabelas 1 e 2 apresentam as informações fornecidas pelo fabricante a respeito dos eletrodos utilizados. Neste trabalho, utilizou-se o processo FCAW com arame tubular básico de fabricação nacional destinado a soldagem de aços de baixo teor de carbono (ASME SFA 5.20 E71T- 5C (M)) possuindo diâmetro nominal de 1,2 mm para caracterização do cordão de solda utilizando como gás de proteção a mistura 20% CO₂ - 75% Ar. Para o processo SMAW, foram utilizados eletrodos revestidos de fabricação nacional, igualmente destinados a soldagem de aços de baixo carbono do tipo ASME E7018 com diâmetro nominal de 3,25 mm e 5 mm.

Tabela 6 - Dados do Arame Tubular Fornecido pelo fabricante

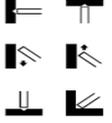
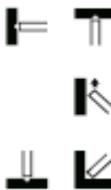
Arame Tubular	Diâmetro (mm)	Metal Depositado (20% Ar + CO ₂)	Propriedades Mecânicas (20% Ar + CO ₂)	Posição de Soldagem	Corrente/Tensão	Rendimento	Deposição (Kg/h)
ASME SFA - 5.20	1,2	C 0,05 Si 0,53 Mn 1,68	L.R. 630 Mpa L.E. 560 Mpa ChV(-40C) 50J		150A, 29V	90	2.00
					210A, 30V	90	2.95
					250A, 32V	91	3.95
					390A, 34V	91	4.95
					330A, 35V	92	5.85

Tabela 7 - Dados do Eletrodo Revestido Fornecido Pelo Fabricante

Eletrodo Revestido	Metal Depositado	Propriedades Mecânicas	Posição de Soldagem	Tensão/Tipo Corrente	Diâmetro (mm)	Comprimento (mm)	Faixa de Corrente (A)
ASME SFA - 5.1 E7018	C 0,07 Si 0,50 Mn 1,30	L.R.530- Mpa A 27-32% ChV(-43C)90-120J		20 - 30V CA ≥ 70V CC+	2	300	50-90
					2.5	350	65-105
					3.25	350	110-150
					4	450	140-195
					5	450	185-270
6	450	225-355					

A Tabela 3 apresenta a composição química nominal do metal de base. Os experimentos de soldagem foram realizados sobre chapas de aço de baixo teor de carbono BOP (bead on plate), ABNT 1010 (25cm x 5cm x 6mm). Para realização dos cordões de solda com *Eletrodo Revestido* a soldagem foi realizada na posição plana, utilizando-se uma fonte de soldagem operando no modo corrente constante com eletrodo em polaridade positiva, mantendo-se o modo de transferência metálica por curto-circuito. Para a solda com *Arames Tubulares* foi utilizado a mesma fonte de soldagem, com o metal de base nas mesmas condições da soldagem SMAW, porém operando no modo de tensão constante também em polaridade inversa (CC+).

Tabela 8 - Composição Química Nominal do Metal de Base

ABNT 1010	C	S	Mn
% massa	0,10	0,05	0,31

3.2 DESCRIÇÃO DOS EQUIPAMENTOS

3.2.1 Central de Soldagem Multiprocessos

- Fonte eletrônica transistorizada

Tabela 9 - Dados Técnicos Fonte Eletrônica Transistorizada DigiPlus A7

Características	Capacidade de Corrente			
	200	450	600	800
Tensão de alimentação trifásica	220/380/440 V	220/380/440 V	220/380/440 V	220/380/440V
Tensão em vazio (configurável de fábrica)	50/68/85 V	50/68/85 V	50/68/85 V	V50/68/85 V
Corrente a 100% de Fator de Carga	200 A	280 A	350A	500 A
Potência nominal	5 kVA	10 kVA	12 kVA	16 kVA
Faixa de corrente	5- 400 A	5- 450 A	5- 600 A	10 - 800 A
Corrente nominal por fase (220/380/440)	13/8/7A	26/15/13 A	32/18/16 A	42/25/21 A
Fator de Potência	0.94	0.94	0.94	0.94



Figura 5: Fonte de Soldagem IMC Digiplus A7 (a) e Central Refrigeradora (b). Fabricante IMC/LABSOLDA-UFSC.

- Sistema de alimentação de arame eletrodo
- Sistema de posicionamento e deslocamento automático da tocha de soldagem



Figura 6: Tartilope V2. Fabricante: ICM/LABSOLDA-UFSC.

- Tocha de soldagem
- Alicates para fixação dos eletrodos
- Sistema de aquisição portátil (SAP)



Figura 7 - Sistema de Aquisição de dados SAP V4 Fabricante: IMC/LABSOLDA - UFSC

3.2.2 Equipamentos para Ensaio Metalográficos

- Lixadeira/Politriz Struers
- Microscópio Olympus GX5
- Sistema de aquisição óptico computadorizado
- Máquina de ensaio de Dureza Vickers (huV2 G) Shimadzu

3.3 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Este trabalho tem como objetivo comparar o cordão de solda gerado pelo processo de soldagem por arame tubular, utilizando o arame ASME 5.20 básico, com o cordão de solda gerado utilizando eletrodos revestidos do tipo E7018 na soldagem de aços de baixo carbono, mantendo-se como parâmetro de comparação a mesma energia de soldagem. Os efeitos dos processos de soldagem e das energias de soldagem sobre a geometria do cordão de solda, sobre os aspectos macro e micrográficos e sobre dureza da junta soldada foram avaliados. Para realização dos experimentos, será utilizado um *Planejamento Fatorial* do tipo 2^2 com repetição e intercalação dos dados de entrada.

Os fatores de entrada do planejamento são os processos de Soldagem por Eletrodo Revestido (ER), Arame Tubular (AT) e Energia de Soldagem. Seguindo o planejamento

fatorial 2², foram utilizados dois patamares de correntes diferentes de modo a obter dois níveis diferentes de energia de soldagem (Baixo “-” e Alto “+”), totalizando 4 condições distintas com repetição. A Tabela 5 apresenta o planejamento fatorial que foi utilizado para realização dos ensaios.

$$Es = \frac{I \cdot V}{v_s} \quad (1)$$

Es= Energia de Soldagem (kJ/mm);

I=Corrente (A);

V= Tensão (Volts);

Vs= Velocidade de Soldagem (mm/min).

Tabela 10 – Planejamento Fatorial 2² com repetição.

Processo de Soldagem	Energia de Soldagem (ES)
AT - 01	-
ER - 01	-
AT - 02	-
ER - 02	-
AT + 01	+
ER + 01	+
AT + 02	+
ER + 02	+

AT – Arame Tubular, ER – Eletrodo Revestido. “-” Indica nível baixo de ES, “+” Indica nível alto de ES. Os números 01 e 02 indicam o primeiro ensaio e sua repetição respectivamente.

Todas as soldagens foram automatizadas na posição plana e realizadas com o auxílio de um sistema de posicionamento e deslocamento automático (tartilope) da tocha de soldagem e do eletrodo revestido. Para o método de soldagem utilizando Eletrodo Revestido optou-se pelo modo de transferência metálica por curto circuito a fim de automatizar o processo. Com o uso do tartilope foi possível movimentar a ponta do eletrodo em duas direções (X e Y) e,

pela ação da gravidade (técnica de arrastar o eletrodo sobre o metal de base), mantendo-se um ângulo de inclinação de 45° do eletrodo em relação ao metal de base, o eletrodo mantém-se junto à peça de modo a favorecer a transferência por curto circuito, fato que foi comprovado através dos oscilogramas de “Tensão x Tempo”. Procurou-se trabalhar o mais próximo possível dos valores de máximo e mínimo de correntes dos arames tubulares básicos (150A a 330A), logo foram utilizados diferentes diâmetros de eletrodos revestidos recomendados pelo fabricante em função da energia de soldagem selecionada para o planejamento fatorial. Como a faixa de corrente de soldagem do E7018 é mais restritiva para um determinado diâmetro, optou-se por usar eletrodos revestidos de 3,25mm e de 5,00 mm de diâmetro para os níveis “baixo” e “alto” respectivamente.

Em função de se trabalhar com duas faixas de correntes a fim de se estudar os efeitos da mudança de energia fornecida à peça, na soldagem FCAW, foram mantidos constantes o ângulo de inclinação da tocha em 90°, a vazão do gás, constante para todos os níveis de energia de soldagem em 11 L/min, a distância bico de contato peça (DBCP) mantida constante no valor de 19 mm. Para que fosse possível uma correta avaliação do cordão de solda, isto é, avaliação do aspecto superficial (respingos, defeitos superficiais, descontinuidades) os cordões formados têm seu comprimento entre 10 e 15 cm.

A energia de soldagem a ser utilizada na condição BOP (simples deposição do eletrodo no metal de base na posição plana) foi obtida a partir de ajustes sucessivos nos valores de velocidade de soldagem, velocidade de alimentação, corrente, tensão e etc. Na busca de cordões com um bom aspecto visual e maior aproximação possível entre os valores energia, antes de se validar qualquer ensaio, pré-testes foram feitos para avaliação da melhor velocidade de soldagem, dos melhores valores de tensão, corrente, velocidade de alimentação para que em cada nível de energia, tenham-se valores semelhantes para ambos os processos, FCAW e SMAW.

Os cordões de solda foram depositados sobre chapas de (250mm x 50mm x 6mm) para a análise de sua geometria, aspecto superficial e retirada amostras transversais para análises de macro e micrografia para avaliação e comparação dos microconstituintes. Durante as soldagens, os valores instantâneos da corrente e da tensão de soldagem foram lidos através do sistema de aquisição de dados SAP, no qual armazena dados de tensão, corrente, velocidade de alimentação, vazão do gás e potência média, além de fornecer os oscilogramas de tensão e de corrente. Os dados foram coletados a cada 0,2ms fornecendo uma quantidade de pontos suficientes para obtenção das médias de I e V para cada ensaio, fornecendo indicação do nível

de energia de soldagem fornecido à peça (produto da tensão pela corrente dividida pela velocidade de soldagem).

3.4 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

3.4.1 Elaboração dos cordões

Foram realizados variados pré-testes a fim de se encontrar o melhor ponto de convergência entre os dois diferentes tipos de soldagem a partir do qual foi possível definir quais seriam as melhores velocidades de alimentação, velocidades de soldagem e DBCP, que são variáveis fundamentais na determinação da energia de soldagem, a qual se procurou manter a mesma para cada tipo de cordão de solda gerado influenciando diretamente no aporte térmico e conseqüentemente na microestrutura e na qualidade superficial do cordão a ser caracterizado.

Feito os testes iniciais com variadas velocidades de soldagem, velocidade de alimentação e DBCP foram estabelecidos os principais parâmetros de soldagem. A avaliação da estabilidade operacional, isto é, a estabilidade do processo de formação do cordão, foi feita através da análise da taxa de deposição, aspecto superficial do cordão e dos oscilogramas de corrente e tensão obtidos pelo sistema de aquisição de dados. Só após a garantia que os cordões de um mesmo fator possuem níveis de energia de soldagem semelhantes é que se validou o cordão de solda como amostra para os próximos ensaios. Após a validação do corpo de prova extraiu-se uma amostra para análises macro e microestrutural e testes de dureza Vickers conforme feito por Starling, Modenesi e Borba (2011). Os dados de corrente de soldagem e tensão do arco foram coletados por um sistema de aquisição de dados para que se pudessem avaliar os níveis de flutuação do processo durante a soldagem.

3.4.2 Preparação das amostras para análise macrográfica e micrográfica

Após definido as variáveis de entrada e de saída conforme o planejamento fatorial foi retirado amostras para análise macro e micrográfica para cada uma das quatro condições pré-definidas com repetição. A preparação foi realizada em amostras retiradas da seção transversal de um cordão de solda. Primeiramente o metal de base foi limpo para que fossem removidos óxidos, óleos e graxas que podem influir na integridade do cordão. Depois de feito o corte, a amostra foi embutida para maior facilidade no manejo nas etapas de lixamento e

polimento. As amostras foram lixadas manualmente em lixas d'água de granulometrias iguais a 100, 220, 320, 400 e 600, em seguida foram lavadas em água corrente para remoção de partículas indesejadas e foi dado início ao processo de polimento utilizando dois tipos de panos para polimento metalográfico, polimento com pasta de diamante de 3 μm para remoção de riscos grosseiros oriundos do lixamento e polimento final para remoção de riscos finos que o polimento anterior não foi capaz de remover utilizando alumina e pasta de diamante de 1 μm .

Após o polimento as amostras foram lavadas em água corrente, banhadas em álcool, secadas com o auxílio de um secador e devidamente identificadas. Finalizado toda a etapa de preparação foram avaliadas as inclusões características de cada processo de soldagem, em seguida as amostras foram atacadas com Nital 3% para análise micrográfica e macrográfica. Foram retiradas fotografias digitais tanto do aspecto macro quanto do aspecto micro do cordão de solda para que se pudessem avaliar as principais características dos cordões obtidos pelos diferentes tipos de soldagem.

3.4.3 Avaliação macro e micrográfica do Cordão de Solda

As macrografias foram avaliadas por meio da análise por inspeção visual de forma qualitativa com a ampliação de aproximadamente 10 X no qual foi observado os contornos da região fundida assim como toda a característica geométrica da região do cordão (penetração, área depositada, reforço e largura). A identificação dos principais constituintes presentes na região fundida do cordão foi feita com aumento de 500X segundo o documento IX- 1533-88 do Instituto Internacional de Soldagem conforme feito por Starling, Modenesi e Borba (2011), no qual são classificados em: Ferrita Primária Intragranular PF (I), Ferrita Primária de Contorno de Grão PF(G), Ferrita com Segunda Fase Alinhada FS (A), Ferrita com Segunda Fase Não Alinhada FS (NA) e Ferrita Acicular FA.

As frações volumétricas dos microconstituintes foram medidas pelo método de contagem manual de pontos, segundo a norma ASTM E 562-89[17]. Utilizou-se uma malha de 15 pontos colocada na tela de um monitor de alta resolução acoplado a um microscópio óptico. As contagens foram realizadas para um aumento fixo de 500 X. A avaliação quantitativa dos valores de fração volumétrica foi feita para um intervalo de confiança de 95%, e para cada amostra foram realizadas 50 aplicações de malha ao longo da zona fundida. Foram contados 192 pontos por amostra e, considerando as repetições, foram contados 76800 pontos no total.

3.4.3 Metodologia experimental para avaliação da microdureza e resistência mecânica

O ensaio de dureza tem como objetivo avaliar a resistência à penetração da região do cordão de solda medida pela deformação plástica da região ensaiada provocada por um penetrador. Neste trabalho, será utilizada a microdureza Vickers.

Os testes de dureza Vickers foram realizados na região fundida utilizando-se uma carga de 980.7mN com 9 medidas para cada amostra com intervalo de confiança de 95%.

Os valores de dureza obtidos foram convertidos para a escala de dureza Brinell conforme a norma ASTM E 140 – 02 “Standard Hardness Conversion Tables for Metals” e foi utilizada a seguinte relação para se estimar o limite de resistência mecânica do material para cada amostra:

$$\sigma_u = \alpha \cdot HB \quad (2)$$

Onde σ_u é o limite de resistência à tração (MPa), e α é a constante experimental, que depende do material. Para aços de baixo carbono o valor de α é 3,45. (Callister, 2002)

3.4.4 Metodologia experimental para análise da taxa de deposição e rendimento de deposição.

A taxa de deposição (TD) tem influência direta sobre o custo total do metal de solda depositado. É a medida da massa de metal de solda depositada por unidade de tempo de arco aberto.

$$TD = 3,6 \frac{M_f - M_i}{ts} \text{ (kg/h)} \quad (3)$$

TD = Taxa de Deposição

M_f = Massa final do Metal de Base depois da Soldagem

M_i = Massa inicial do Metal de Base antes da Soldagem

ts = Tempo de Soldagem

A taxa de fusão (TF) representa a massa total de eletrodo consumida durante a abertura do arco.

$$TF = 3,6 \frac{\rho l}{ts} \text{ (kg/h)} \quad (4)$$

TF = Taxa de Fusão

l = comprimento do arame consumido (m)

ρ = Densidade linear do arame (g/m)

t_s = Tempo de Soldagem

A eficiência de deposição é um dos fatores mais relevantes na representação dos custos da soldagem, ela representa a massa de metal de solda depositado no cordão em relação à massa total de eletrodo que foi consumido durante a abertura do arco, ou seja, é a razão entre a taxa de deposição (TD) e a taxa de fusão (TF). Quanto maior a eficiência de deposição, menor é a quantidade de material perdido durante a soldagem.

$$\varphi = \frac{TD}{TF} \times 100 \quad (4)$$

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As Figuras 8 e 9 mostram os oscilogramas obtidos para as soldas com eletrodo revestido (3,25 e 5,0 mm de diâmetro) e arame tubular com proteção gasosa 80%Ar-20%CO₂ para os níveis baixo e alto de ES respectivamente. As figuras 10 e 11 mostram os mesmos oscilogramas para as respectivas repetições. Nas legendas são indicados a média e o desvio padrão dos valores coletados de corrente e de tensão do arco e da relação entre o desvio padrão e a média. Além disso, para o arame tubular foram coletados o desvio padrão e a média da velocidade de alimentação. As Figuras 12 e 13 mostram o aspecto superficial dos cordões para os dois fatores escolhidos e as figuras 14 e 15 mostram as macrografias. Foram retiradas imagens referentes às micrografias obtidas a partir das seções transversais para as soldas com Arame Tubular e Eletrodo Revestido.

A Tabela 6 indica os valores da energia de soldagem (calculada a partir do produto dos valores da corrente de soldagem e da tensão do arco para cada sinal coletado, dividido pela velocidade de soldagem ajustada).

A Tabela 7 apresenta os valores de avaliação da geometria do cordão de solda, isto é, diluição, reforço, penetração máxima, área depositada e área de penetração da solda, taxa de deposição e eficiência de deposição. As Tabelas 8 e 9 indicam, respectivamente, a fração volumétrica dos microconstituintes presentes na zona fundida e a dureza vickers da região do cordão, considerando-se o intervalo de confiança de 95 %.

4.1 AVALIAÇÃO DOS OSCILOGRAMAS DE CORRENTE E TENSÃO

De acordo com as Figuras 8a, 9a e para as respectivas repetições, observa-se, como esperado, para eletrodos revestidos oscilogramas característicos da fonte de soldagem operando no modo corrente constante. Além disso, é possível notar pelos oscilogramas de tensão que o modo de transferência metálica por curto-circuito (contato direto e regular entre o eletrodo e o metal de base) é predominante durante toda a extensão do cordão, esse fato é comprovado devido à irregularidade dos valores de tensão apresentando picos de correntes existentes quando a tensão de soldagem se aproxima de zero. Ainda para os eletrodos revestidos, é possível notar uma diminuição dos valores de flutuação de corrente quando se aumenta a energia de soldagem, porém, os valores de flutuação de tensão (variável dependente na soldagem SMAW) dos eletrodos revestidos são maiores do que os valores encontrados de flutuação de corrente dos arames tubulares (variável dependente na soldagem

FCAW) indicando uma menor estabilidade operacional entre os cordões para um mesmo patamar de ES. Embora a quantidade de respingos seja menor na soldagem com ER para maiores níveis de energia estes tendem a serem maiores e de mais difícil remoção.

Ao avaliarmos as figuras 10b e 11b e para suas respectivas repetições observa-se, como esperado, para arames tubulares oscilogramas característicos da fonte de soldagem operando no modo tensão constante. Além disso, é possível notar pelos oscilogramas de corrente que o modo de transferência metálica ainda que irregular é predominantemente globular devido à variação de tensão e corrente de soldagem típicas do destacamento de uma gota de metal. Segundo o trabalho “Caracterização do Cordão na Soldagem FCAW com um Arame Tubular Básico” de STARLING, MODENESI e BORBA a avaliação da estabilidade operacional pode ser avaliada pelos oscilogramas de tensão e corrente e pelos valores de flutuação (relação de entre o desvio padrão e a média) destes parâmetros, então, partindo deste princípio podemos dizer que a soldagem com arames tubulares apresenta maior estabilidade operacional do que a soldagem com eletrodos revestidos, além disso, ao se aumentar a densidade de corrente fornecida à peça nota-se uma diminuição nos valores de flutuação e por consequência, a quantidade de respingos é ligeiramente menor do que para níveis mais baixos de ES.

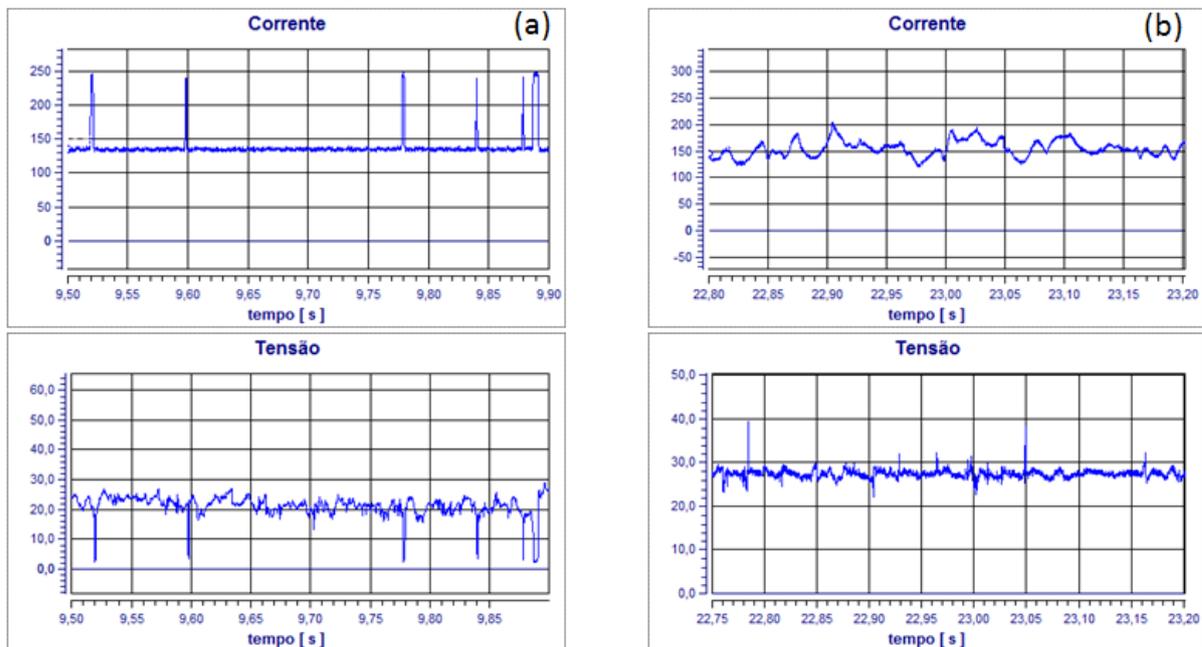


Figura 8: Oscilogramas de corrente de soldagem e tensão do arco obtidos para nível baixo de ES. (a) Eletrodo Revestido $I = 136,93 \pm 13$ A (9%) e $V = 23,73 \pm 4,0$ V (17%). (b) Arame Tubular $I = 172,36 \pm 23$ (13%) A, $V = 27,35 \pm 1,17$ V (4%), $VA = 6,88 \pm 0,13$ m/min (2%).

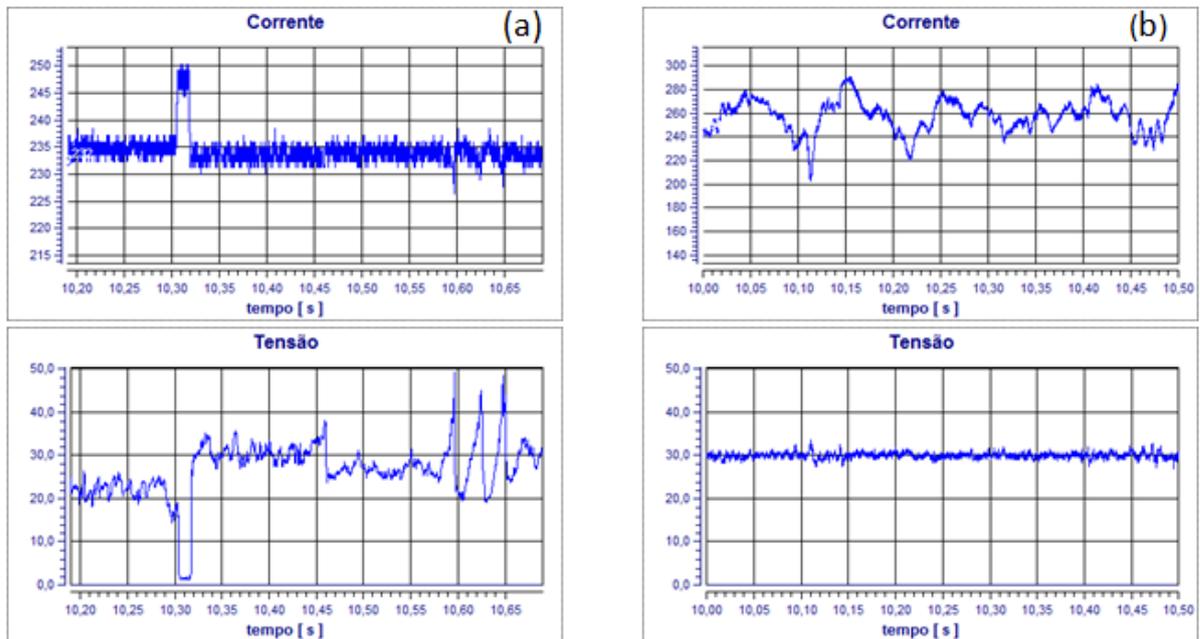


Figura 9: Oscilogramas de corrente de soldagem e tensão do arco obtidos para nível alto de ES. (a) Eletrodo Revestido $I = 234,47 \pm 6,7$ A (3%) e $V = 26,32 \pm 4,6$ A (17%). (b) Arame Tubular $I = 247,86 \pm 15$ (6%) A, $V = 30,00 \pm 0,81$ V (3%), $VA = 10,10 \pm 0,38$ m/min (4%).

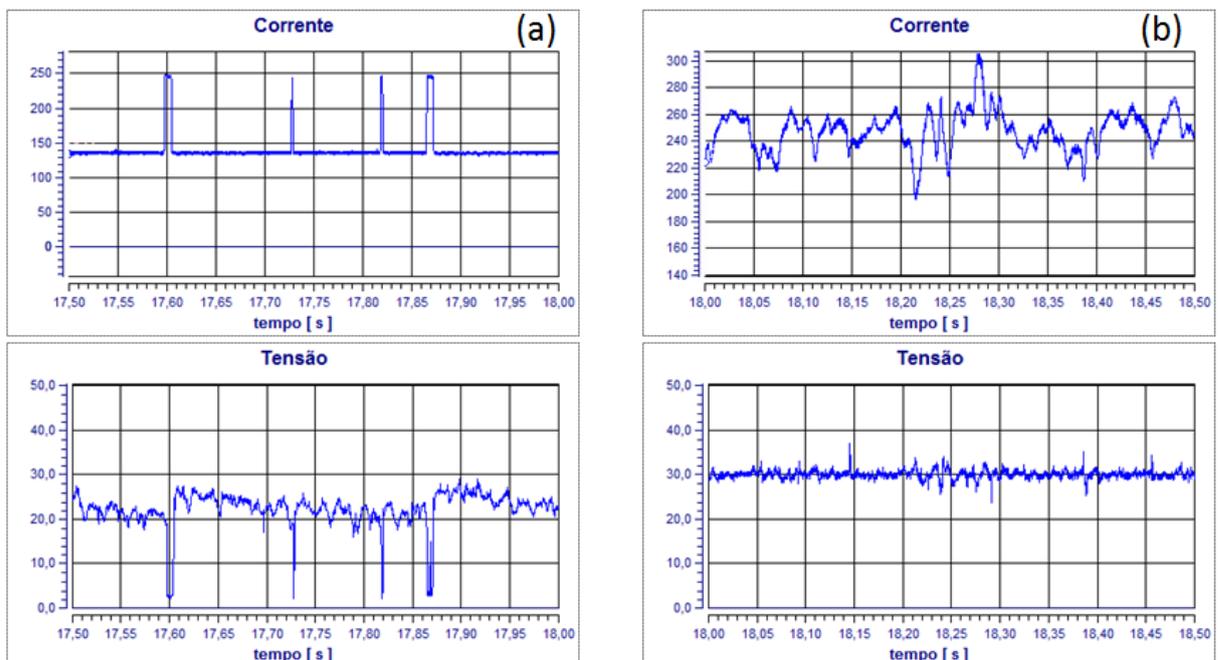


Figura 10: Oscilogramas de corrente de soldagem e tensão do arco obtidos para nível baixo de ES para a Repetição. (a) Eletrodo Revestido $I = 137,0 \pm 14,9$ A (11%) e $V = 23,36 \pm 4,6$ A (14%). (b) Arame Tubular $I = 183,00 \pm 18$ (10%) A, $V = 27,27 \pm 0,91$ V (3%), $VA = 6,83,10 \pm 0,25$ m/min (4%).

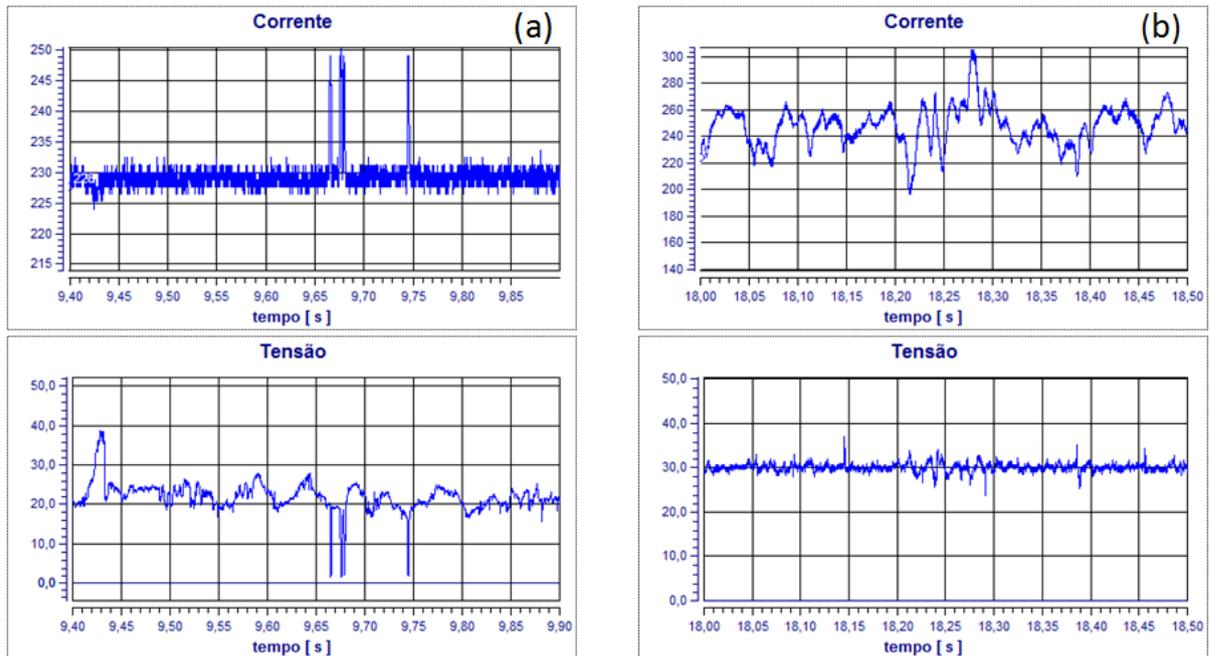


Figura 11 - Oscilogramas de corrente de soldagem e tensão do arco obtidos para Nível Alto de ES para a Repetição. (a) Eletrodo Revestido $I = 228,0 \pm 5,5$ A (2%) e $V = 26,38 \pm 4,3$ V (16%). (b) Arame Tubular $I = 252,83 \pm 12,2$ (5%) A, $V = 30,36 \pm 0,71$ V (2%), $VA = 9,93 \pm 0,36$ m/min (4%).

Tabela 6 - Corrente (A), Tensão (V), Velocidade de Soldagem (VS) e Energia de Soldagem (ES) obtidas em cada teste

Processo de Soldagem	Identificação	Corrente (A)	Tensão (V)	VS (cm/min)	ES (KJ/mm)
SMAW	ER - 01	$136,93 \pm 13$	$23,73 \pm 4,0$	17,8	$1,08 \pm 0,18$
	ER + 01	$234,47 \pm 6,7$	$26,32 \pm 4,6$	22,2	$1,67 \pm 0,28$
	ER - 02	$137,0 \pm 14,9$	$23,36 \pm 4,6$	17,8	$1,07 \pm 0,18$
	ER + 02	$228,0 \pm 5,5$	$26,38 \pm 4,3$	22,2	$1,59 \pm 0,25$
FCAW	AT - 01	$172,36 \pm 23$	$27,35 \pm 1,17$	28	$1,01 \pm 0,14$
	AT+ 01	$247,86 \pm 15$	$30,00 \pm 0,81$	28	$1,65 \pm 0,09$
	AT - 02	$183,00 \pm 18$	$27,27 \pm 0,91$	28	$1,07 \pm 0,11$
	AT+ 02	$252,83 \pm 12,2$	$30,36 \pm 0,71$	28	$1,60 \pm 0,10$

4.2 ANÁLISE SUPERFICIAL E MACROGRÁFICA DOS CORDÕES

Na soldagem em geral, principalmente em aços estruturais, é sempre desejável que as condições de soldagem apresentem boa estabilidade operacional e grande produtividade alinhada com qualidade superficial e resistência mecânica com ausência de defeitos e descontinuidades ao longo do cordão.

As figuras 12 e 13 apresentam o aspecto superficial dos cordões obtidos pelos dois métodos e, conforme o esperado, a qualidade superficial e aparência no arame tubular são muito superiores ao eletrodo revestido, isto é, o cordão tende a ser regular e mantendo-se sua largura e reforço constante ao longo do cordão, além disso, a escória formada é regular e de fácil remoção. Para os eletrodos revestidos, procurou-se manter o eletrodo em contato com a peça durante a formação do cordão forçando o curto circuito, para baixas correntes, os cordões obtidos mantiveram sua largura constante, porém devido a efeitos da flutuação do movimento relativo do eletrodo em relação ao metal de base o reforço foi formado irregularmente em toda a sua extensão. Ao aumentar-se energia de soldagem, embora o arco tenha se apresentado mais estável, o cordão formado apresentou uma variabilidade nos valores de reforço e largura ao longo de todo o seu comprimento.

Conforme indicado na Tabela 7, para baixas energias, a soldagem SMAW operando em curto circuito apresentou um cordão de solda com uma menor largura se comparada com os arames tubulares, em média 5 mm menor. Muito dessa menor largura do cordão para baixa ES se deve ao fato de que o arame tubular apresenta uma maior taxa de deposição se comparada aos eletrodos revestidos (devido ao controle da velocidade de alimentação). Outro fator que pode ter contribuído para essa pequena largura é o diâmetro do eletrodo utilizado que, para baixa ES foi de 3,25mm. Se compararmos o cordão de solda da Figura 12a e 12c referente ao cordão de solda para baixa e alta ES respectivamente, apesar da irregularidade, notou-se um aumento na largura do cordão, em média de 3,25mm maior, que é decorrente da mudança de diâmetro do eletrodo que possibilitou a utilização de uma maior energia de soldagem.

Para os arames tubulares notou-se que se o controle da velocidade de alimentação não for feito corretamente pode vir a furar a peça decorrente da combinação entre velocidade de alimentação e velocidade de soldagem, o mesmo fenômeno foi observado na soldagem com eletrodos revestidos para altas densidades de correntes para a mesma espessura do metal de base que foi de 6 mm.

Conforme discutido no tópico anterior, para os dois métodos de soldagem foi observada uma menor quantidade de respingos nas soldas com alta ES, caracterizando um aumento da estabilidade operacional decorrente da elevação da densidade de corrente fornecida à peça.

Quanto à geometria dos arames tubulares, tanto para alta quanto para baixa ES os cordões apresentam um aspecto visual melhor do que para os eletrodos revestidos, e quando se variou a velocidade de alimentação a fim de aumentar o aporte térmico fornecido à peça, conforme esperado, a geometria do cordão acompanhou essa mudança gerando cordões mais largos, com um reforço constante sem perder a regularidade geométrica do cordão e, uma vez que os cordões apresentaram grande regularidade, para a soldagem FCAW não foram observados defeitos como porosidade ou trincas. Através da inspeção visual dos cordões, notou-se o aparecimento de poros para ambos os níveis de energia na soldagem SMAW, que pode estar associado a uma corrente excessiva ou a uma evolução de CO na poça de fusão durante a deposição oriundos da interação dos gases resultantes do revestimento com a atmosfera circundante a poça (Modenesi, 2001).

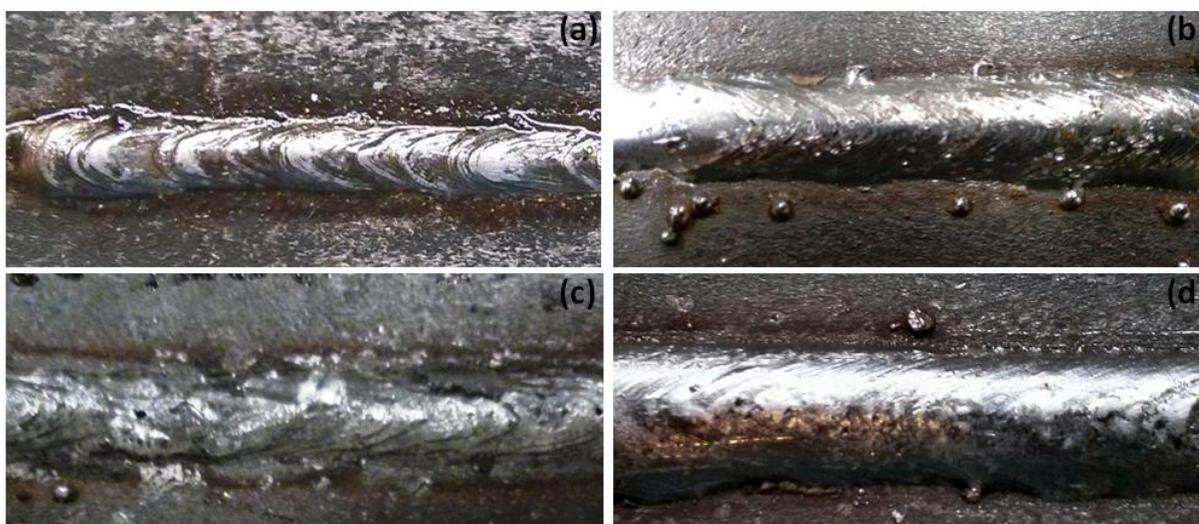


Figura 12 - Aspecto superficial dos cordões obtidos. (a) Eletrodo Revestido ES-. (b) Arame Tubular ES-. (c) Eletrodo Revestido ES+. (d) Arame Tubular ES+.

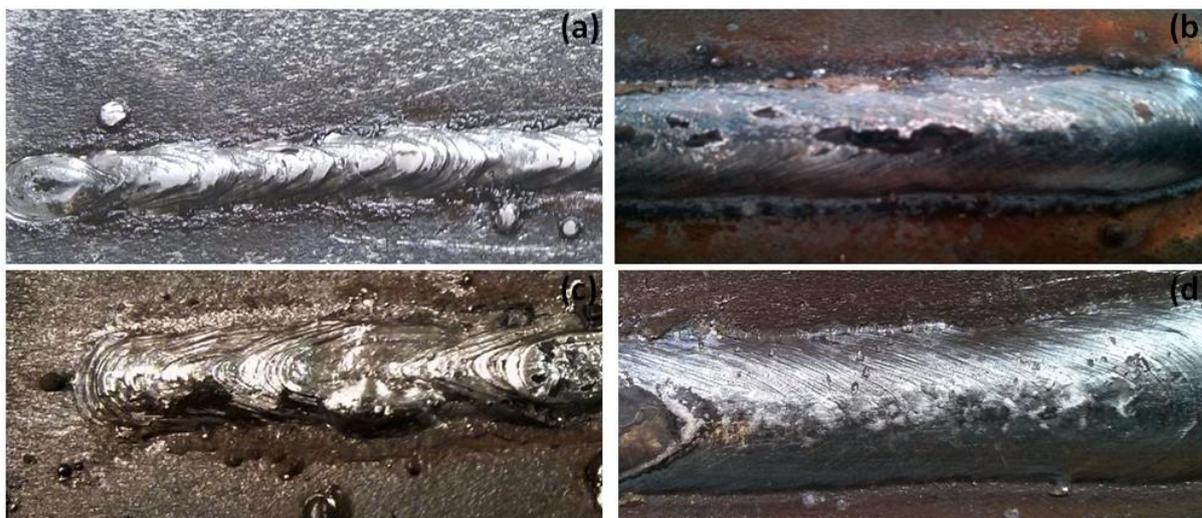


Figura 13 - Aspecto superficial dos cordões obtidos para as Repetições. (a) Eletrodo Revestido ES -. (b) Arame Tubular ES-. (c) Eletrodo Revestido ES+. (d) Arame Tubular ES+.

As figuras 14 e 15 apresentam os aspectos geométricos obtidos para cada cordão de solda para os dois tipos de soldagem incluindo as repetições nos dois níveis de soldagem. Para que se pudesse avaliar a geometria do cordão, assim como toda a região fundida, as amostras foram atacadas com o reagente nital 3% durante 8 segundos. A partir dos parâmetros obtidos para os cordões de solda apresentados nas tabelas 6 e 7 é possível observar que houve um aumento nas características geométricas do cordão de solda devido ao aumento do aporte térmico fornecido à peça e independentemente do processo escolhido. A penetração máxima se manteve praticamente constante para todas as quatro condições, fato esse que é comprovado através das repetições.

Os arames tubulares apresentaram para um mesmo nível cordões mais largos sem apreciáveis mudanças em penetração, este fato está relacionado a DBCP, por ser constante, foi capaz de fornecer calor a uma determinada sem apreciáveis mudanças em penetração, porém com o aumento da corrente, juntamente com o controle da velocidade de alimentação do arame, contribuiu para a formação de uma poça de fusão maior e conseqüentemente uma maior área depositada. Diferentemente da soldagem FCAW, neste trabalho variou-se o diâmetro dos eletrodos revestidos para que fosse possível a soldagem com maiores correntes, logo, além do maior aporte térmico fornecido devido ao aumento de corrente, um maior diâmetro do eletrodo também contribuiu na soldagem SMAW para a formação de cordões de solda maiores.

Embora a energia de soldagem para cada fator tenha sido praticamente a mesma, os valores para a taxa de deposição na soldagem FCAW obtidos neste trabalho são muito

superiores do que na soldagem com os eletrodos revestidos. Este fato ilustra claramente a grande vantagem da utilização dos arames eletrodos frente à soldagem SMAW proporcionando alta produtividade através de maiores velocidades de soldagem, altas densidades de correntes e controle da quantidade de metal que foi fornecido à peça.

Outro fator que trabalha contra a produtividade dos eletrodos revestidos é sua baixa eficiência de deposição. As perdas de materiais devido à formação de escória, respingos e geração de gases é bem maior do que nos arames tubulares. Entre os arames tubulares, embora se tenha obtido um ganho em estabilidade operacional com o aumento da corrente, houve uma ligeira perda de eficiência devido a esse aumento que pode estar relacionado a uma maior formação de escória e geração de gases devido à queima do fluxo interno.

Tabela 7: Aspectos Geométricos do Cordão de Solda. W – Largura, h – reforço, Pmax – penetração máxima, Ad – Área depositada, Ap – Área de Penetração e δ – Diluição

Amostra	W (mm)	h (mm)	Pmax (mm)	Ad (mm ²)	Ap (mm) ²	Diluição	Ef. Dep (%)	TD (kg/h)
ER- 01	6,00	2,5	1	6,03	6,03	50%	79	1,02
AT- 01	12,00	2,5	1	22,67	6,23	22%	89	2,54
ER + 01	10	1,3	1,3	10,19	11,91	54%	81	1,75
AT + 01	14,00	3,5	1	24	21,00	47%	87	3,67
ER- 02	6,50	1,5	1,5	2,4	7,45	76%	78	0,87
AT- 02	10,5	3	1,5	18,7	9,6	34%	90	2,56
ER+ 02	9,5	2	1	9,39	11,139	54%	77	1,69
AT+ 02	13,5	3	1,5	30	14	32%	85	3,40

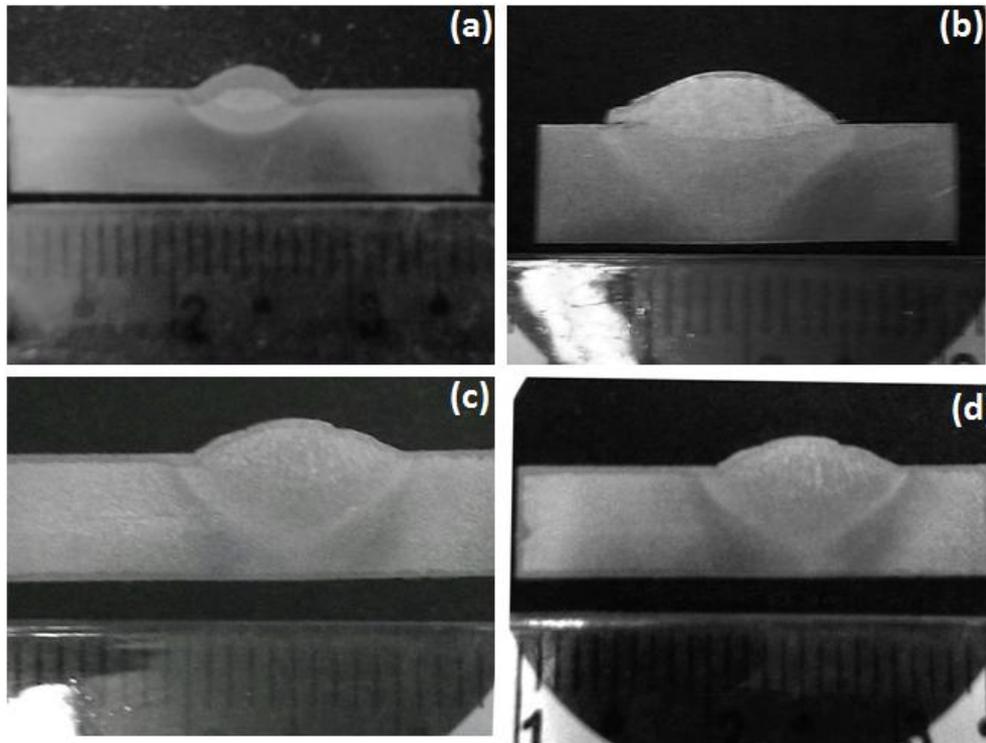


Figura 14: Aspecto Macrográfico do Cordão de Solda, Seção Transversal, Nital 3%. (a) Eletrodo Revestido ES – . (b) Arame Tubular ES-. (c) Eletrodo Revestido ES+. (d) Arame Tubular ES+.

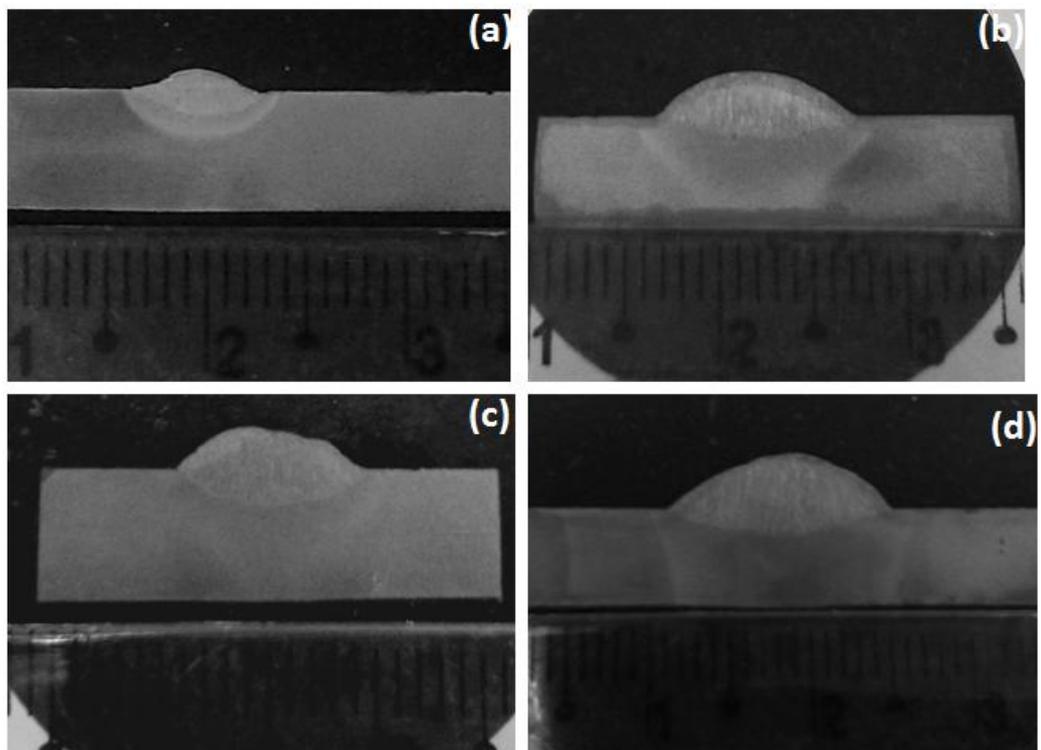


Figura 15 - Aspecto Macrográfico do Cordão de Solda, Seção Transversal, Nital 3%, Repetição. (a) Eletrodo Revestido ES – . (b) Arame Tubular ES-. (c) Eletrodo Revestido ES+. (d) Arame Tubular ES+.

4.3 AVALIAÇÃO MICROESTRUTURAL DA REGIÃO FUNDIDA

Uma vez que foram retiradas apenas seções transversais de cada amostra, foi feita uma avaliação qualitativa das micro inclusões presentes no metal de base e na região fundida baseado no texto de Hubertus Colpaerte em “Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns”. Devido ao metal de base ser um aço de baixo teor de carbono não ligado, apresentou uma quantidade de inclusões característicos de sua classificação, sendo em sua maioria do Tipo 1D série fina (óxidos com espessura de até $8\mu\text{m}$) contendo algumas regiões ricas em inclusões do Tipo 2B (alumina com espessura de até $9\mu\text{m}$) característicos da adição de alumio para desoxidação do aço.

A Figura 16 mostra que na região do cordão de solda a quantidade de inclusões não metálicas nas soldas com Arames Tubulares foi maior do que na soldagem com os eletrodos revestidos. Em geral, os cordões formados a partir de eletrodos revestidos apresentaram a mesma classificação dos tipos de inclusões, para os dois níveis de soldagem, em sua maioria foram formadas inclusões do tipo 2D série fina conforme indicado na Figura 16 a. Para baixos níveis de corrente, utilizando arames tubulares, percebeu-se uma variação nos níveis de inclusões, apresentando óxidos do tipo 2 série fina até regiões que contém óxidos do tipo 3 série grossa. Para maiores densidades de corrente as inclusões nos cordões dos arames tubulares são essencialmente óxidos do tipo 3 com granulação oscilando entre fina e grossa. Essa maior quantidade de óxidos nos arames tubulares é resultado da dissociação do oxigênio do gás de proteção e do fluxo interno na poça de fusão no arco elétrico. O oxigênio dissolvido na poça de fusão além de causar inclusões de óxidos também pode reagir com o carbono presente no aço produzindo CO ou CO₂ provocando porosidades na solda, porém, para os arames tubulares não foram observados nenhum defeitos relacionado a porosidade. (Tatagiba; Goncalves; Paranhos, 2012)

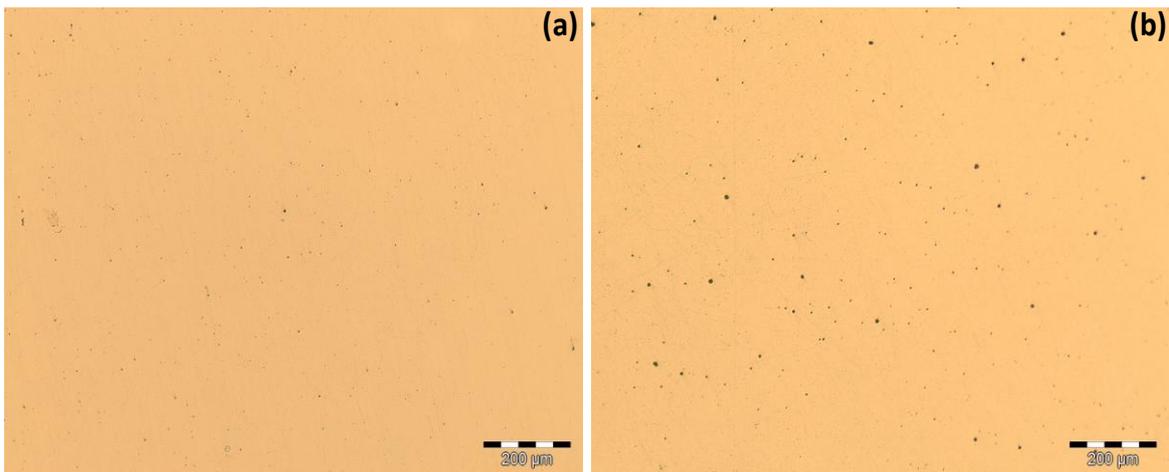


Figura 16: Aspecto Micrográfico do Cordão de Solda, Seção Transversal, Sem ataque, 100x. (a) Eletrodo Revestido ER - 01. (b) Arame Tubular AT - 02.

A Figura 17 mostra o aspecto micrográfico da seção transversal do metal de base após ser atacado com o reagente nital 3% com um aumento de 200x. O metal de base é composto em sua maior parte por ferrita (solução sólida de carbono no ferro α com estrutura cúbica de corpo centrado, sendo estável abaixo de 910°C) e em menor proporção em coloração escura temos a formação de perlita (composta aproximadamente por 88% de Ferrita 12% de Cementita). A Figura 18 mostra um exemplo da região de transição entre o metal de base e o cordão de solda para um aumento de 50x para a soldagem SMAW e FCAW, respectivamente.



Figura 17: Aspecto Micrográfico do Metal de Base, Seção Transversal, Nital 3%, 200x.

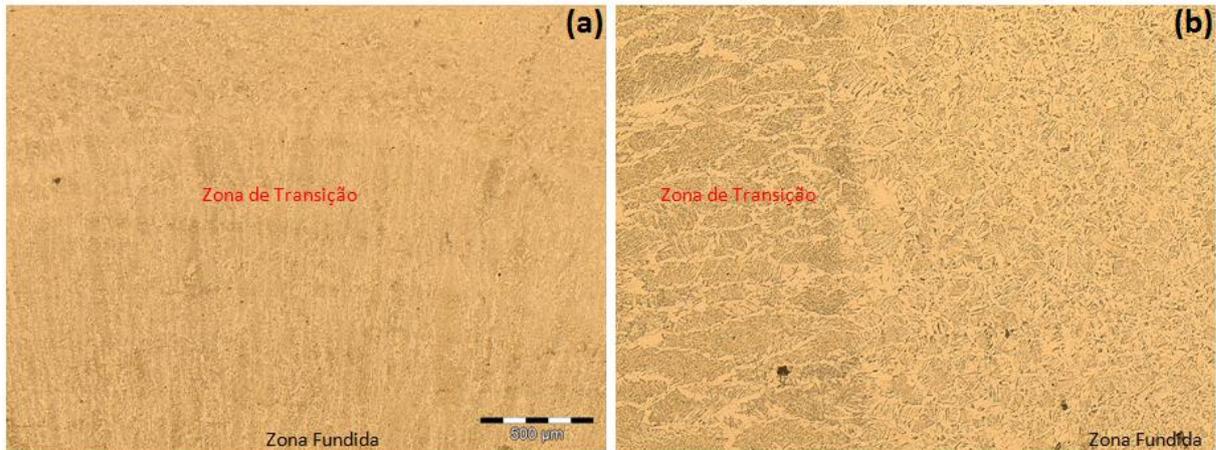


Figura 18: Aspecto Micrográfico da zona de transição, Seção Transversal, Nital 3%, 50x. (a) Eletrodo Revestido (ER-01). (b) Arame Tubular (AT – 01)

A Tabela 8 apresenta a fração volumétrica dos principais microconstituintes presentes na zona fundida para um intervalo de confiança de 95% identificados conforme o procedimento experimental.

Tabela 8 - Fração volumétrica dos microconstituintes presentes na zona fundida. Intervalo de confiança: 95 %.

Identificação	PF (G)	PF (I)	AF	FS (NA)	FS(A)
ER - 01	40 ± 5	4 ± 2	14 ± 3	38 ± 5	5 ± 3
AT - 01	30 ± 3	3 ± 1	18 ± 4	45 ± 4	4 ± 2
ER + 01	46 ± 6	8 ± 2	11 ± 3	32 ± 6	3 ± 1
AT + 01	24 ± 4	3 ± 1	12 ± 3	58 ± 4	3 ± 2
ER - 02	38 ± 8	3 ± 1	13 ± 6	36 ± 9	10 ± 6
AT - 02	31 ± 4	5 ± 2	17 ± 3	41 ± 4	6 ± 2
ER + 02	42 ± 7	7 ± 2	14 ± 5	34 ± 7	3 ± 2
AT + 02	22 ± 6	2 ± 1	18 ± 5	52 ± 8	6 ± 4

Através da Figura 19, na soldagem com eletrodos revestidos utilizando baixa densidade de corrente, notou-se uma maior fração volumétrica de Ferrita Primária de Contorno de grão PF (G) decorrentes das primeiras transformações da austenita. É possível notar também, que fração volumétrica de PF (I) praticamente dobrou com o aumento da energia de soldagem. Uma vez que este constituinte é formado em elevadas temperaturas de transformação seguida de um resfriamento lento, a baixa velocidade de soldagem e a formação de grande quantidade de escória podem ter favorecido sua formação.

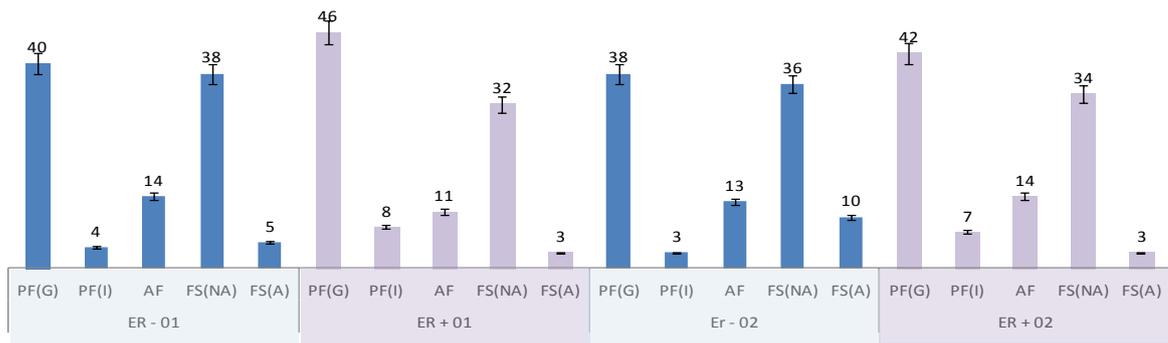


Figura 19: Soldagem SMAW. Comparação da Fração volumétrica (%) dos microconstituintes presentes na zona fundida entre os níveis de energia de soldagem com repetição

Para os cordões de solda formados a partir dos arames tubulares, conforme indicado pela Figura 20, em baixas densidades de correntes, diferentemente do que ocorreu nos eletrodos, houve um maior favorecimento à formação de Ferrita de Segunda Fase Não Alinhada FS (NA) equilibrado com frações semelhantes de Ferrita Acicular AF e Ferrita Primária (PF(G) + PF(I)). Como se deseja a predominância de microconstituintes capazes de favorecer a resistência mecânica, aliada a uma boa tenacidade, é desejável sempre em primeiro lugar teores mais alto de Ferrita Acicular e mais baixos de Ferrita Primária, logo tanto a soldagem FCAW quanto a soldagem SMAW apresentaram níveis semelhantes de Ferrita Acicular para baixa energia de soldagem (Figuras 21 e 22).

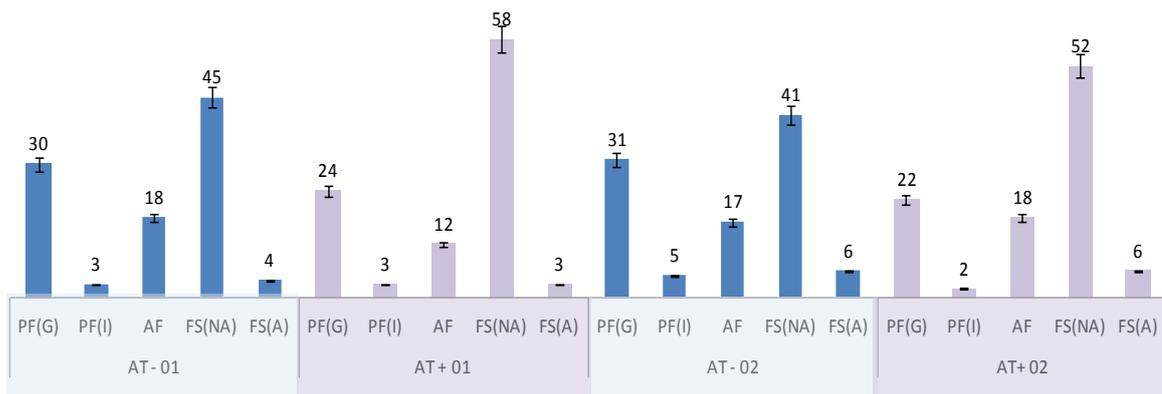


Figura 20: Soldagem FCAW. Comparação da Fração volumétrica (%) dos microconstituintes presentes na zona fundida entre os níveis de energia de soldagem com repetição.

Além da velocidade de resfriamento e da temperatura de formação a formação da Ferrita Acicular é favorecida pela presença de precipitados e de inclusões resultantes da presença de oxigênio, logo é justificável uma maior quantidade de Ferrita Acicular na

soldagem com arames tubulares devido a uma quantidade maior de óxidos e devido a maiores velocidades de soldagem (Modenesi, 2012).

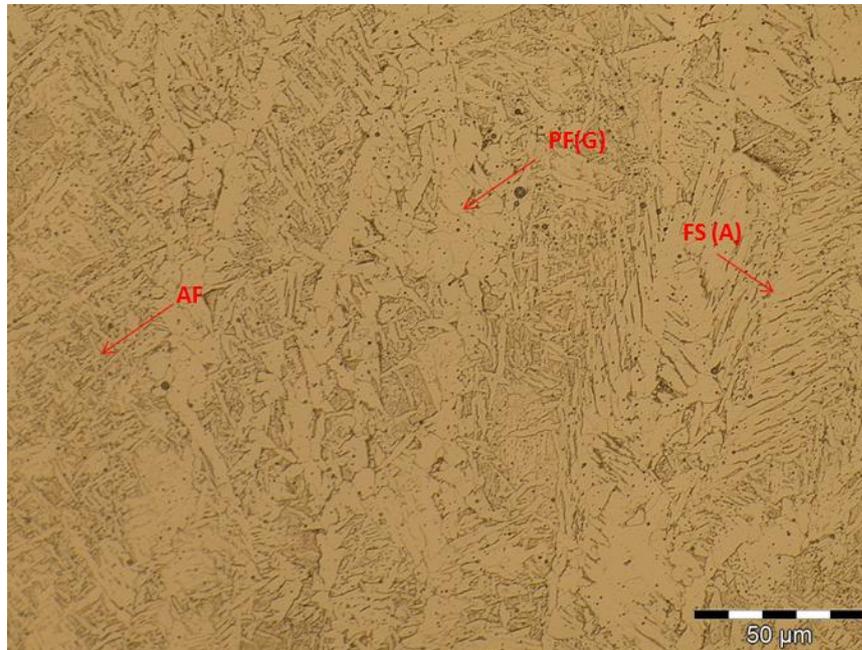


Figura 21: Aspecto Micrográfico da zona fundida, Seção Transversal, Nital 3%, 500x. (ER-01).

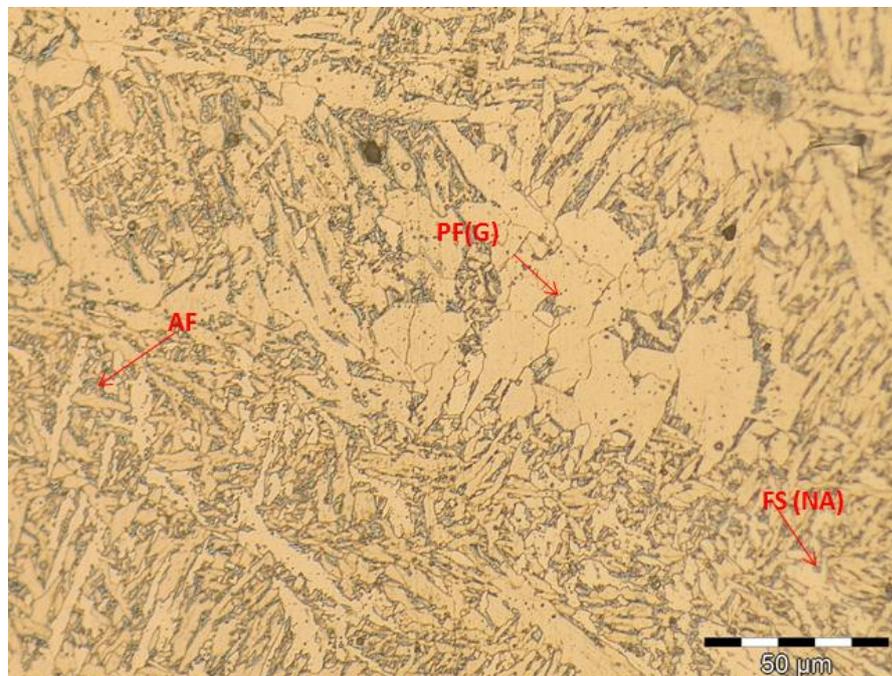


Figura 22: Aspecto Micrográfico da zona fundida, Seção Transversal, Nital 3%, 500x. (AT – 01)

A Figura 23 apresenta os valores da fração volumétrica média (%) dos microconstituintes da zona fundida com indicação de erro de 5% para a série selecionada. A figura ilustra de uma forma geral os resultados

obtidos para os ensaios. Para baixa energia de soldagem, ambos os métodos, apresentam microconstituintes em proporções semelhantes. Uma elevação nos valores de energia soldagem trouxe uma mudança na proporção volumétrica das fases dos cordões gerados pelo processo de soldagem SMAW que provavelmente, foi responsável pela queda de dureza do cordão. Em média, houve uma redução dos valores de FA e FS (NA) e uma elevação nos valores de PF(G) e PF(I).

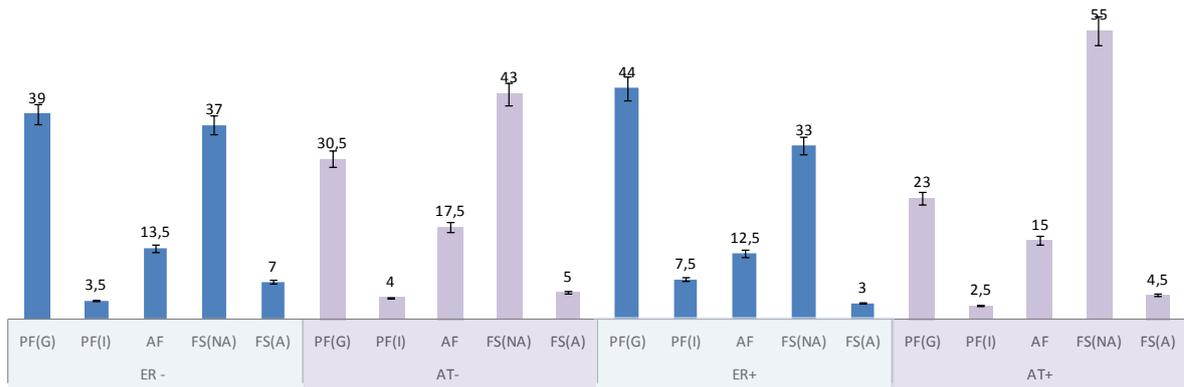


Figura 23: Fração Volumétrica Média (%) dos Constituintes da Zona Fundida.

Barra de Erro 5% para a série selecionada.

FCAW x SMAW.

Segundo Modenesi, 2012, essas duas fases da ferrita são características de soldas com baixa velocidade de resfriamento e/ou baixo teor de elementos de liga, logo é possível que a formação dessas fases tenham sido produto de uma velocidade de soldagem lenta que forneceu calor à peça de forma contínua possibilitando um resfriamento lento suficiente para a formação dessas fases de menor resistência mecânica (ver Figuras 24 e 25). Para os arames tubulares o mesmo fenômeno foi observado, porém não houve formação apreciáveis de PF(I) nem redução de AF, por outro lado, houve um aumento nos valores de FS(NA) e uma diminuição na fração volumétrica de PF(G) favorecido por um resfriamento mais rápido.

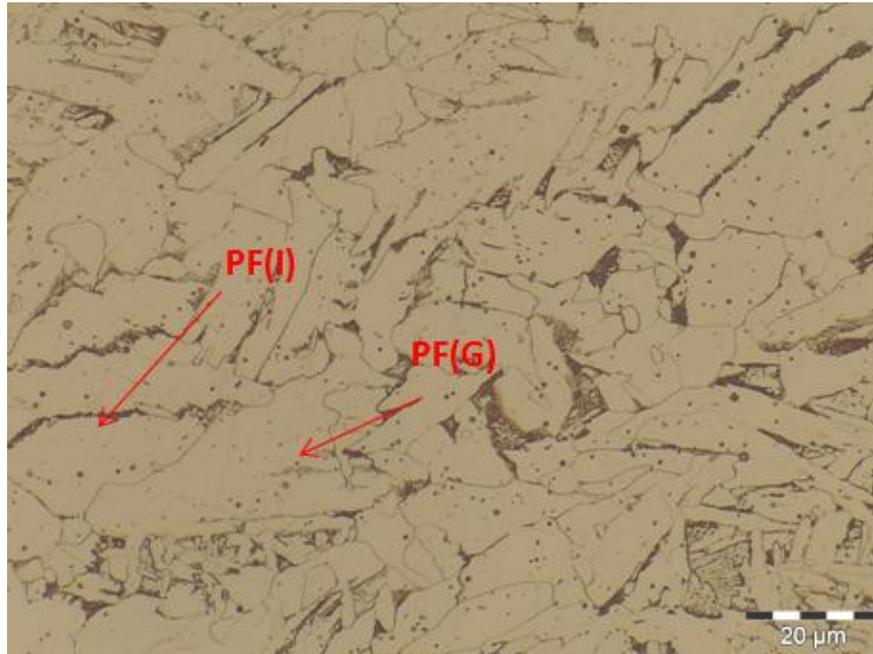


Figura 24: Aspecto Micrográfico da zona fundida com frações volumétricas dos tipos PF(G) e PF(I), Seção Transversal, Nital 3%, 1000x. (ER+01).

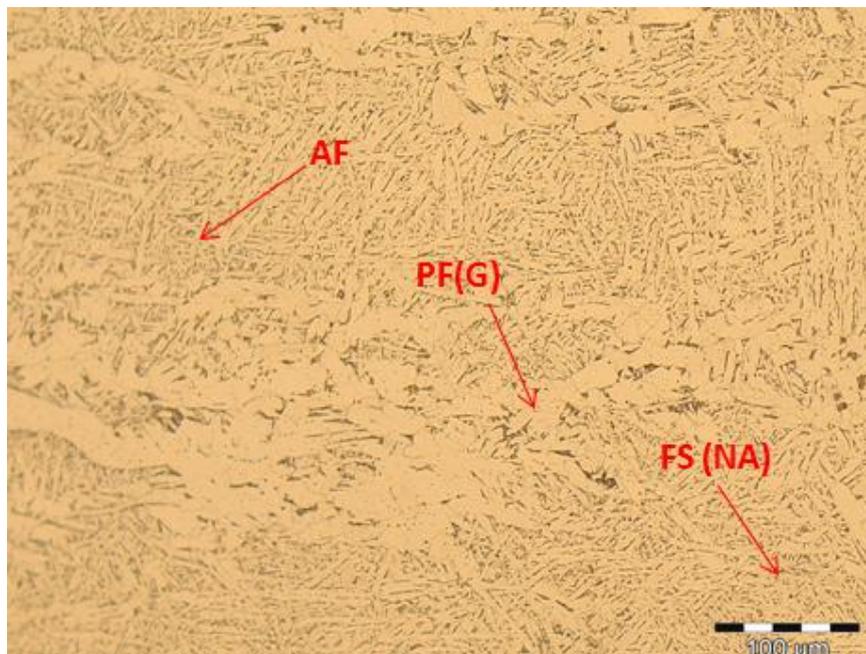


Figura 25: Aspecto Micrográfico da zona fundida com frações volumétricas dos tipos AF, PF(G) e FS(NA). Seção Transversal, Nital 3%, 200x. (AT+01).

A Tabela 9 mostra os valores de dureza e limite de resistência mecânica obtidos a partir de medidas aleatórias da região fundida dos cordões gerados. Conforme discutido anteriormente, a presença de microconstituintes de menor resistência (PF(G) e PF(I)) podem ter contribuído para a redução da dureza com o aumento da energia de soldagem para os eletrodos revestidos, fazendo com que em média, a dureza do cordão de solda para altas energias de soldagem seja aproximadamente 14% menor do que para baixas densidades de correntes. Apesar da soldagem com FCAW ter ocorrido um aumento nos valores de FS(NA) e uma diminuição na fração volumétrica de PF(G), os valores de AF e PF(I) se mantiveram muito próximos fazendo com que a dureza em média para a soldagem AT+ seja bem próxima da obtida na soldagem com baixas densidades de corrente. Em média, o valor do limite de resistência na soldagem AT+ é próximo dos valores encontrados na soldagem AT- e praticamente igual aos valores obtidos para a soldagem ER-.

Tabela 9 - Dureza Vickers (HV) e Resistência Mecânica Na região da zona fundida. Intervalo de confiança de 95%

Identificação	ES (KJ/mm)	HV	Limite de Resistência (N/mm ²)
ER - 01	1,08 ± 0,18	221 ± 19	762
AT - 01	1,01 ± 0,14	219 ± 7	756
ER + 01	1,67 ± 0,28	185 ± 9	638
AT+ 01	1,65 ± 0,09	225 ± 9	776
ER - 02	1,07 ± 0,18	205 ± 5	707
AT - 02	1,07 ± 0,11	213 ± 6	735
ER + 02	1,59 ± 0,25	185 ± 7	638
AT+ 02	1,60 ± 0,10	210 ± 7	725

Os resultados indicam que eventuais variações na Energia de Soldagem FCAW fornecida à peça não devem ter sido fortes o suficiente para resultar em maiores alterações microestruturais ou na dureza da zona fundida. Já para a Soldagem SMAW esse fato não é observável, ou seja, elevações na energia de soldagem podem resultar em maiores alterações microestruturais ou na dureza da zona fundida. Neste sentido, a condição de soldagem mais adequada envolveria a utilização dos arames tubulares tanto para alta quanto para baixa densidade de corrente seria o mais adequado. Caso a estabilidade operacional, qualidade superficial, produção e as propriedades mecânicas da solda não sejam os requisitos principais, a soldagem com os eletrodos revestidos seria o mais indicado.

5. CONCLUSÕES

Para as condições avaliadas neste trabalho, na soldagem sobre chapa de aço de baixo teor de carbono em posição plana utilizando arames tubulares e eletrodos revestidos, variando-se a energia de soldagem:

Para níveis mais baixos de energia de soldagem, ambos os métodos de soldagem apresentam cordões de solda com propriedades mecânicas semelhantes, no geral apresentaram pouca variação da dureza e do limite de resistência entre si.

Para um maior aporte térmico fornecido ao metal de base, notou-se uma queda na dureza dos cordões de solda formados utilizando eletrodos revestidos. A perda de propriedade mecânica do cordão de solda pode estar relacionada à formação de uma maior fração volumétrica de microconstituintes de menor resistência (PF(G) e PF(I)) durante o resfriamento do cordão.

Tanto para baixa quanto para alta energia fornecida à peça, a soldagem FCAW apresentou valores semelhantes de dureza e limite de resistência à tração, ou seja, diferentemente do que ocorreu nos eletrodos revestidos, não houve perdas significativas de propriedades mecânicas devido à formação de microconstituintes de menor resistência.

Apesar de a soldagem SMAW ter fornecido os menores valores de área do cordão formado, utilizando a técnica de arrastar o eletrodo sobre o metal de base, este apresentou a melhor diluição (relação entre área depositada e área do cordão). Além disso, ambas as energias de soldagem apresentaram valores de penetração iguais ou superiores ao da soldagem FCAW.

Ambos os métodos de soldagem apresentaram aumento de estabilidade operacional com o aumento da corrente média utilizada, porém os arames tubulares se mostraram superiores quanto à qualidade superficial e menor quantidade de respingos gerados.

Para baixa energia, nas condições deste trabalho, se uma boa taxa de deposição, estabilidade operacional e aparência superficial são importantes, a condição de soldagem mais adequada envolveria a utilização dos arames tubulares, polaridade positiva, velocidade de alimentação 7m/min, porém, se taxa de deposição, produtividade e aparência não forem importantes é indicado a utilização do eletrodo revestido E7018, CC+ desde que se tenha um controle da área depositada no metal de base.

Para alta energia de soldagem, nas condições deste trabalho, decorrente da utilização de uma maior tensão e velocidade de alimentação a fim de se ter uma maior produtividade, se é desejado que o cordão de solda tenha uma bom limite de resistência mecânica, a condição

mais indicada envolve a utilização dos arames tubulares, polaridade positiva com velocidade de alimentação 7m/min, porém se produtividade e resistência mecânica não são importantes, pode-se indicar o uso dos eletrodos revestidos nas condições utilizadas deste trabalho, desde que se tenha um maior controle da geometria do cordão.

6. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como recomendação para trabalhos futuros, é indicado, que se faça uma análise de variância para verificar se existe uma diferença significativa entre as médias de cada nível de energia e se os fatores exercem realmente uma influência nas propriedades finais do cordão. Além disso, para futuros trabalhos, a fim de se ter dados mais precisos de resistência mecânica, é indicado que se faça corpos de prova para ensaio de tração no cordão de solda para cada uma das condições de soldagem.

Outro fator que pode contribuir para esse trabalho é a utilização de mais níveis de energias de soldagem para se avaliar a partir de qual patamar de energia tem-se uma mudança significativa nas frações volumétricas dos microconstituintes.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ESAB. Apostila de Eletrodos revestidos, 2005. Disponível em: <http://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/upload/1901097rev1_apostilaeletrodosrevestidos_ok.pdf>. Acessado em: 23 ago. 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E562-11:Standard Test Method for Determining Volume Fraction by Systematic Manual PointCount. West Conshohocken, 2012. DOI 10.1520/E0562-11

AWS Welding Handbook: welding processes. 8. ed. Miami: AWS – American Welding Society, january, 2012. v. 2.

BARBEDO, N. D. **Avaliação comparativa dos processos de soldagem GMAW e FCAW utilizando aço ASTM A-36 para verificar a soldabilidade, propriedades metalúrgicas e geométricas, e resistência mecânica.** 2011, 56 p. Dissertação (Mestrado em Projeto e Fabricação) - Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá.

BUBNOFF, D. V.; VENTRELLA, V. A. Relação entre microestrutura/tenacidade ao impacto do metal de solda do aço API X-70 soldado por eletrodo revestido AWS E8010-G. In: Congresso Brasileiro de Ciência dos Materiais-CBECIMAt.Ilha Solteira-SP:[sn], 2002.

CALLISTER, W. D., Jr. **Ciência e engenharia de materiais:** uma introdução. Livros Técnicos e Científicos, 2008.

COLPAERT, H. **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns.** São Paulo: Editora Edgard Blücher LTDA., 1974.

GIRALDO, J. MUÑOZ, D., ARISTIZÁBAL, S., SUÁREZ, J., ARBELÁREZ, A., URIBE, D. **Construcción de curvas de corriente de soldadura contra velocidad de alimentación de alambre para El proceso GMAW.** Dyna, vol. 76, n. 157, p. 205-212. mar. 2009.

IIW Sub-Comission IXJ. Guide to the light microscope examination of ferritic steelweld metals. IIW Doc. IX-1533-88, 1988.

MARQUES, P.V., MODENESI, P.J., BRACARENSE, A.Q., **Soldagem Fundamentos e Tecnologia.** Belo Horizonte, Editora UFMG, 2007.

MODENESI, P. J. **Soldabilidade dos Aços Transformáveis. Apostila da Universidade Federal de Minas Gerais, departamento de engenharia metalúrgica e de materiais.** Belo Horizonte, julho de 2012.

Soldagem I Descontinuidades e Inspeção em Juntas Soldadas. Apostila da Universidade Federal de Minas Gerais, departamento de engenharia metalúrgica e de materiais. Belo Horizonte, julho de 2001.

MOREIRA, A. F. **Influência da atmosfera protetora no cordão de solda obtido através dos processos de soldagem GMAW e FCAW.** 2008. 147 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, SP.

MUKHOPADHYAY, S.; PAL, T.K. **Effect of shielding gas mixture on gas metal arc welding of HSLA steel using solid and flux-cored wires.** International Journal of Advanced Manufacturing Technology, London, v. 29, n. 3 - 4, p. 262 – 268, june, 2006.

NASCIMENTO, A. S. do. **Aspectos operacionais e metalúrgicos da soldagem com arame metal cored.** 2005, 122p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Pará, Belém, PA.

STARLING, C. M. D; MODENESI, P. J.; BORBA, T. M. D. **Caracterização do Cordão na Soldagem FCAW com um Arame Tubular Rutílico.** Soldagem & Inspeção, São Paulo, Vol.16, No. 3, p.285-300, Jul/Set 2011.

STARLING, C. M. D; MODENESI, P. J.; BORBA, T. M. D. **Caracterização do Cordão na Soldagem FCAW com um Arame Tubular Básico.** Soldagem & Inspeção, São Paulo, Vol.13, No. 4, p.304-318, Out/Dez 2008.

STARLING, C. M. D.; MODENESI, P. J.; BORBA, T. M. D. **Comparação do Desempenho Operacional e das Características do Cordão na Soldagem com Diferentes Arames Tubulares em Polaridade Negativa.** In: Soldagem & Inspeção, São Paulo, v.16, n.4, out/dez 2011. p.350-359

STARLING, C. M. D.; MODENESI, P. J.; BORBA, T. M. D. **Comparação do Desempenho Operacional e das Características do Cordão na Soldagem com Diferentes Arames Tubulares.** In: Soldagem & Inspeção, São Paulo, v.14, n.1, jan/mar 2009.p.10-25.

STARLING, C. M. D.; MODENESI, P. J. Proposição de Modelo para a Fusão de Arames Tubulares. In: Soldagem & Inspeção, São Paulo, v.12, n.3, jul/set 2007.p.168-178.

TATAGIBA, L. C. S.; GONCALVES, R. B.; PARANHOS, R. **Trends in the development of protective gases used in GMAW welding**. Soldag. insp. São Paulo, v. 17, n. 3, p. 218-228, set. 2012. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S010492242012000300006&lng=pt&nrm=iso>. Acessos em 28 jan. 2016.

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

8. ANEXO I - TERMO DE AUTENTICIDADE



UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA

Termo de Declaração de Autenticidade de Autoria

Declaro, sob as penas da lei e para os devidos fins, junto à Universidade Federal de Juiz de Fora, que meu Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de Graduação em Engenharia Mecânica é original, de minha única e exclusiva autoria. E não se trata de cópia integral ou parcial de textos e trabalhos de autoria de outrem, seja em formato de papel, eletrônico, digital, áudio-visual ou qualquer outro meio.

Declaro ainda ter total conhecimento e compreensão do que é considerado plágio, não apenas a cópia integral do trabalho, mas também de parte dele, inclusive de artigos e/ou parágrafos, sem citação do autor ou de sua fonte.

Declaro, por fim, ter total conhecimento e compreensão das punições decorrentes da prática de plágio, através das sanções civis previstas na lei do direito autoral¹ e criminais previstas no Código Penal², além das cominações administrativas e acadêmicas que poderão resultar em reprovação no Trabalho de Conclusão de Curso.

Juiz de Fora, ____ de _____ de 20____.

NOME LEGÍVEL DO ALUNO (A)

Matrícula

ASSINATURA

CPF

¹ LEI N° 9.610, DE 19 DE FEVEREIRO DE 1998. Altera, atualiza e consolida a legislação sobre direitos autorais e dá outras providências.

² Art. 184. Violar direitos de autor e os que lhe são conexos: Pena - detenção, de 3 (três) meses a 1 (um) ano, ou multa.