



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM

ENGENHARIA MECÂNICA

SOLDAGEM COM ARCO SUBMERSO UTILIZANDO UM

FLUXO COM POLÍMERO: UM ESTUDO DA

VIABILIDADE DE APLICAÇÃO

ALEXANDRE MANOEL DA SILVA

Belo Horizonte, 26 de abril de 2017

Alexandre Manoel da Silva

**SOLDAGEM COM ARCO SUBMERSO UTILIZANDO UM
FLUXO COM POLÍMERO: UM ESTUDO DA
VIABILIDADE DE APLICAÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Prof. PhD. Alexandre Queiroz Bracarense

Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2017



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

Av. Antônio Carlos, 6627 – Campus Universitário
31270-901 – Belo Horizonte – MG
Tel.: +55 31 3409.5145
E-mail: cpgmec@demec.ufmg.br

***“SOLDAGEM COM ARCO SUBMERSO UTILIZANDO UM
FLUXO COM POLÍMERO: UM ESTUDO DA VIABILIDADE
DE APLICAÇÃO”***

ALEXANDRE MANOEL DA SILVA

Dissertação submetida à banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de “**Mestre em Engenharia Mecânica**”, na área de concentração de “**Processos de Fabricação**”.

Dissertação aprovada no dia 26 de abril de 2017.

Prof. Dr. Alexandre Queiroz Bracarense – Orientador
Departamento de Engenharia Mecânica / UFMG

Prof. Dr. Paulo José Modenesi – Examinador
Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais / UFMG

Prof. Dr. Ezequiel Caires Pereira Pessoa – Examinador
Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Minas Gerais/ IFMG

Prof. M.Sc Welerson Reinaldo de Araújo – Examinador
Centro Universitário Newton Paiva

*Ao único Deus,
À minha esposa Érica,
Ao meu filho Guilherme,
sempre presentes em minha vida!*

“O temor do Senhor é a instrução da sabedoria, e precedendo a honra vai a humildade.”

Provérbios 15:33

“Bem-aventurado o homem que acha sabedoria, e o homem que adquire conhecimento;”

Provérbios 3:13

“... tudo o que é verdadeiro, tudo o que é honesto, tudo o que é justo, tudo o que é puro, tudo o que é amável, tudo o que é de boa fama, se há alguma virtude, e se há algum louvor, nisso pensai.”

Filipenses 4:8

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pelo Seu eterno e imenso amor, pois sem Ele nada seria possível.

À minha esposa Érica e ao meu filho Guilherme, pelo amor incondicional, a tolerância e a imensa compreensão que demonstraram em minha relativa ausência durante este período.

Aos meus pais, às minhas irmãs, aos meus cunhados, aos meus sobrinhos e a todos os meus familiares que estiveram sempre por perto, me incentivando e ajudando a prosseguir.

Aos amigos e irmãos da IBNPP pelo incentivo, em especial ao Carlos pela cooperação.

À Aline, Sheron, Bruno e Nilo, companheiros de jornada, ao Luciano, Gabriel, Jonathas, Ariel, Eustáquio, Frank, Fagner, José Roberto, Moara, Renata, Elisângela e aos demais colaboradores do LRSS pelo apoio e pelas dicas na realização deste trabalho.

Ao ex-aluno Arthur Neto, pela parceria no pontapé inicial para execução deste projeto.

Aos professores Modenesi, Ezequiel e Welerson, pela nova oportunidade concedida.

Ao professor Cláudio e à professora Daisy que contribuíram com dicas importantes.

Ao corpo docente da UFMG, pelos conhecimentos transmitidos ao longo deste curso.

À Marina, sempre solícita e paciente, e a toda equipe da secretaria do PPGMEC, pela presteza no apoio acadêmico.

Ao Alberto e ao professor Luiz, pela atenção e disponibilidade no uso do Laboratório de Tratamento de Minérios do Departamento de Engenharia de Minas da UFMG.

À ESAB S.A. por disponibilizar a fábrica piloto para produção dos fluxos de soldagem, em especial aos Engenheiros Ronaldo Cardoso e Guilherme Valadares, ao Alexandre Durço e à Marinalva, pelo apoio e a disposição em ajudar.

À FAPEMIG, pelo apoio e incentivo através da concessão de bolsa de estudo.

Ao meu orientador Prof. PhD. Alexandre Queiroz Bracarense, que me confiou este projeto, pela oportunidade, pela compreensão e pelo apoio na elaboração deste trabalho.

A todos que de alguma forma contribuíram para conclusão de mais esta etapa.

Meus sinceros agradecimentos, vocês foram fundamentais na realização deste projeto!

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	8
LISTA DE TABELAS	10
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	11
NOMENCLATURA	12
RESUMO	13
1. INTRODUÇÃO	14
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1. Fluxos para soldagem com arco submerso	16
2.2. Características de escoabilidade de pós e grãos por gravidade	17
2.2.1 Tipos de escoamento de um fluxo_.....	17
2.2.2 Problemas no escoamento de fluxos_	18
2.3. Variáveis do processo SAW	19
2.4. Metalurgia da soldagem	20
2.4.1. Energia de soldagem	20
2.4.2. Macroestrutura da Região de Solda	21
2.4.3. Microestrutura do Metal de Solda	23
2.5. Uso do polímero na soldagem	25
3. METODOLOGIA	27
3.1. Materiais	28
3.1.1. Metal de base	28
3.1.2. Metal de adição	28
3.1.3. Fluxos de soldagem – testes preliminares	28
3.1.3.1 Fluxo I	28
3.1.3.2 Fluxo C	30
3.1.4. Fluxos de soldagem – testes definitivos	30
3.1.4.1 Fluxos com polímero	31
3.1.4.2 Fluxo P5 e P10	31
3.1.4.3 Fluxo S	32
3.2. Equipamentos	32
3.2.1. Dispositivo de soldagem	32
3.2.2. Fonte de energia de soldagem	34
3.2.3. Moinho de bolas	34
3.2.4. Agitador mecânico de peneiras	36

3.2.5. Planta piloto para fabricação de fluxos de soldagem	36
3.3. Procedimentos experimentais	37
3.3.1. Análise granulométrica dos fluxos.....	37
3.3.2. Procedimento de soldagem	38
3.3.3. Ensaio metalográfico	39
3.3.4. Ensaio de microdureza	41
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	43
4.1. Características granulométricas dos fluxos de soldagem	43
4.1.1. Testes preliminares	43
4.1.2. Testes definitivos	48
4.1.2.1 Fluxos com polímero	48
4.1.2.2 Fluxos P5 e P10.....	49
4.2. Avaliação dos cordões de solda depositados	51
4.2.1. Testes preliminares	51
4.2.1.1 Avaliação das soldagens realizadas com os Fluxos C e I	51
4.2.2. Testes definitivos	54
4.2.2.1 Avaliação das soldagens realizadas com os Fluxos P e S	54
4.3. Macroestruturas dos metais de solda	55
4.3.1. Testes preliminares	55
4.3.2. Testes definitivos	56
4.4. Microestruturas dos metais de solda	59
4.4.1. Microestruturas das soldagens realizadas nos testes definitivos	59
4.4.2. Constituintes microestruturais da ZF das soldagens com o Fluxo S	61
4.4.3. Constituintes microestruturais da ZF das soldagens com o Fluxo P5	62
4.4.4. Constituintes microestruturais da ZF das soldagens com o Fluxo P10.....	63
4.5. Ensaio de microdureza Vickers	64
5. CONCLUSÕES	67
5.1. Sugestões para trabalhos futuros.....	68
ABSTRACT	69
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	70

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 - Tipos de escoamento de produtos sólidos.....	17
FIGURA 2.2 - Obstrução em tubo (A) e obstrução em abóboda (B)	18
FIGURA 2.3 - Esquema das regiões de uma solda por fusão	22
FIGURA 2.4 - Esquema de medida da diluição	22
FIGURA 2.5 - Constituintes microestruturais dos metais de solda	23
FIGURA 2.6 - Ilustração esquemática do caminho de propagação de trincas.....	25
FIGURA 2.7 - Percentual de ferrita acicular no uso do eletrodo impermeável	26
FIGURA 3.1 - Revestimento polimérico retirado dos eletrodos.....	29
FIGURA 3.2 - Mistura do pó dos revestimentos com silicato de sódio	30
FIGURA 3.3 - Dispositivo desenvolvido para escoamento de fluxo	33
FIGURA 3.4 - Sistema de deslocamento e deposição utilizado nas soldagens	33
FIGURA 3.5 - Fonte de energia utilizada nas soldagens	34
FIGURA 3.6 - Moinho de bolas utilizado na moagem do revestimento polimérico.....	35
FIGURA 3.7 - Esferas e revestimentos no moinho de bolas antes da moagem.....	35
FIGURA 3.8 - Esferas e revestimentos no moinho de bolas depois da moagem.....	35
FIGURA 3.9 - Agitador mecânico: testes preliminares (A) e definitivos (B)	36
FIGURA 3.10 - Fábrica piloto para produção de fluxo	37
FIGURA 3.11 - Fluxo de retido após o peneiramento	38
FIGURA 3.12 - Esquema de cortes transversais no cordão de solda	40
FIGURA 3.13 - Esquema de medição da morfologia do metal de solda	40
FIGURA 3.14 - Microscópio ótico Olympus BX60M	41
FIGURA 3.15 - Microdurômetro	41
FIGURA 3.16 - Esquema de medição das microdurezas	42
FIGURA 4.1 - Granulometria média dos Fluxos I e C.....	43
FIGURA 4.2 - Distribuição granulométrica Fluxos I antes e depois de separados	44
FIGURA 4.3 - Aspecto visual do Fluxo I (A) e do Fluxo C (B)	45
FIGURA 4.4 - Obstrução em abóboda observada no Fluxo I.....	45
FIGURA 4.5 - Aspecto visual dos fluxos: adição de 15% (A) e 20% (B) de Na ₂ O ₃ Si .46	
FIGURA 4.6 - Granulometria do Fluxo I antes e após a adição de Na ₂ O ₃ Si.....	46
FIGURA 4.7 - Aspecto visual do Fluxo C (A) e do Fluxo I (B)	47
FIGURA 4.8 - Granulometria média do Fluxo I (20% Na ₂ O ₃ Si) e do Fluxo C.....	47

FIGURA 4.9 - Aspecto visual do fluxo aglomerado com polímero	49
FIGURA 4.10 - Aspecto visual dos Fluxos S, P5 e P10	49
FIGURA 4.11 - Granulometria média dos Fluxos P5 e P10	50
FIGURA 4.12 - Cordões de solda depositados com stickout de 18 mm	51
FIGURA 4.13 - Cordões de solda depositados com stickout de 12 mm	52
FIGURA 4.14 - Solda sem porosidade -Fluxo I: stickout de 18 mm e 12 mm	53
FIGURA 4.15 - Solda com porosidade -Fluxo C: stickout de 18 mm e 12 mm	53
FIGURA 4.16 - Cordões de solda – testes definitivos	54
FIGURA 4.17 - Macrografia dos metais de solda: stickout de 18 mm	55
FIGURA 4.18 - Macrografia dos metais de solda: stickout de 12 mm	56
FIGURA 4.19 - Macrografia dos metais de solda: tensão de 26V	57
FIGURA 4.20 - Macrografia dos metais de solda: tensão de 32V	57
FIGURA 4.21 - Micrografia dos metais de solda – Tensão: 26V. Ampliação: 100x. Ataque: Nital 2%	60
FIGURA 4.22 - Micrografia dos metais de solda – Tensão: 32V. Ampliação: 100x. Ataque: Nital 2%	60
FIGURA 4.23 - Micrografia da ZF, Amostra 1S. Ampliação: 200X (A) e 500X (B) Ataque: Nital 2%	61
FIGURA 4.24 - Micrografia da ZF, Amostra 2S. Ampliação: 200X (A) e 500X (B) Ataque: Nital 2%	61
FIGURA 4.25 - Micrografia da ZF, Amostra 1P5. Ampliação: 200X (A) e 500X (B) Ataque: Nital 2%	62
FIGURA 4.26 - Micrografia da ZF, Amostra 2P5. Ampliação: 200X (A) e 500X (B) Ataque: Nital 2%	62
FIGURA 4.27 - Micrografia da ZF, Amostra 1P10. Ampliação: 200X (A) e 500X (B) Ataque: Nital 2%	63
FIGURA 4.28 - Micrografia da ZF, Amostra 2P10. Ampliação: 200X (A) e 500X (B) Ataque: Nital 2%	63
FIGURA 4.29 - Perfil de microdureza HV – Tensão: 26V	65
FIGURA 4.30 - Perfil de microdureza HV – Tensão: 32V	65
FIGURA 4.31 - Valores médios de microdureza HV – Tensão: 26V	66
FIGURA 4.32 - Valores médios de microdureza HV – Tensão: 32V	66

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 - Constituintes da classificação de microestrutura.....	24
TABELA 3.1 - Composição química nominal dos aços SAE 1020	28
TABELA 3.2 - Composição química típica arame ER70S-6	28
TABELA 3.3 - Formulação do revestimento do eletrodo impermeável	29
TABELA 3.4 - Formulação do pó de fluxo ácido	31
TABELA 3.5 - Concentração mássica do polímero em solução.....	31
TABELA 3.6 - Quantidade de polímero utilizada na produção dos Fluxos P5 e P10....	31
TABELA 3.7 - Relação Silicato x Pó de fluxo com 5% de polímero	32
TABELA 3.8 - Relação Silicato x Pó de fluxo com 10% de polímero	32
TABELA 4.1 - Relação Polímero x Pó de fluxo	48
TABELA 4.2 - Parâmetros de soldagem testes preliminares	51
TABELA 4.3 - Parâmetros de soldagem testes definitivos.....	54
TABELA 4.4 - Morfologia dos cordões de solda – testes definitivos	58
TABELA 4.5 - Diluição nos metais de solda – testes definitivos	59

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
AWS	American Welding Society
FCAW	Flux-cored Arc Welding
GMAW	Gas Metal Arc Welding
HSLA	High Strength Low Alloy
IIW	International Institute Welding
LRSS	Laboratório de Robótica Soldagem e Simulação
MAG	Metal Inert Gas
MIG	Metal Active Gas
NBR	Norma Brasileira
SAE	Society of Automotive Engineers
SAW	Submerged Arc Welding
SMAW	Shield Metal Arc Welding
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais

NOMENCLATURA

Al_2O_3	Óxido de alumínio
CaF_2	Fluoreto de cálcio
CaO	Óxido de cálcio
FeO	Óxido de ferro
K_2O	Óxido de potássio
$\text{K}_2\text{O}_3\text{Si}$	Silicato de potássio
Li_2O	Óxido de lítio
Mn	Manganês
MgO	Óxido de magnésio
MnO	Óxido de manganês
Na_2O	Óxido de sódio
$\text{Na}_2\text{O}_3\text{Si}$	Silicato de sódio
Si	Silício
SiO_2	Dióxido de Silício
TiO_2	Dióxido de titânio
ZrO_2	Dióxido de zircônio

RESUMO

Várias pesquisas na área de soldagem têm sido realizadas nos últimos anos, não apenas para estudar os aspectos relacionados aos processos já existentes, mas também para contribuir com o desenvolvimento tecnológico do processo. Estudos relacionados a novos consumíveis, equipamentos e técnicas de soldagem foram desenvolvidos visando melhorias em produtos e serviços. Em pesquisa recente, um polímero foi utilizado como aglomerante em eletrodos revestidos para soldagem subaquática e posteriormente soldagem fora d'água a fim de obter a impermeabilidade do revestimento. A aplicação do polímero nos revestimentos resultou não apenas na impermeabilidade desejada, mas também resultou em boas propriedades mecânicas no metal de solda, com formação de ferrita acicular em quantidades superiores aos valores encontrados em soldagens realizadas com eletrodos revestidos convencionais. Em continuidade a esta linha de pesquisa, aplicou-se, neste trabalho, o polímero como aglomerante de fluxo para soldagem com arco submerso. Como experimento preliminar, utilizou-se o revestimento do eletrodo revestido impermeável para produzir um fluxo granulado. Nos experimentos definitivos, foram produzidos três fluxos adicionando o polímero como aglomerante de pó de fluxo ácido e, para comparação, utilizou-se um fluxo convencional, aglomerado com silicato de potássio. Os resultados indicaram que o polímero contribuiu para a redução de quantidade de grãos grosseiros na microestrutura e aumento na formação de ferrita acicular na zona fundida do metal de solda. Além disto, foi constatado que os metais de solda depositados com os fluxos produzidos com polímero apresentaram valores de dureza superiores aos valores encontrados nos metais de solda depositados com o fluxo convencional.

Palavras-chave: Processo SAW, fluxo, polímero, microestrutura, ferrita acicular.

1 INTRODUÇÃO

No intuito de alcançar resultados que aumentem a produtividade e ao mesmo tempo proporcionem redução nos custos de produtos e serviços, a busca pelo desenvolvimento tecnológico no setor industrial, em seus mais diversos segmentos, tem resultado em importantes melhorias nos processos produtivos. Na área de soldagem a busca por melhorias e aperfeiçoamento dos processos existentes não é diferente, devido à sua grande aplicação nos mais variados setores da indústria.

Desde seu desenvolvimento, em meados de 1935, o processo de soldagem com arco submerso tem sido aperfeiçoado, passando por evoluções tecnológicas, seja na utilização de novas técnicas de soldagem, no desenvolvimento de novos equipamentos ou em melhorias na composição dos consumíveis, a fim de obter melhores propriedades da junta soldada e maior produtividade no processo.

Estudos envolvendo o processo SAW vêm sendo realizados há várias décadas e, dentre estes, pode se destacar o esforço no desenvolvimento de novos fluxos de soldagem tanto em estudos mais antigos, como o realizado por Marya (1980) para aplicação em soldagem de titânio e ligas à base de titânio, quanto em estudos recentes, como realizado por Jindal (2013) no desenvolvimento de fluxos para utilização em soldagem de aços HSLA. Além disso, em outras pesquisas relacionadas ao uso de fluxos para soldagem com arco submerso, podem ser citados os estudos realizados por Kumar (2011), que desenvolveu um fluxo ácido aproveitando resíduos de pós mais finos de fluxos não utilizados nas soldagens e Sharma (2011), que realizou estudos visando melhorias nas propriedades de resistência à corrosão na soldagem de aços estruturais. Apesar dos vários estudos realizados, um dos grandes problemas ainda enfrentado pelas empresas que utilizam o processo SAW é a manutenção do fluxo de soldagem, que deve ser mantido a temperaturas controladas isento de umidade para, assim, não comprometer a qualidade do cordão de solda depositado.

Em estudo recente, realizado por Fichel et al (2009), um polímero foi usado na substituição de um aglomerante em revestimentos de eletrodos para aplicação no processo de soldagem subaquática a fim de obter a impermeabilidade do eletrodo na condição de extrema umidade que o eletrodo é submetido neste processo.

A partir dos resultados do uso deste revestimento, que mostrou sua eficácia no processo de soldagem subaquática, tanto no aspecto visual como nas propriedades microscópicas apresentadas, os estudos foram estendidos por Vaz et al. (2010) também às soldagens em ambientes secos, onde o polímero foi adicionado à composição de eletrodos revestidos básicos utilizados no processo de soldagem SMAW.

Em continuidade a estes estudos, relacionados ao uso de polímero no processo de soldagem, este trabalho tem como objetivo geral avaliar a viabilidade da aplicação de um fluxo aglomerado com polímero no processo SAW. Os resultados foram avaliados levando em consideração o aspecto visual, a morfologia dos cordões, a microestrutura e a microdureza dos metais de solda resultantes das soldagens.

Com isso, este trabalho apresenta os seguintes objetivos específicos:

- Desenvolver um dispositivo para escoamento do fluxo de soldagem, por ação da gravidade, possibilitando realizar as soldagens com arco submerso a partir de uma fonte GMAW.
- Testar preliminarmente um fluxo produzido a partir do eletrodo revestido impermeável.
- Produzir e testar três fluxos de soldagem produzidos a partir de um pó de fluxo ácido, com diferentes porcentagens de polímero.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Fluxos para soldagem com arco submerso

Constituídos por uma mistura de óxidos e minerais, os fluxos utilizados no processo SAW desempenham importantes funções na soldagem como: proteger o arco e o metal de adição da contaminação atmosférica, diminuir o teor de impurezas no metal de solda, além de agir como isolante térmico, proporcionando maior concentração de calor à poça de fusão. A classificação dos fluxos para soldagem a arco submerso pode ser feita pelo método de fabricação, pela influência na composição química do metal de solda ou por suas características químicas (MARQUES, 2008; PARANHOS, 1999).

Quanto ao método de fabricação, os fluxos de soldagem são classificados como fluxos fundidos, que não são higroscópicos, ou fluxos aglomerados, que são higroscópicos e precisam de ressecagem antes de sua utilização. Pela influência na composição química no metal de solda, os fluxos são classificados como neutros, que praticamente não influenciam na composição do metal de solda; ativos, que contém quantidades significativas de Mn e Si, adicionados para obter maior resistência à porosidade e a trincas; e ligados que, além de Mn e Si, adicionam outros elementos de liga ao metal de solda. Quanto à sua característica química, também conhecida como índice de basicidade, os fluxos são definidos como básicos, ácidos ou neutros, onde os fluxos de maior basicidade geralmente resultam em soldas com melhores propriedades mecânicas (MARQUES, 2008; PARANHOS, 1999; SCOTTI, 2001).

No processo SAW a deposição do fluxo para a zona de soldagem se dá pelo escoamento por gravidade e a granulometria média, ou seja, o tamanho e a distribuição das partículas do fluxo influenciam na formação do cordão de solda. As normas que padronizam estes consumíveis não definem uma faixa granulométrica ideal, no entanto a maior parte dos fluxos tem seu tamanho distribuído entre as malhas ABNT 12 e 60. Um fluxo muito espesso pode causar luminosidade e instabilidade do arco elétrico, principalmente quando são utilizados baixos níveis de corrente, já um fluxo com excesso de grãos finos pode abafar a solda, impedindo que os gases escapem, resultando em poros e mordeduras no cordão de solda (PARANHOS, 1999; SCOTTI, 2001).

O escoamento do fluxo de soldagem deve acontecer sem interrupção na deposição a fim de evitar falha na cobertura do cordão de solda, o que pode resultar em falta de proteção da poça de fusão, deixando o arco elétrico exposto, causar respingos e luminosidade, impactando na geometria e na qualidade da solda (PARANHOS, 1999).

2.2 Características de escoabilidade de pós e grãos por gravidade

2.2.1 Tipos de escoamento de um fluxo

De acordo com Jenike (1964), o escoamento de partículas sólidas por gravidade em um silo pode ocorrer de duas formas: fluxo de funil e fluxo de massa.

O fluxo de funil é definido como aquele onde apenas uma parte do produto depositado entra em movimento por um canal vertical, através de um tubo formado no interior do silo. Este tipo de escoamento tende a ocorrer em silos que apresentam paredes rugosas e possuem um elevado ângulo de inclinação com a vertical.

No fluxo de massa ocorre uma movimentação simultânea de todas as partículas contidas no silo, fazendo com que haja um descarregamento uniforme. Este escoamento ocorre quando os silos apresentam paredes lisas e um ângulo de inclinação que possibilite o escoamento das partículas sem interrupções. Os escoamentos dos tipos fluxo de funil e fluxo de massa são ilustrados na FIG. 2.1.

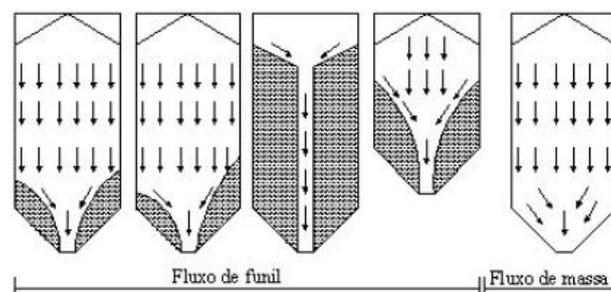


Figura 2.1 – Tipos de escoamento de produtos sólidos (Lopes, 2005).

2.2.2 Problemas no escoamento de fluxos

De acordo com Calil (1990, apud Palma, 2005) a obstrução de fluxo se dá quando o produto contido no silo adquire resistência suficiente para suportar seu próprio peso pela consolidação do produto. Caso não haja obstruções durante o escoamento, o fluxo das partículas por gravidade ocorrerá livremente e de forma satisfatória.

Os dois principais problemas que interferem ou impedem a escoabilidade de um fluxo por gravidade, são denominados obstrução em tubo e obstrução em abóboda.

A obstrução em tubo é mais comum no escoamento do fluxo tipo funil e ocorre pela consolidação das partículas, relacionada ao tempo de armazenamento.

A obstrução em abóboda se dá pela formação de um arco logo acima da saída do silo, ocasionando em falha no escoamento pela interrupção do movimento das partículas e pode ocorrer independentemente do tamanho das partículas ou dos grãos inseridos no silo. No caso de grãos mais finos e coesivos a força de adesão existente entre as partículas é a causa principal para tal ocorrência, já no caso de grãos maiores a principal causa está relacionada à ligação mecânica entre estas partículas. Na FIG. 2.2 ilustram-se os principais problemas que causam falha no escoamento por obstrução.

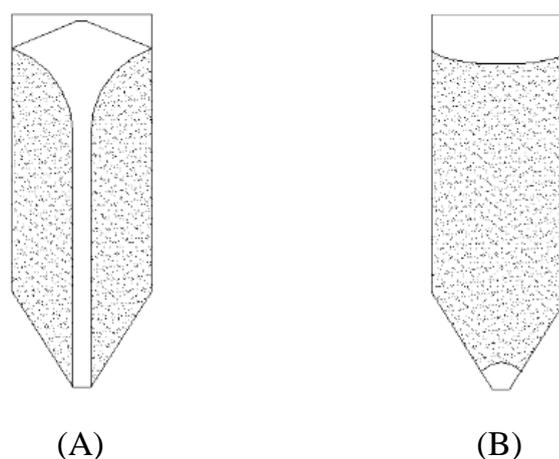


Figura 2.2 – (A) Obstrução em tubo e (B) obstrução em abóboda (Deckers, 2010).

Em estudo referente às condições de escoabilidade de pós em um silo, Hausner (1967, apud Campos, 2012) aborda dois fatores relacionados às características granulométricas que impactam diretamente na escoabilidade de um pó: o tamanho e o formato das partículas ou dos grãos utilizados em um processo.

O primeiro, que é um dos principais fatores que influencia no escoamento de um pó, está relacionado ao tamanho das partículas, onde estudos mostraram que partículas menores geralmente apresentam maior dificuldade na escoabilidade. Por outro lado, o aumento do tamanho das partículas é acompanhado pela diminuição da coesividade do material que, conseqüentemente, facilita o escoamento.

O outro fator está relacionado ao formato das partículas, divididas em esféricas, irregulares e flocos, que mesmo apresentando distribuições granulométricas semelhantes possuem diferentes condições de escoamento. Quanto mais a partícula se desvia do formato esférico maior a dificuldade em seu escoamento.

Em outro estudo referente ao escoamento, Bodhmagé (2006) verificou a influência das propriedades físicas de um pó na fluidez de uma partícula, através de vários pós utilizados na indústria farmacêutica. Neste estudo, chegou-se à conclusão de que dentre os fatores que influenciam na fluidez de uma partícula estão: o tamanho das partículas, indicando que quando mais reduzidas resultam em menor fluidez; o formato das partículas, que quando alongados e irregulares tendem a diminuir a fluidez; e a ligação mecânica entre as partículas, que leva à formação de arcos.

2.3 Variáveis do processo SAW

A escolha de parâmetros adequados na soldagem é importante para obter um cordão de solda sem defeitos. As variáveis do processo determinam o formato do cordão de solda, a penetração, o reforço e também o surgimento de defeitos como mordeduras, trincas e porosidades. Dentre estas variáveis podem ser destacadas: o tipo de corrente, a intensidade da corrente, a velocidade de soldagem, a tensão do arco elétrico e o stickout utilizado na soldagem (MARQUES, 2008; PARANHOS, 1999; SCOTTI, 2001).

Na soldagem com arco submerso o tipo de corrente mais utilizado é a corrente contínua com polaridade positiva que resulta em maior resistência à porosidade e maior penetração do cordão de solda. O uso de polaridade negativa proporciona maior taxa de deposição e um aumento da taxa de fusão, porém produz menor penetração.

A intensidade de corrente determina a taxa de fusão do eletrodo e influencia na penetração da poça de solda e na quantidade de metal de base fundido. Ao manter constantes as demais variáveis do processo, um aumento na intensidade de corrente resulta em um aumento na penetração, na taxa de deposição e no reforço da solda.

A velocidade de soldagem impacta na geometria do cordão de solda, onde seu aumento tende a diminuir a largura, o reforço e a penetração da solda e vice-versa. Uma velocidade de soldagem excessivamente alta pode resultar na ocorrência de mordedura, porosidade e cordão irregular, já a velocidade excessivamente baixa pode causar trincas.

A tensão de soldagem impacta no comprimento do arco, na largura do cordão e no consumo de fluxo. Nas soldagens com deposição sobre chapas (bead-on-plate) o aumento da tensão do arco aumenta a largura do cordão sem afetar a penetração, porém o uso inadequado da tensão pode causar efeitos indesejáveis.

O stickout é determinado pela extensão do eletrodo e, pela dificuldade de sua medição, é considerado como a distância do bico de contato à peça (DBCP) na qual a solda está sendo realizada. Através do stickout é possível alterar o valor de outras variáveis como corrente e tensão de soldagem. (SCOTTI, 2001; MARQUES, 2008).

2.4 Metalurgia da soldagem

2.4.1 Energia de soldagem

Nos processos de soldagem os parâmetros aplicados na operação provocam alterações localizadas na estrutura e nas propriedades do material soldado, o que torna importante o controle da velocidade de resfriamento da solda a fim de minimizar ou eliminar os efeitos prejudiciais que podem ser causados pelas variáveis do processo.

Este controle pode ser feito através da energia de soldagem aplicada à operação que, com o efeito do ciclo térmico, influencia as reações e alterações estruturais que ocorrem em uma determinada região do material, de acordo com os parâmetros de soldagem utilizados (MARQUES, 2008; MODENESI, 2010).

A energia de soldagem está relacionada ao calor fornecido à junta soldada e é definido como a quantidade de energia fornecida à junta por unidade de comprimento. Na soldagem a arco, a energia de soldagem é expressa pela EQ. 2.1.

$$H = \frac{\eta VI}{v} \quad (2.1)$$

Onde H (heat input) é a energia de soldagem (kJ/cm), η é o rendimento térmico do processo, V é a tensão no arco, em Volts, I é a corrente de soldagem, em Amperes, e v é a velocidade de soldagem, dada em cm/s (MARQUES, 2008).

O valor do rendimento térmico depende do processo de soldagem utilizado e no processo SAW a eficiência térmica pode alcançar, em média, 90% devido ao uso do fluxo de soldagem que além de aumentar o calor durante a soldagem diminui as perdas para o ambiente (DUPONT, 1995; KOU, 2003; SGARBI, 2013).

2.4.2 Macroestrutura da Região de Solda

De acordo com Modenesi (2012), durante o processo de soldagem, as regiões adjacentes ao metal de base são submetidas a ciclos térmicos onde o decréscimo na temperatura de pico, à medida que se afasta do eixo central da solda, resulta em alterações microestruturais ao longo da seção transversal do material original, que na solda por fusão são distinguidas em três regiões básicas. A curva de repartição térmica, que permite definir estas regiões, denominadas Zona Fundida (ZF), Zona Termicamente Afetada (ZTA) e Metal de Base (MB) é ilustrada na FIG. 2.3.

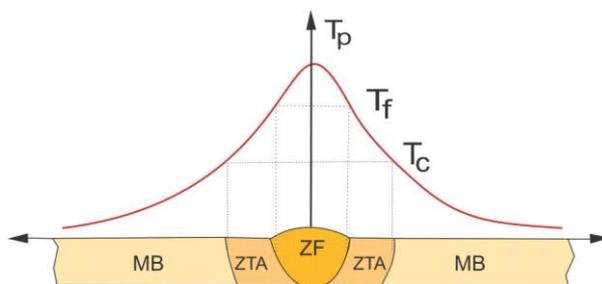


Figura 2.3 – Esquema das regiões de uma solda por fusão – adaptado (Modenesi, 2012).

A zona fundida é a região em que ocorreu a fusão e a solidificação do material durante a soldagem, sendo as temperaturas de pico (T_p) desta região superiores à temperatura de fusão (T_f) do metal de base. Esta região é formada pela mistura entre o metal de base e o metal de adição, no estado líquido, na poça de fusão. A composição química destes materiais tem grande importância, uma vez que a diluição, ou seja, a proporção com que o metal de base participa na formação da zona fundida depende da participação relativa de seus constituintes (MARQUES, 2008; MODENESI, 2012).

Em um cordão depositado sobre chapa, a diluição (δ) pode ser medida na seção transversal das soldas através de macrografias, de acordo com a FIG. 2.4.



Figura 2.4: Esquema de medida da diluição (Modenesi, 2012).

A zona termicamente afetada é a região onde, durante a soldagem, não ocorreu fusão do metal de base, mas houve alterações em sua microestrutura ou nas propriedades, decorrentes do ciclo térmico de soldagem. Nesta região, as temperaturas de pico foram superiores à temperatura crítica (T_c), porém foram inferiores à sua temperatura de fusão (T_f) do material usado como metal de base (MARQUES, 2008).

O metal de base é a região mais afastada do cordão de solda que, portanto, não foi afetada durante o processo de soldagem, sendo suas temperaturas de pico (T_p) inferiores à temperatura crítica (T_c) do material (MARQUES, 2008).

2.4.3 Microestrutura do Metal de Solda

A zona fundida de um cordão de solda apresenta uma microestrutura resultante das interações ocorridas no metal líquido, do processo de solidificação e de transformações no estado sólido que podem ocorrer no resfriamento da solda, formando diferentes agregados de ferrita e carbonetos ou, ainda, alguma quantidade de martensita, dependendo da composição química e condições de resfriamento (MODENESI, 2012).

Os constituintes microestruturais presentes na soldagem de metais ferríticos podem ser identificados pela morfologia da ferrita, utilizando a microscopia ótica. Na FIG. 2.5 apresentam-se as microestruturas características de um metal de solda de baixo carbono, identificando os diferentes constituintes que podem estar presentes, enquanto na TAB. 2.1 são mostrados os constituintes presentes na classificação microestrutural de metais de solda de baixo carbono (COLPAERT, 2008; MODENESI, 2012).

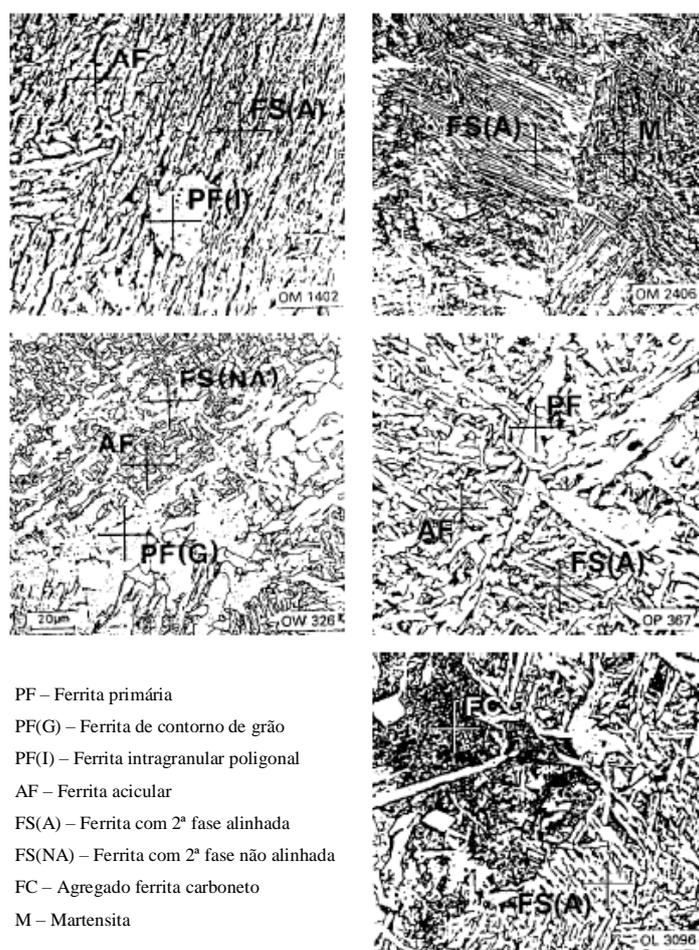


Figura 2.5 – Constituintes microestruturais metais de solda – (IIW, 1988 apud Modenesi, 2012).

TABELA 2.1 – Classificação dos constituintes na microestrutura – (IIW, 1988 apud Modenesi, 2012).

CONSTITUINTE		ABREVIACÃO	DEFINIÇÃO
CATEGORIA	SUBCATEGORIA		
Ferrita	Contorno de Grão	PF(G)	Veios de grão poligonais associados com os contornos austeníticos prévios.
	Poligonal Intragranular	PF(I)	Grãos de ferrita, geralmente poligonais, localizados dentro dos grãos austeníticos prévios e mais 3 vezes maiores do que os grãos ou lâminas adjacentes de ferrita.
Ferrita Acicular		AF	Grãos de ferrita pequenos e não alinhados localizados no interior dos grãos austeníticos prévios. Uma região de AF normalmente inclui placas isoladas de grande razão de forma (relação entre o maior e menor eixo).
Ferrita com segunda fase	Alinhada	FS(A)	Duas ou mais placas paralelas de ferrita. No caso de apenas duas placas, a razão de forma deve ser maior que 4:1. Se o operador tiver segurança, este constituinte pode ser subclassificado como placa lateral de ferrita – FS(SP), bainita superior – FS(UB) ou bainita inferior – FS(LB).
	Não Alinhada	FS(NA)	Ferrita envolvendo completamente ou (i) “microfases” aproximadamente equiaxiais ou distribuídas aleatoriamente ou (ii) lâminas isoladas de AF.
Agregado Ferrita Carboneto		FC	Estruturas finas de ferrita e carboneto, incluindo ferrita com carbonetos interfásicos e perlita. Se o agregado é claramente identificado como perlita, ele deve ser designado como FC(P). Se o agregado for menor que as lâminas adjacentes dentro do grão austenítico prévio, ele deve ser desprezado.
Martensita		M	Colônias de martensita maiores que as lâminas adjacentes de ferrita, podendo ser classificado pelo operador como martensita laminar – M(L) ou martensita maclada – M(T).

Dentre os constituintes formados na microestrutura do cordão de solda, a ferrita acicular é considerada um constituinte bastante desejado, por apresentar propriedades de alta resistência mecânica, melhor tenacidade e resistência à propagação de trincas (FONSECA, 2006; GLOVER, 1977; LIU, 1986). Um dos mecanismos para explicar tais propriedades se encontra no fato da ferrita acicular apresentar uma orientação cristalográfica ao acaso, fazendo com que o caminho de propagação de trincas por clivagem seja retardado, resultando em melhorias na tenacidade da região soldada (BHADESHIA, 2001 apud PARIS, 2010).

Por outro lado, a presença de ferrita com segunda fase não é desejável na soldagem, uma vez que este constituinte apresenta características de menor tenacidade e menor resistência à propagação de trincas no metal de solda. Além disto, a formação de grande quantidade de ferrita de contorno de grão também é indesejável, uma vez que esta morfologia de ferrita apresenta um tamanho de grão relativamente grande e tende a formar veios ao longo dos contornos de grãos austeníticos nas regiões inalteradas da zona fundida que, devido a estas características, resulta em menor resistência à fratura por clivagem (BAILEY, 1978; BUBNOFF, 2002; MODENESI, 2010).

Na FIG. 2.6 é apresentada uma ilustração esquemática do caminho de propagação de trincas por clivagem em uma microestrutura constituída por ferrita de contorno de grão e ferrita acicular, respectivamente.

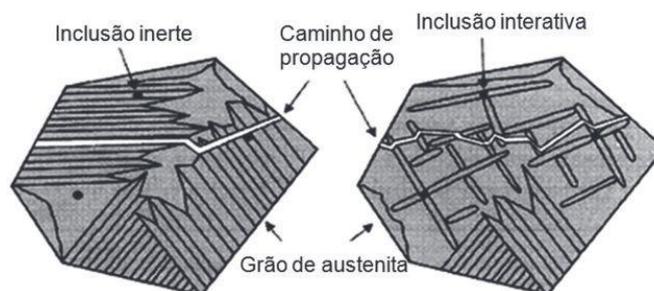


Figura 2.6 – Ilustração esquemática do caminho de propagação de trincas (Paris, 2011).

2.5 Uso do polímero na soldagem

Em estudos iniciados por Fichel et al (2009), um polímero foi aplicado na substituição de um aglomerante em revestimentos de eletrodos rútilicos utilizados no processo de soldagem subaquática molhada, visando o desenvolvimento de um consumível que apresentasse características de impermeabilidade na condição de extrema umidade que o eletrodo é submetido no processo. Os resultados obtidos no uso deste revestimento na soldagem subaquática comprovaram não apenas a eficácia na substituição do aglomerante pelo polímero na impermeabilização do eletrodo, mas também foi verificada, na análise metalográfica, a presença de grande quantidade de ferrita acicular na microestrutura do metal de solda.

Com o sucesso no uso do polímero no revestimento dos eletrodos rútilicos na soldagem subaquática, os estudos foram estendidos à soldagem em ambientes secos por Vaz et al (2010), onde o polímero foi usado na composição de eletrodos revestidos básicos no processo SMAW. Além de confirmar a presença de ferrita acicular em quantidades superiores às normalmente encontradas nos eletrodos revestidos básicos padrões como pode ser visto na FIG. 2.7, foi observado também o impacto do polímero na redução de custo operacional, pela eliminação da necessidade de ressecagem e da manutenção do eletrodo em estufa antes de sua utilização.

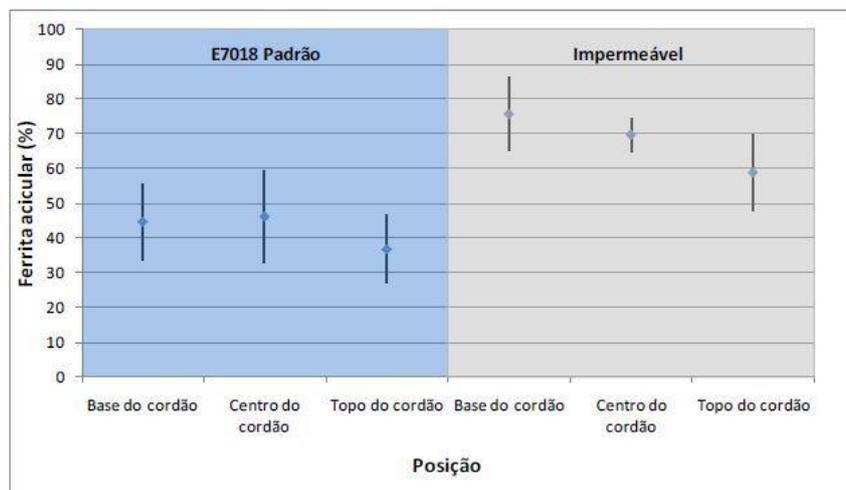


Figura 2.7 – Percentual de ferrita acicular no uso do eletrodo impermeável. Fonte: Vaz et al (2011)

Em estudo posterior, Santiago (2012) utilizou diferentes percentuais do polímero com objetivo de avaliar o impacto do teor de polímero nas propriedades do metal de solda depositado com o eletrodo impermeável. Os resultados obtidos não apresentaram mudanças significativas na microestrutura, na composição química e na dureza dos cordões de solda analisados.

Em pesquisa recente, Castro (2015) estudou a viabilidade da utilização de polímero na composição de fluxos utilizados na soldagem com eletrodos tubulares no processo FCAW, adicionando diferentes proporções de polímero aos consumíveis. Na avaliação da geometria do cordão e dos valores de microdureza dos metais de solda depositados o resultado foi considerado satisfatório, entretanto foi constatado, na análise microestrutural, que não houve predominância de ferrita acicular, como ocorrido nas deposições realizadas com os eletrodos revestidos impermeáveis.

Em continuidade a estas pesquisas, neste trabalho o polímero foi utilizado como aglomerante de fluxos de soldagem com arco submerso, onde se adicionou diferentes porcentagens de polímero na mistura com um pó de fluxo ácido. O objetivo deste estudo é verificar o efeito do polímero adicionado, nas propriedades mecânicas e metalúrgicas do metal de solda produzido com este fluxo.

3 METODOLOGIA

Este trabalho foi dividido em duas fases:

- 1ª Fase: Testes preliminares, onde foram utilizados dois tipos de fluxo de soldagem diferentes definidos como:
 - a) Fluxo I – fluxo obtido a partir de revestimentos poliméricos de eletrodos revestidos básicos impermeáveis, desenvolvidos por Vaz et al (2010).
 - b) Fluxo C – fluxo convencional, utilizado como padrão de comparação.

- 2ª Fase: Testes definitivos, realizados com fluxos produzidos a partir das seguintes composições:
 - a) Fluxo P5 – pó de fluxo ácido, 5% de polímero e silicato de potássio.
 - b) Fluxo P10 – pó de fluxo ácido, 10% de polímero e silicato de potássio.
 - c) Fluxo S – pó de fluxo ácido e silicato de potássio.

O Fluxo I foi obtido através dos processos de moagem e peneiramento com análise granulométrica, sendo a granulometria inicial determinada a partir do resultado do ensaio da composição granulométrica do Fluxo C. Os Fluxos P5 e P10 foram obtidos em uma fábrica piloto para produção de fluxo, disponibilizada pela empresa ESAB S/A.

As soldagens foram feitas com deposição sobre chapas (bead-on-plate), com ângulo de inclinação de 90 graus, perpendicular ao metal de base. Para realização das soldagens foi desenvolvido um dispositivo com um reservatório para deposição e escoamento do fluxo para a zona de soldagem.

Nos testes preliminares foram avaliados o aspecto visual e as imagens metalográficas das macroestruturas. Nos testes definitivos a avaliação foi feita através das imagens metalográficas de macro e microestruturas, medições da geometria dos cordões de solda e medições de microdurezas realizadas nos corpos de prova.

3.1 Materiais

3.1.1 Metal de base

Foram utilizadas chapas de aço SAE 1020 com espessura de 6,35 mm, cortadas em peças de 50 x 150 mm. Na TAB. 3.1 mostra-se a composição química nominal do aço SAE 1020 de acordo com a norma SAE J403.

Tabela 3.1 – Composição química nominal (% em peso) dos aços SAE 1020 (SAE J403).

C	Mn	P	S	Fe
0,18 – 0,23%	0,30 – 0,60%	< 0,03%	< 0,05%	Rest.

3.1.2 Metal de adição

O metal de adição empregado nas soldagens foi o arame sólido ER70S-6, com diâmetro de 1,2 mm, fabricado conforme a norma AWS A5.18. Na TAB. 3.2 é apresentada a composição química nominal do metal de adição utilizado.

Tabela 3.2 – Composição química nominal (% em peso) arame ER70S-6 (AWS A5.18).

C	Mn	Si	S	P	Cu	Ni	Cr	Mo
0,06-0,15	1,40-1,85	0,80-1,15	<0,035	<0,025	<0,50	<0,15	<0,15	<0,15

3.1.3 Fluxos de soldagem – testes preliminares

3.1.3.1 Fluxo I

Na TAB. 3.3 mostra-se a formulação do revestimento do eletrodo.

Tabela 3.3 – Formulação do revestimento (% peso) do eletrodo impermeável (Vaz, 2014).

Calcário	Pó de Ferro	Fluorita	Polímero	Silicato	Ferro Silício	Ferro Manganês	Rutilo	Feldspato	Outros
24%	23%	12%	11%	9%	6%	5%	4%	3%	3%

Para obtenção do Fluxo I, os revestimentos foram retirados manualmente dos eletrodos e depois submetidos a um processo de moagem. Na FIG. 3.1 mostra-se o aspecto dos revestimentos poliméricos, antes de serem moídos.



Figura 3.1 – Revestimento polimérico retirado dos eletrodos.

Depois de serem retirados dos eletrodos, os revestimentos poliméricos foram submetidos a um processo de moagem, através de um moinho de bola carregado com esferas de moagem em aço inoxidável, por um período de 2 minutos, onde foram moídos para serem utilizados como fluxo de soldagem.

Em etapa posterior foi adicionado silicato de sódio ao Fluxo I a fim de melhorar a escoabilidade do fluxo. Para verificar a melhor combinação silicato/pó, para dar ao Fluxo I as características adequadas, foram feitas misturas com adição do ligante em percentuais de 15% e 20% (em peso). Neste processo, foram utilizados os pós com partículas menores que 212 μm dos revestimentos moídos dos eletrodos poliméricos.

Os ingredientes foram devidamente pesados e misturados em um Gral de porcelana, que é mostrado na FIG. 3.2.



Figura 3.2 – Mistura do pó dos revestimentos com silicato de sódio.

Os fluxos resultantes da mistura foram deixados em temperatura ambiente por 1 hora e depois levados a um forno tipo mufla para secagem a uma temperatura de 100 °C, por um período de 2 horas. Após ser retirado do forno, o fluxo foi mantido por 1 hora em temperatura ambiente e depois foi novamente levado ao forno a uma temperatura de 365 °C, por um período de 2 horas, a fim de proporcionar melhores propriedades mecânicas ao polímero (CANTO, 2007).

3.1.3.2 Fluxo C

Para determinar a granulometria e avaliar os cordões de solda depositados durante os testes preliminares, foi utilizado como referência um fluxo convencional aglomerado neutro, básico, OK 10.71, produzido pela ESAB S/A conforme AWS 5.17, que foi denominado neste trabalho como Fluxo C.

3.1.4 Fluxos de soldagem – testes definitivos

Na produção dos fluxos aplicados nos testes definitivos foi utilizado, na mistura, um pó de fluxo ácido cuja formulação é apresentada na TAB. 3.4.

Tabela 3.4 – Formulação (% peso) do pó de fluxo ácido (ESAB S/A).

Bauxita calcinada	Minério Mn calcinado	Fluorita fina	Zirconita	Ilmenita	Magnesita calcinada	Ferro Si 75% moído	Ferro Si-Mn 18% Si	Rutilo	Minério Mn moído
46,5%	5,0%	10%	4,0%	5,0%	6,0%	4,5%	5,0%	5,0%	9%

3.1.4.1 Fluxos com polímero

Na produção dos Fluxos P, o polímero foi diluído em solução e adicionado em diferentes percentuais ao pó de fluxo ácido. Na TAB. 3.5 apresenta-se a concentração mássica do polímero em solução.

Tabela 3.5 – Concentração mássica do polímero em solução

	Quantidade
Polímero seco	1308,23 g
Polímero em solução	2125,26 g
Concentração	61,56%

3.1.4.2 Fluxos P5 e P10

Inicialmente verificou-se a possibilidade de aglomerar o pó de fluxo e obter a formação de grãos utilizando apenas o polímero como aglomerante, com percentuais de 10% e 20% de polímero na mistura.

Para produção dos fluxos P5 e P10 o polímero em solução foi adicionado à mistura considerando a quantidade proporcional de pó de fluxo utilizada. Na TAB 3.6 mostra-se a quantidade de polímero adicionada na produção dos fluxos com percentuais de 5% e 10% de polímero.

Tabela 3.6 – Quantidade de polímero utilizada na produção dos Fluxos P5 e P10

	Pó de Fluxo	Polímero seco	Polímero em solução
Fluxo P5	10 kg	500 g	812,3 g
Fluxo P10	8 kg	800 g	1299,6 g

O silicato de potássio foi adicionado à mistura aos poucos até atingir a quantidade necessária para formação de grãos. Posteriormente as misturas foram levadas a um forno rotativo, sendo submetidas a uma temperatura de +/- 250 °C. Nas TAB. 3.7 e 3.8 são apresentadas as quantidades de silicato de potássio utilizadas na produção dos fluxos P5 e P10, respectivamente.

Tabela 3.7 – Relação Silicato x Pó de fluxo com 5% de polímero (% em peso)

Silicato (g)	Percentual	Aglomerou?	Granulou?
700	7,0%	Não	Não
1120	11,2%	Não	Não
1680	16,8%	Não	Não
1960	19,6%	Não	Não
2212	22,1%	Sim	Sim

Tabela 3.8 – Relação Silicato x Pó de fluxo com 10% de polímero (% em peso)

Silicato (g)	Percentual	Aglomerou?	Granulou?
700	8,7%	Não	Não
980	12,3%	Não	Não
1120	14,0%	Não	Não
1260	15,7%	Não	Não
1372	17,2%	Sim	Sim

3.1.4.3 Fluxo S

O Fluxo S foi produzido com adição de 23,5% de silicato de potássio ao pó de fluxo, sendo a mistura submetida a uma temperatura de calcinação de +/- 680 °C.

3.2 Equipamentos

3.2.1 Dispositivo de soldagem

Considerando que a quantidade de fluxo produzida foi pequena, as soldagens foram realizadas em uma fonte de soldagem GMAW como se fosse um equipamento SAW em escala reduzida. Sendo assim, foi necessário desenvolver um dispositivo para possibilitar o escoamento do fluxo para a zona de soldagem.

Além de permitir o escoamento do fluxo de forma semelhante ao processo SAW, o dispositivo foi projetado para possibilitar também a variação do ângulo de soldagem e proporcionar a deposição em diferentes posições de soldagem através de uma simples troca de conexão.

A fim de evitar desvios e aumentar a confiabilidade dos parâmetros, os experimentos foram realizados com o auxílio de um sistema de deslocamento através de um carrinho tipo "tartaruga", adaptado com opções de regulagem horizontal, vertical e variação angular da tocha de soldagem.

Na FIG. 3.3 apresenta-se o dispositivo de soldagem e na FIG. 3.4 mostra-se o sistema de deslocamento para deposição dos cordões de solda, com o dispositivo desenvolvido montado na tocha de soldagem, já acoplada ao carrinho.



Figura 3.3 – Dispositivo desenvolvido para escoamento de fluxo.



Figura 3.4 – Sistema de deslocamento e deposição utilizado nas soldagens.

3.2.2 Fonte de energia de soldagem

Os experimentos foram realizados com uma fonte de energia para soldagem GMAW marca ESAB, modelo Smashweld 408, apresentada na FIG. 3.5, que de forma semelhante ao processo SAW utiliza arames de eletrodos alimentados por uma bobina. Por ser uma fonte de energia de tensão constante, os valores da intensidade da corrente são resultantes da velocidade de alimentação do arame regulada na fonte.



Figura 3.5 – Fonte de energia utilizada nas soldagens.

3.2.3 Moinho de bolas

A moagem do revestimento polimérico para obtenção do Fluxo I foi feita em um moinho de bolas de pequeno porte, utilizado para moer materiais em menor quantidade, disponibilizado pelo Laboratório de Tratamento de Minérios do Departamento de Engenharia de Minas da UFMG. Na FIG. 3.6 apresenta-se o moinho de bolas, em conjunto com os demais equipamentos utilizados no processo de moagem.



Figura 3.6 – Moinho de bolas utilizado na moagem do revestimento polimérico.

Foram utilizadas esferas de moagem em aço inoxidável com cargas variando entre 72 e 359 gramas, que foram limpas antes de serem utilizadas, a fim de evitar contaminações. Na FIG. 3.7 apresentam-se as esferas (A) e os revestimentos no moinho juntamente com as esferas antes de serem moídos (B), já na FIG 3.8 mostra-se o revestimento moído, após seu processamento.

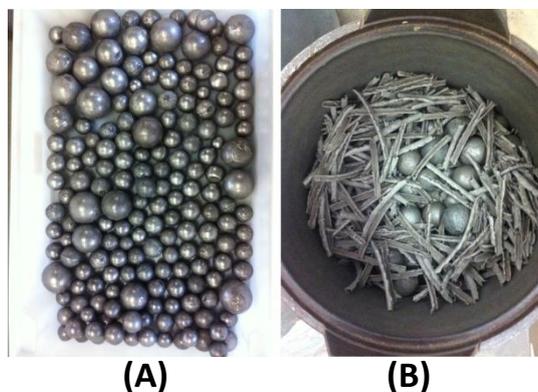


Figura 3.7 – Esferas (A) e revestimentos no moinho de bolas antes da moagem (B).



Figura 3.8 – Esferas e revestimentos no moinho de bolas depois da moagem.

3.2.4 Agitador mecânico de peneiras

A determinação da distribuição granulométrica dos fluxos utilizados nos testes preliminares foi realizada com peneiramento do material, através de um ensaio de granulometria, utilizando um agitador mecânico de peneiras e um conjunto de peneiras com malhas padrão Mesh Tyler, disponibilizados pelo Laboratório de Tratamento de Minérios do Departamento de Engenharia de Minas da UFMG. Nos testes definitivos, o ensaio de granulometria foi realizado na empresa ESAB S/A. Na FIG. 3.9 é apresentado o agitador mecânico de peneiras e o conjunto de peneiras utilizado nos ensaios dos testes preliminares (A) e definitivos (B).

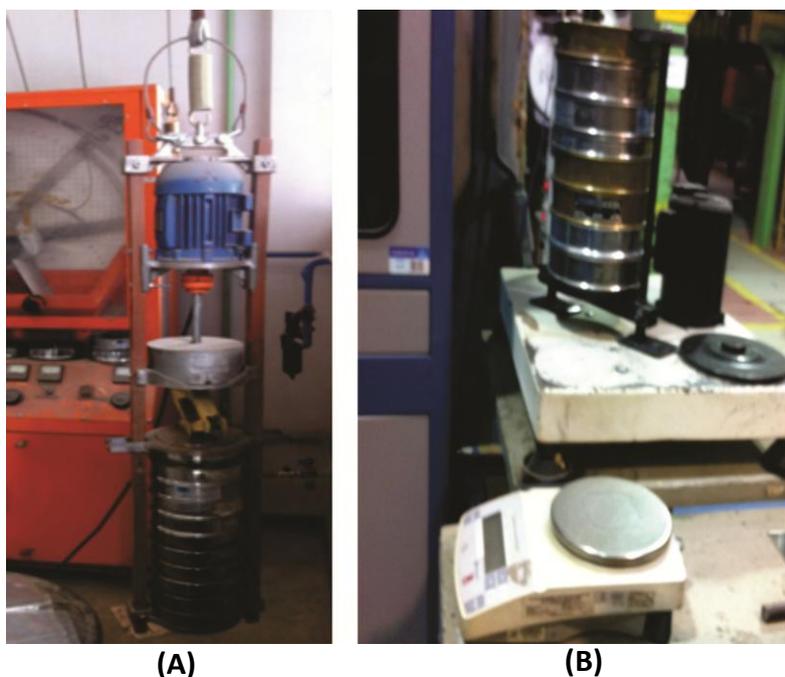


Figura 3.9 – Agitador mecânico: testes preliminares (A) e definitivos (B).

3.2.5 Planta piloto para fabricação de fluxos de soldagem

Os fluxos de soldagem utilizados nos testes definitivos foram produzidos em uma fábrica piloto, desenvolvida pela empresa ESAB S/A, que foi disponibilizada para realização das misturas dos fluxos. Na FIG. 3.10 apresenta-se a fábrica piloto.



Figura 3.10 – Fábrica piloto para produção de fluxo.

Na fábrica piloto o pó de fluxo é inserido no misturador e aglomerado com uma solução aquosa de silicato de sódio ou de potássio. O produto da massa resultante desta mistura é levado a um forno de pré-secagem, passando em seguida por um processo de calcinação em um forno rotativo linear com temperaturas que podem chegar a 800°C. Neste processo a massa misturada e aglomerada é reduzida mecanicamente a partículas que são peneiradas e classificadas de acordo com sua granulometria.

3.3 Procedimentos experimentais

3.3.1 Análise granulométrica dos fluxos

A análise granulométrica dos fluxos foi realizada através de um ensaio para determinação da granulometria, conforme norma ABNT NBR NM 248/2003. As peneiras foram encaixadas no agitador mecânico de peneiras, formando um único conjunto de peneiras, com abertura de malha em ordem crescente da base para o topo.

Foram utilizadas peneiras padrão Mesh Tyler, com abertura de 2,36 a 0,212 mm, durante 15 minutos ininterruptos, sendo este tempo programado automaticamente no equipamento. A remoção do material retido nas malhas foi feita com o uso de pincel de cerdas macias e depois separados para determinação da massa retida nas peneiras.

Na fase preliminar foi realizado inicialmente o ensaio do Fluxo C para verificar sua distribuição granulométrica e obter um referencial para o Fluxo I.

Depois de serem moídos, no moinho de bola, os revestimentos dos eletrodos poliméricos foram submetidos ao mesmo processo do Fluxo C, para determinação da composição granulométrica do Fluxo I. A pesagem da quantidade de material retido nas malhas foi feita em uma balança de precisão marca Marte, modelo AS1000C, com capacidade de 1000g e precisão de 0,01g. Na FIG. 3.11 mostra-se o fluxo retido, após o peneiramento realizado no ensaio de granulometria.



Figura 3.11 – Fluxo retido após o peneiramento.

Os fluxos utilizados nos testes definitivos também foram separados por análise granulométrica, na empresa ESAB S/A, em peneiras Mesh Tyler, com malhas de abertura de 1,40 a 0,30 mm, de acordo com o padrão de procedimento da empresa.

3.3.2 Procedimento de soldagem

Para definir os parâmetros iniciais de soldagem, foram realizados testes iniciais através de deposições experimentais com o Fluxo C a partir de valores de referência utilizados em trabalhos anteriores, levando em consideração o aspecto visual dos cordões de solda (BAMANKAR, 2013; JAISWAL, 2013; KARADENIZ, 2007).

Nos testes preliminares o Fluxo C foi ressecado por um período de duas horas à temperatura de 270 °C antes de sua utilização, a fim de eliminar os efeitos da umidade. Para o Fluxo I a ressecagem não foi feita, considerando a impermeabilidade do polímero. Da mesma forma, nos testes definitivos, o Fluxo S foi ressecado antes de sua utilização, procedimento não adotado para aplicação dos Fluxos P.

Nas deposições realizadas nos testes preliminares foram aplicadas diferentes energias de soldagem, usando sempre as mesmas condições de soldagem na aplicação dos diferentes fluxos. Os experimentos foram divididos em dois grupos de acordo com o stickout, de 12 e 18 mm, utilizando tensões de 24, 28 e 32V, sendo mantidas inalteradas as velocidades de soldagem e de alimentação do arame.

Os cordões de solda foram identificados através de codificação alfanumérica, sendo o Fluxo I identificado pela letra “i” e o Fluxo C pela letra “c”, antecedidas por uma numeração indicando que foram realizados sob as mesmas condições de soldagem, ou seja, os experimentos 1i e 1c se referem ao experimento 1, submetidos às mesmas condições de soldagem, e assim sucessivamente.

No caso dos cordões depositados nos testes definitivos, foi utilizado o mesmo sistema de identificação, porém adotaram-se as letras “s”, “p5” e “p10”, se referindo aos Fluxos S, P5 e P10, respectivamente.

3.3.3 Ensaio metalográfico

Foi realizada análise metalográfica qualitativa macro e microestrutural, nos corpos de provas das soldagens realizadas. As amostras, retiradas em cortes transversais na região central do cordão de solda com uso de disco de corte metalográfico, foram embutidas a quente com baquelite em uma prensa de embutimento Arotec PRE 40. As amostras foram lixadas manualmente, com giro de 90 graus na mudança para a lixa subsequente, utilizando lixas 120, 240, 320, 400, 600, 1000 e 1200, sendo depois polidas com um pano de polimento e alumina de 1µm, procedimentos estes realizados em uma politriz lixadeira metalográfica Teclago PL02E. Além disso, para revelar as microestruturas, as amostras foram atacadas com reagente Nital 2%.

As amostras foram retiradas com cortes transversais realizados no início (I) e no final (F) do cordão de solda, conforme apresentado na FIG. 3.12.

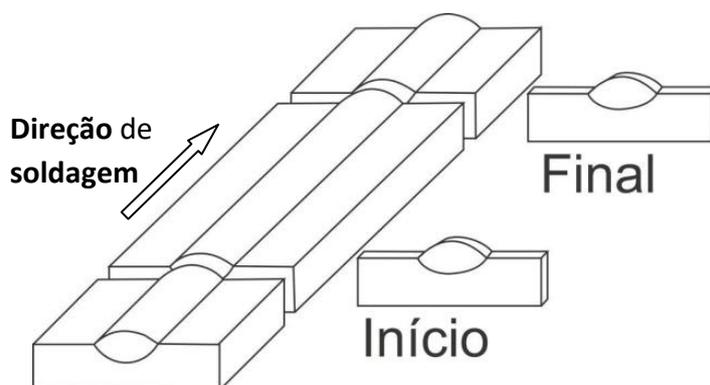


Fig. 3.12 – Esquema de cortes transversais no cordão de solda.

Através das macrografias obtidas e com o auxílio do software Image J foram feitas medições na seção transversal dos metais de solda, a fim de determinar a penetração, a largura e o reforço do cordão, de acordo com o esquema de medição apresentado na FIG. 3.13. Além disto, mediram-se as áreas da seção transversal dos metais de solda para cálculo da diluição.

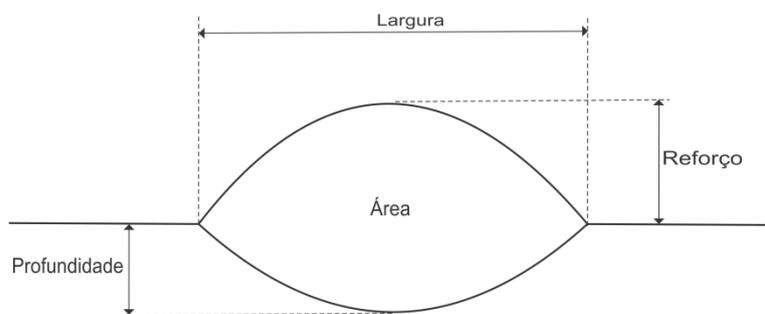


Fig. 3.13 – Esquema de medição da morfologia do metal de solda.

A análise das imagens metalográficas das macro e microestruturas foi feita a partir de um microscópio óptico marca Olympus, modelo BX60M, com capacidade de ampliação de até 1000X, apresentado na FIG. 3.14. Para identificar os constituintes presentes na microestrutura, as imagens tiveram aumento de 100X, 200X e 500X.

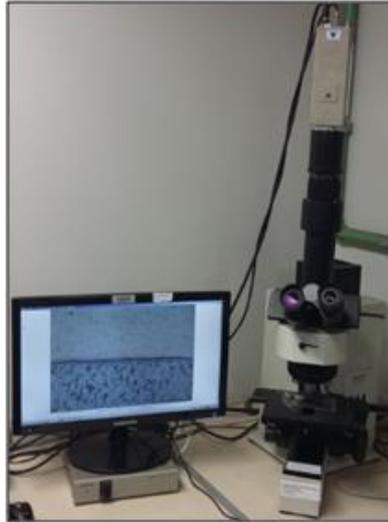


FIG. 3.14 – Microscópio óptico Olympus BX60M.

3.3.4 Ensaio de microdureza

O ensaio de microdureza foi feito ao longo da seção transversal dos cordões de solda, aplicando uma carga de 100 gf em pontos equidistantes, com tempo de indentação de 15 segundos em um microdurômetro Shimatzu HMV-2T, que é apresentado na FIG. 3.15.



Figura 3.15 – Microdurômetro.

As medições foram realizadas nos corpos de prova, nas regiões do metal de base, zona fundida e zona termicamente afetada, de acordo com o esquema de medição das microdurezas apresentado na FIG. 3.16, respeitando uma distância mínima de 2,5 vezes a diagonal média entre indentações, conforme a norma ASTM E 384.

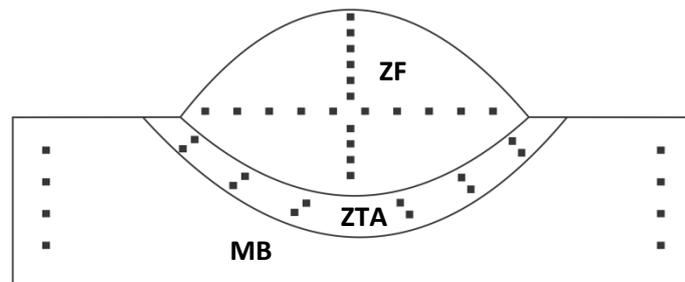


Figura 3.16 – Esquema de medição das microdurezas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Características granulométricas dos fluxos de soldagem

4.1.1 Testes preliminares

Na FIG. 4.1 apresenta-se a distribuição granulométrica dos Fluxos C e I, onde se observa a maior quantidade de partículas finas, apresentada pelo Fluxo I.

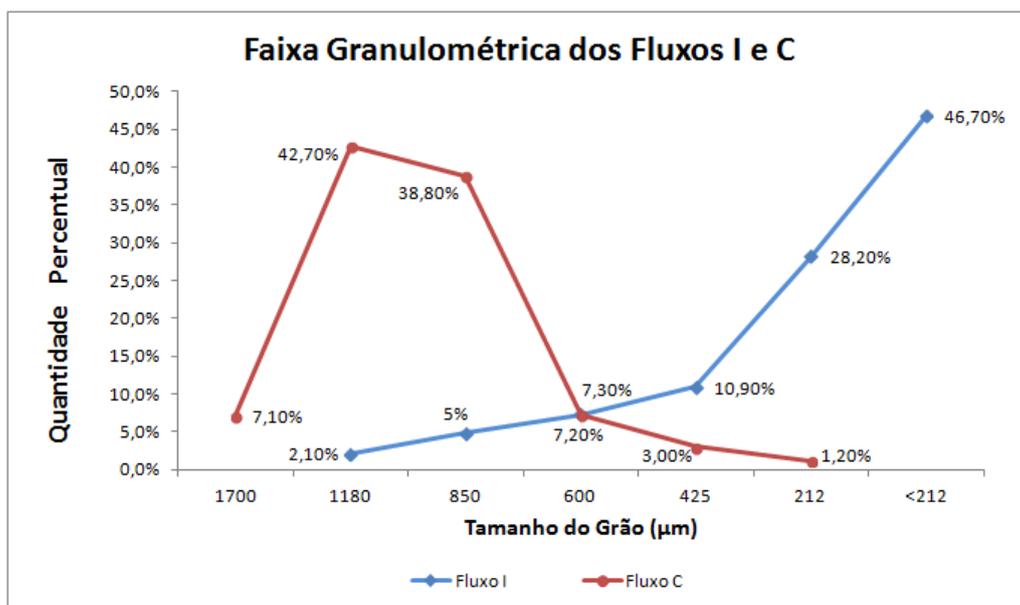


Figura 4.1 – Granulometria média dos Fluxos I e C.

Durante os testes com os fluxos no silo de armazenamento do dispositivo de soldagem, o Fluxo I apresentou dificuldades no escoamento para a zona de soldagem, enquanto o Fluxo C escoou livremente. Considerando a grande quantidade de partículas finas apresentadas pelo Fluxo I, um novo ensaio granulométrico foi realizado a fim de separar apenas as partículas retidas nas malhas com abertura de 0,425 a 1,18 mm, com intuito de melhorar sua escoabilidade.

Após esta separação, foram feitos novos testes de escoamento, porém não houve êxito, visto que o fluxo não escoou, ficando retido no silo mesmo utilizando partículas maiores nos testes. Na FIG. 4.2 mostra-se a distribuição granulométrica do Fluxo I antes e depois de serem separados.

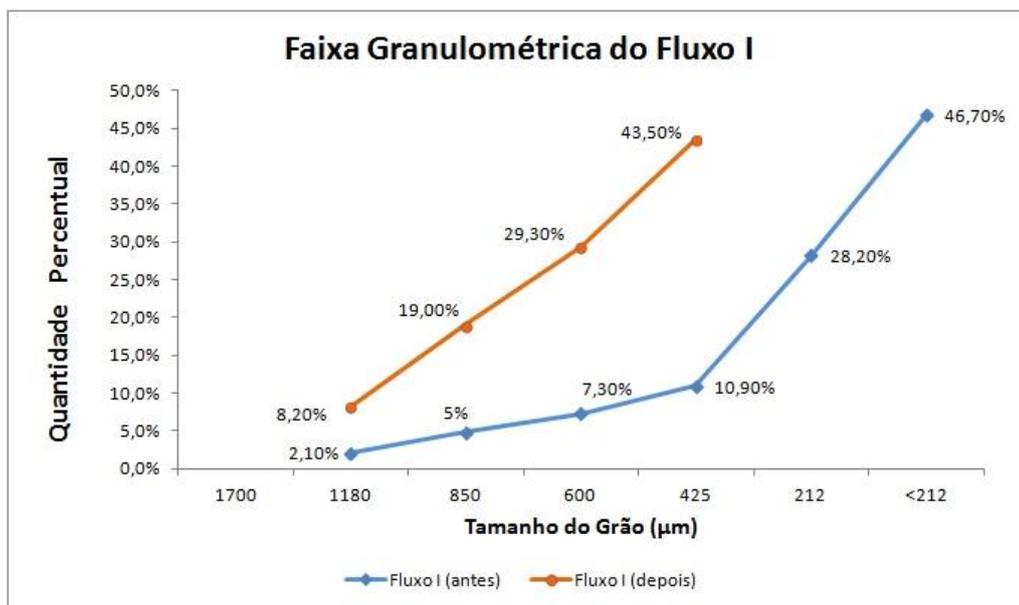


Figura 4.2 – Distribuição granulométrica Fluxos I antes e depois de separados.

Considerando os estudos realizados por Bodhmagé (2006) e Campos (2012) foram constatados dois problemas diretamente relacionados às características observadas no uso do Fluxo I: o tamanho e o formato das partículas. O tamanho influencia diretamente no escoamento, uma vez que partículas menores geralmente apresentam maior dificuldade em escoar. Quanto ao formato das partículas, divididas em esféricas, irregulares e flocos, se constatou que mesmo apresentando distribuições granulométricas semelhantes, elas possuem diferentes condições de escoamento, sendo que quanto mais a partícula se desvia do formato esférico maior a dificuldade em escoar. Além disto, partículas mais finas e alongadas também dificultam o escoamento.

Ao analisar a escoabilidade do Fluxo I, foi constatado que por apresentar um formato irregular e alongado, efeitos da característica fibrosa do polímero, houve dificuldade no escoamento das partículas, diferentemente do Fluxo C que escoou livremente, por apresentar um aspecto visual mais próximo do formato esférico. Na FIG. 4.3 mostra-se o aspecto visual dos Fluxos I e C.

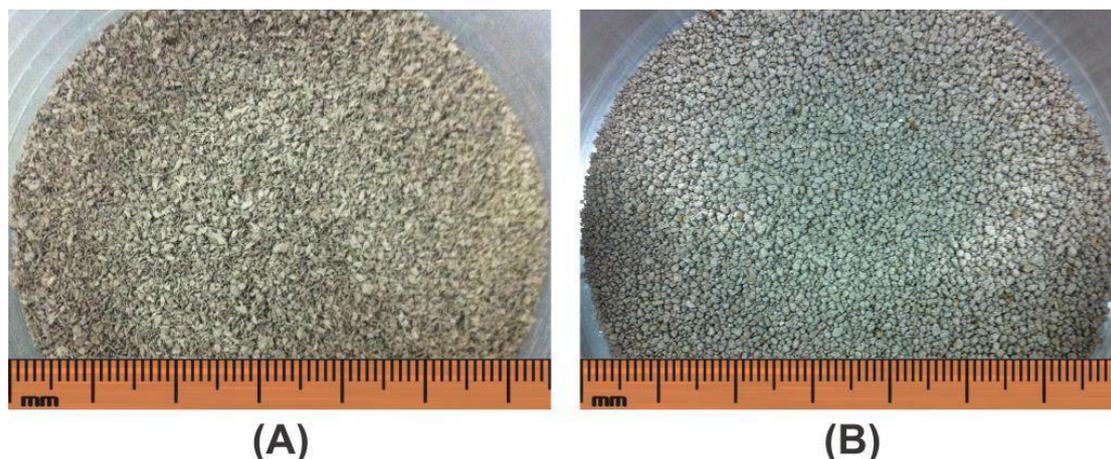


Figura 4.3 – Aspecto visual do Fluxo I (A) e do Fluxo C (B).

Além disto, a grande quantidade de grãos finos também foi considerada um fator de impacto em seu escoamento, pela obstrução em abóboda, com a formação de um arco na saída do silo de armazenamento, impedindo assim a deposição do fluxo por gravidade para a zona de soldagem, conforme apresentado na FIG. 4.4.

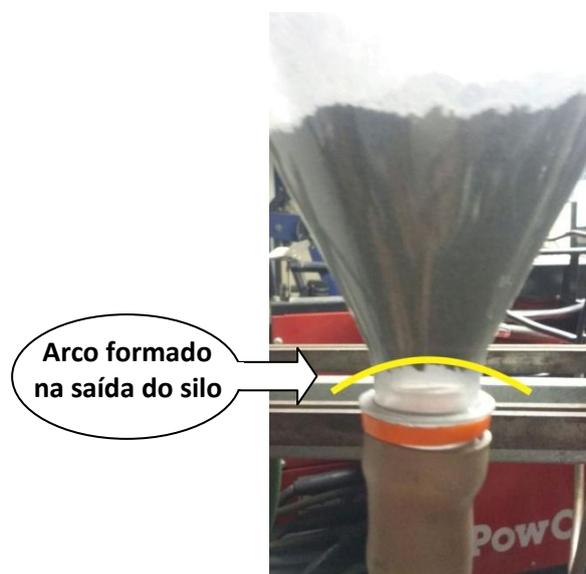


Figura 4.4 – Obstrução em abóboda observada no Fluxo I.

A partir da constatação do problema no escoamento, foi adicionado um ligante, silicato de sódio, à composição do Fluxo I a fim de modificar sua característica quanto ao formato de grãos, com objetivo de proporcionar o escoamento do fluxo para a zona de soldagem. A FIG. 4.5 apresenta-se o aspecto visual do Fluxo I, com adição de percentuais de 15% e 20% de $\text{Na}_2\text{O}_3\text{Si}$, respectivamente.

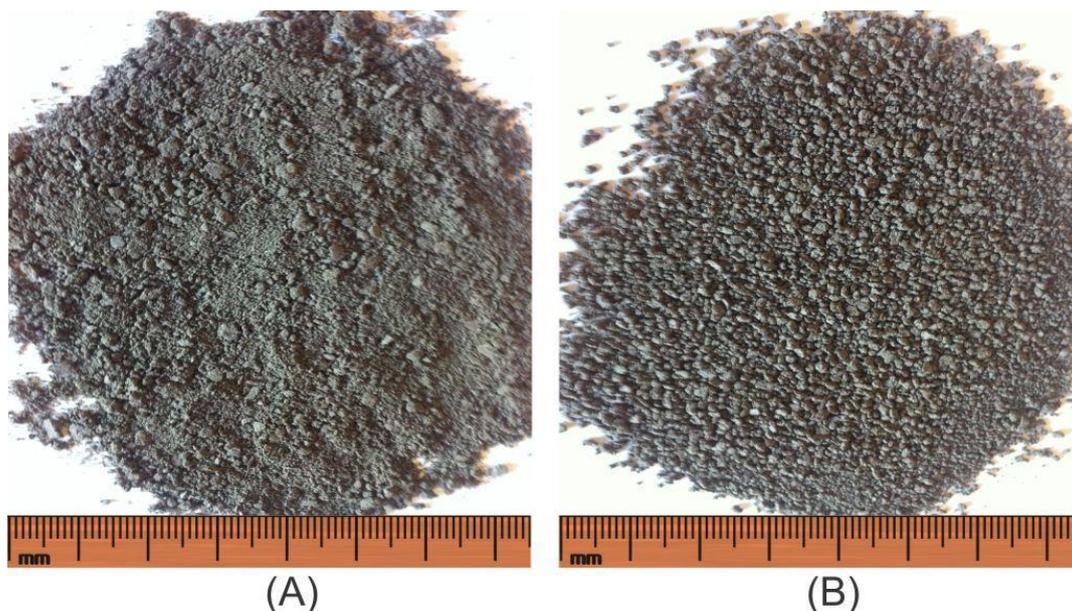


Figura 4.5 – Aspecto visual do Fluxo I: adição de 15% (A) e 20% (B) de $\text{Na}_2\text{O}_3\text{Si}$.

Foi verificado que o fluxo resultante da mistura com 20% de silicato de sódio apresentou aparência mais próxima do formato esférico e menor quantidade de grãos finos, comparado ao fluxo com 15% do ligante.

Na FIG. 4.6 mostra-se um gráfico comparativo da distribuição granulométrica do Fluxo I, antes e após a adição de silicato de sódio, onde é possível observar o aumento no tamanho das partículas.

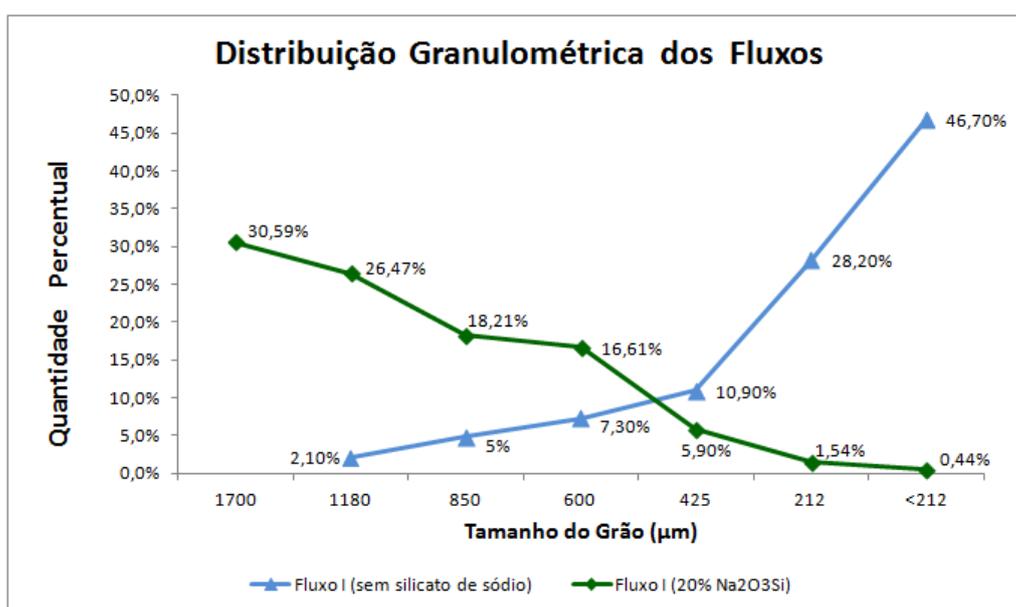


Figura 4.6 – Granulometria do Fluxo I antes e após a adição de $\text{Na}_2\text{O}_3\text{Si}$.

Na FIG. 4.7 apresenta-se o aspecto visual dos Fluxos C e I (20% $\text{Na}_2\text{O}_3\text{Si}$) e na FIG. 4.8 compara-se a distribuição granulométrica destes fluxos.

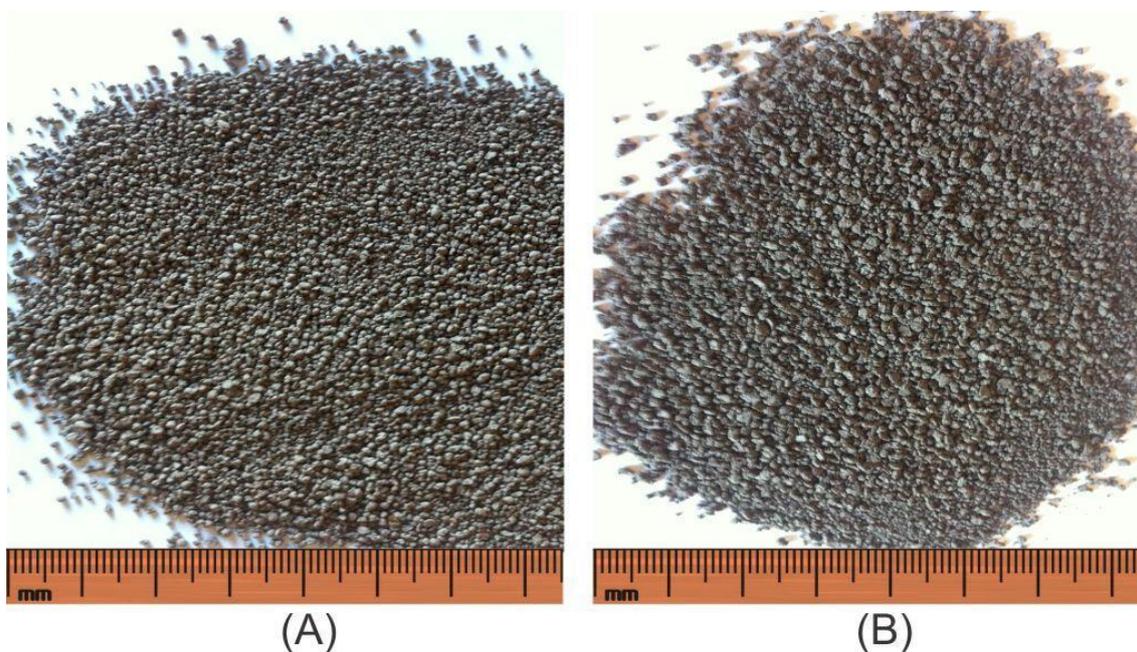


Figura 4.7 – Aspecto visual do Fluxo C (A) e do Fluxo I (B).

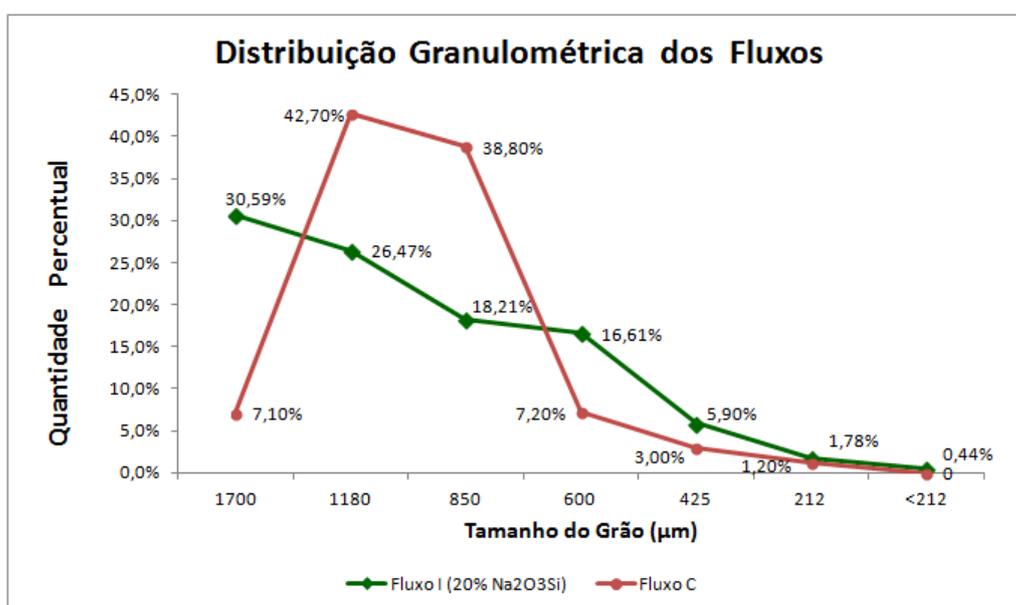


Figura 4.8 – Granulometria média do Fluxo I (20% $\text{Na}_2\text{O}_3\text{Si}$) e do Fluxo C.

É possível verificar, na Figura 4.7, a melhoria no aspecto do Fluxo I que apresentou um formato mais próximo do esférico, após a adição do ligante. Observando a distribuição granulométrica mostrada na Figura 4.8 se verifica também que o Fluxo I não apresentou mais a predominância de grãos finos.

É importante ressaltar que o fato do Fluxo I ter obtido grãos mais próximos do formato esférico, o problema de seu escoamento para a zona de soldagem foi eliminado. Além disto, observando a quantidade de massa retida na análise granulométrica, onde cerca de 90% dos grãos possuem tamanho superior a 425 μm , é possível evidenciar, também, que o Fluxo I e o Fluxo C se equivalem neste aspecto.

4.1.2 Testes definitivos

4.1.2.1 Fluxo com polímero

Inicialmente foi realizada a mistura do polímero ao pó de fluxo, observando o percentual adicionado, a fim de verificar a possibilidade de aglomerar o fluxo e obter a formação de grãos utilizando apenas o polímero na mistura. Na TAB. 4.1 apresenta-se a quantidade de polímero utilizada na mistura com o pó de fluxo.

Tabela 4.1 – Relação Polímero x Pó de fluxo (% em peso)

Pó de fluxo (g)	Polímero	Aglomerou?	Granulou?
2000	5%	Não	Não
2000	10%	Não	Não
2000	15%	Não	Não
2000	20%	Não	Não
2000	25%	Sim	Não
2500	20%	-	Não

Foi observado que o fluxo aglomerou após adicionar 25% de polímero à mistura, porém constatou-se que utilizando somente o polímero na mistura o fluxo não obteve a forma granulada. Na FIG. 4.9 apresenta-se o aspecto visual do fluxo, utilizando apenas o polímero como aglomerante.



Figura 4.9 – Aspecto visual do fluxo aglomerado com polímero.

A partir desta evidência o uso dos percentuais com 10% e 20% de polímero na produção do fluxo, utilizando somente o polímero como aglomerante, foi descartado por não haver se granulado. Desta forma, esta composição se mostrou inadequada para produção de fluxo de soldagem com arco submerso, pelos problemas já apresentados pelo Fluxo I quanto ao escoamento por gravidade para a zona de soldagem.

4.1.2.2 Fluxos P5 e P10

Na FIG. 4.10 apresenta-se o aspecto visual dos Fluxos S, P5 e P10, onde se observa a aparência visual similar dos fluxos produzidos.

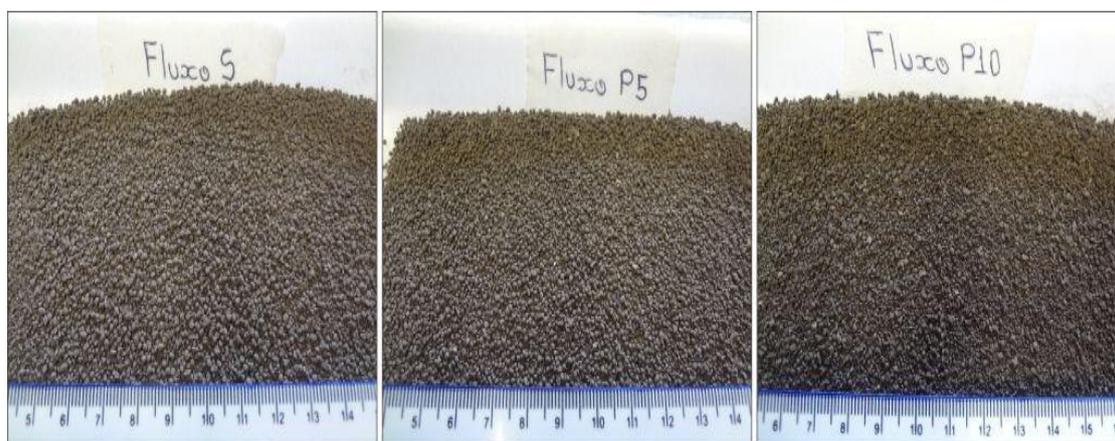


Figura 4.10 – Aspecto visual dos Fluxos S, P5 e P10

Na FIG. 4.11 a granulometria média dos Fluxos P5 e P10, após os ensaios de granulometria.

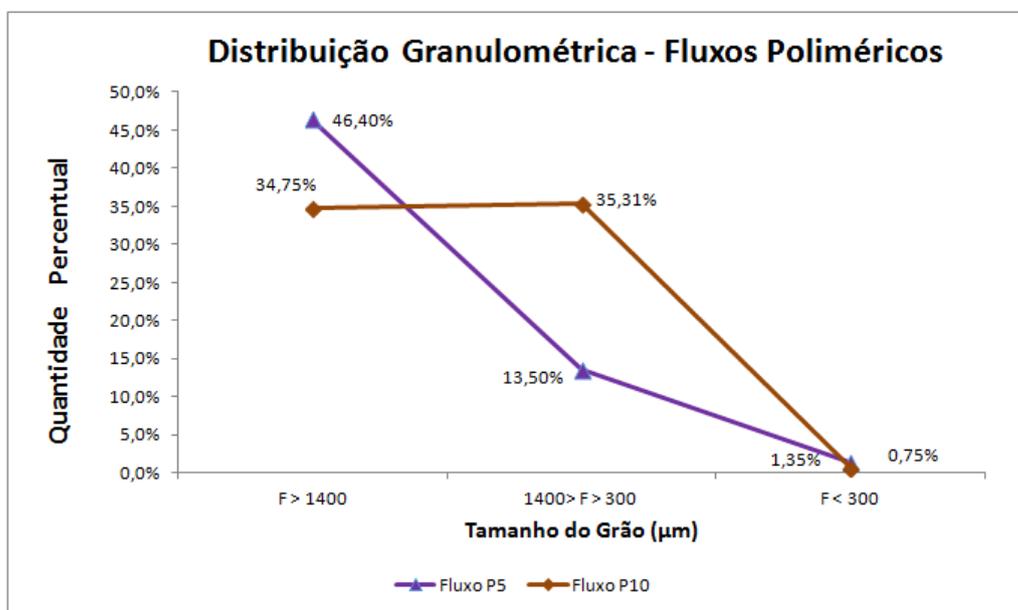


Figura 4.11 – Granulometria média dos Fluxos P5 e P10.

De acordo com as normas do fabricante, as partículas do fluxo adequadas para utilização no processo SAW estão compreendidas entre as malhas padrão Mesh Tyler 12 e 48, com partículas de tamanho entre 1,40 mm e 0,30 mm, sendo assim, as partículas consideradas inadequadas para utilização foram descartadas nas soldagens.

Através da Figura 4.11 é possível verificar que, em princípio, o Fluxo P10 apresentou maior vantagem quanto à produção, uma vez que a quantidade de fluxos adequados ao processo SAW foi bem superior, comparada à produção do Fluxo P5. Além disto, pode-se verificar pela Tabela 3.8 que houve uma redução em torno de 27% na quantidade de silicato utilizado na produção deste fluxo, comparado ao Fluxo S.

Os testes de escoamento, realizados no dispositivo fabricado, indicaram que os fluxos P5 e P10 se mostraram adequados à utilização nas soldagens com arco submerso, quanto à deposição, visto que não houve problemas no escoamento do fluxo por gravidade para a zona de soldagem.

4.2 Avaliação dos cordões de solda depositados

4.2.1 Testes preliminares

4.2.1.1 Avaliação das soldagens realizadas com os Fluxos C e I

Na TAB. 4.2 apresentam-se os parâmetros utilizados com Fluxos C e I.

Tabela 4.2 – Parâmetros de soldagem - testes preliminares ($v = 53$ cm/min e vel. alim. = 7 m/min).

Stickout (mm)	Tensão Ref. (V)	Tensão Saída (V)	Experimento	Corrente (A)	H (kJ/cm)
18 mm	24,0	26,4	1c	198	5,23
		26,2	1i	204	5,38
	28,0	29,3	2c	205	6,04
		29,2	2i	210	6,19
	31,0	32,5	3c	211	6,91
		32,5	3i	216	7,08
12 mm	31,0	31,8	4c	230	7,55
		31,7	4i	235	7,72
	24,0	25,8	5c	221	5,83
		25,5	5i	227	5,99
	28,0	28,7	6c	226	6,65
		28,7	6i	231	6,81

Nas FIG. 4.12 e 4.13 apresenta-se o aspecto visual dos cordões de solda depositados nas soldagens realizadas com os Fluxos I e C.



Figura 4.12 – Cordões de solda com stickout de 18 mm.

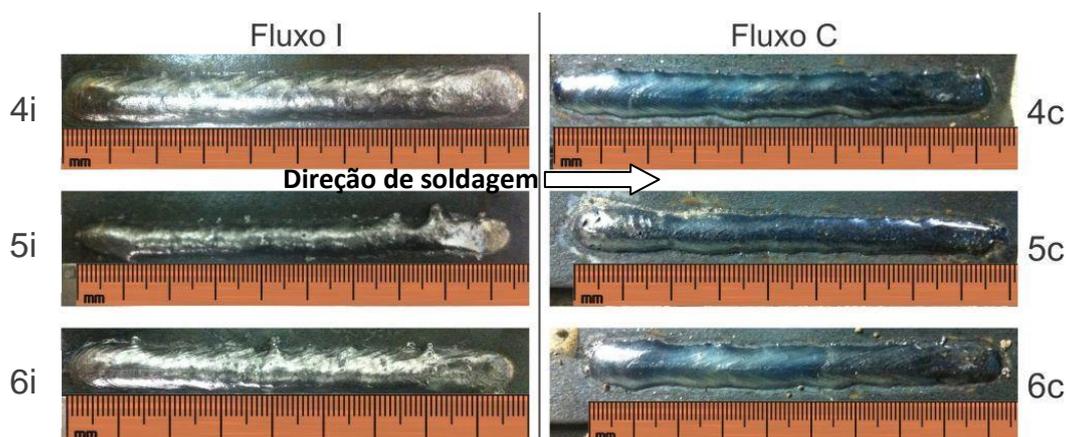


Figura 4.13 – Cordões de solda com stickout de 12 mm.

De acordo com Marques (2008), um dos maiores problemas enfrentados no uso dos fluxos aglomerados está em sua propriedade higroscópica fazendo com que haja cuidados especiais antes de sua utilização, devendo ser mantidos a temperaturas controladas, isentos de umidade. Para eliminar os efeitos da umidade na soldagem, como porosidade ou trincas por hidrogênio, eles devem ser ressecados antes de sua aplicação (PARANHOS, 1999).

Após inspeção visual, verificou-se que as soldas resultantes da aplicação do Fluxo I não apresentaram porosidades ou trincas causadas pelos efeitos da umidade, mesmo utilizando este fluxo sem ressecagem depois de mantido em temperatura ambiente por um período superior a 30 dias antes de seu uso.

A partir desta constatação foram realizadas novas soldagens aplicando os Fluxos C e I sem ressecagem, utilizando os parâmetros dos experimentos 2 e 6 mostrados na Tabela 4.5, a fim de verificar possíveis efeitos de umidade. Na FIG. 4.14 apresentam-se os novos cordões de solda depositados com o Fluxo I e na FIG. 4.15 são apresentados os cordões depositados com o Fluxo C, onde, em ambos os casos, os fluxos foram utilizados sem ressecagem.



Figura 4.14 – Solda sem porosidade – Fluxo I: stickout de 18 mm (A) e 12 mm (B).



Figura 4.15 – Solda com porosidade – Fluxo C: stickout de 18 mm (A) e 12 mm (B).

É possível observar, pelas Figuras 4.14 e 4.15, que as novas soldagens realizadas com o Fluxo C apresentaram porosidades superficiais, o que não aconteceu nas deposições realizadas com o Fluxo I. Tal resultado indica a hidrofobicidade do Fluxo I, assim como evidenciado por Vaz (2010) em seu estudo com os eletrodos impermeáveis. No entanto, é necessário um estudo específico para tal ocorrência a fim de verificar o efeito do polímero na hidrofobicidade obtida pelo fluxo.

4.2.2 Testes definitivos

4.2.2.1 Avaliação das soldas realizadas com os Fluxos P e S

As soldagens realizadas nos testes definitivos foram depositadas com stickout de 18 mm, além dos demais parâmetros apresentados na TAB. 4.3.

Tabela 4.3 – Parâmetros de soldagem testes definitivos ($v = 53$ cm/min. e Vel. Alim: 7 m/ min.).

Tensão Ref. (V)	Experimento	Tensão Saída (V)	Corrente (A)	H (kJ/cm)
26,0	1s	27,8	218	6,17
	1p5	28,2	213	6,12
	1p10	28,5	213	6,19
32,0	2s	32,8	217	7,25
	2p5	32,9	215	7,21
	2p10	32,9	213	7,14

Na FIG. 4.16 apresenta-se o aspecto visual dos cordões de solda resultantes da aplicação dos Fluxos S, P5 e P10 nas soldagens, após a remoção da escória.

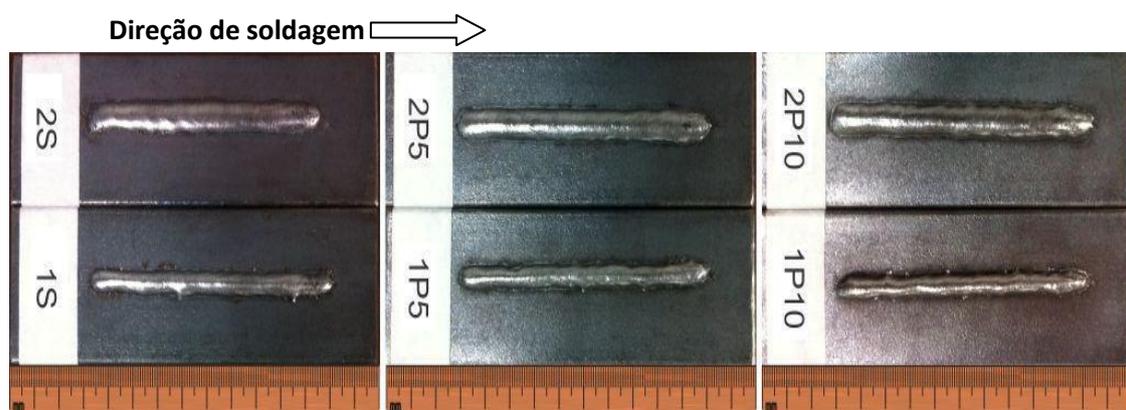


Figura 4.16 – Cordões de solda – testes definitivos

Observando a Figura 4.16 é possível verificar, pelo aspecto visual, que não houve diferença significativa entre as soldagens realizadas, comparando os cordões de solda depositados sob as mesmas condições de soldagem. O acabamento superficial se mostrou relativamente uniforme e não apresentou variação considerável ao longo da geometria dos cordões de solda. Foi verificado também que não houve dificuldade na remoção da escória resultante do processo, no entanto as soldas realizadas com tensão de 32V foram retiradas com maior facilidade. Além disto, através de inspeção visual, foi evidenciado que os cordões de solda não apresentaram porosidades ou trincas.

4.3 Macroestrutura dos metais de solda

4.3.1 Testes preliminares

Nas FIG. 4.17 e 4.18 apresentam-se os aspectos macrográficos da seção transversal dos metais de solda resultantes dos testes preliminares.

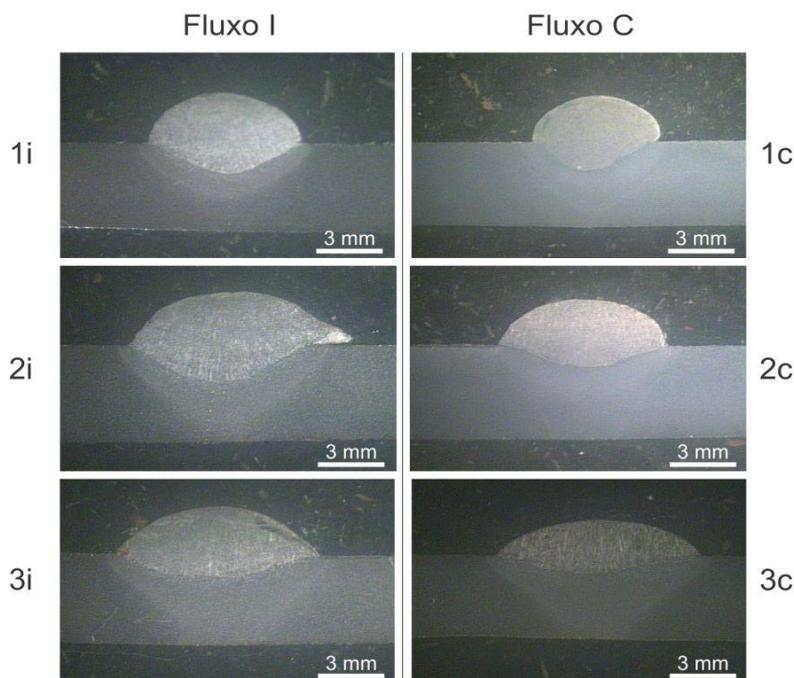


Figura 4.17 – Macrografia dos metais de solda: stickout de 18 mm.

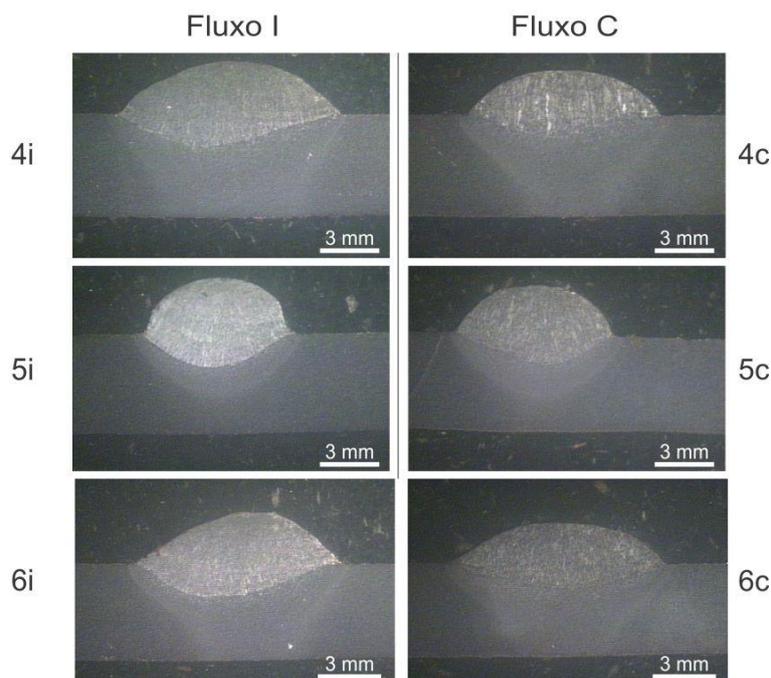


Figura 4.18 – Macrografia dos metais de solda: stickout de 12 mm.

Através das macrografias apresentadas nas Figuras 4.17 e 4.18 observa-se a ausência de descontinuidades nos cordões de solda depositados com os Fluxos I e C.

A partir destes resultados constatou-se que, considerando os aspectos visuais e macroestruturais, as soldas realizadas nos testes preliminares se mostraram satisfatórias. Com a adição do agente aglomerante à composição do Fluxo I, obtido a partir dos revestimentos dos eletrodos impermeáveis, foi possível realizar as soldagens com arco submerso, onde o escoamento do fluxo aconteceu por ação da gravidade para a zona de soldagem, através do dispositivo desenvolvido para adaptação da fonte GMAW ao processo SAW.

4.3.2 Testes definitivos

Nas FIG. 4.19 e 4.20 apresentam-se os aspectos macrográficos da seção transversal dos metais de solda resultantes das soldagens realizadas nos testes definitivos.

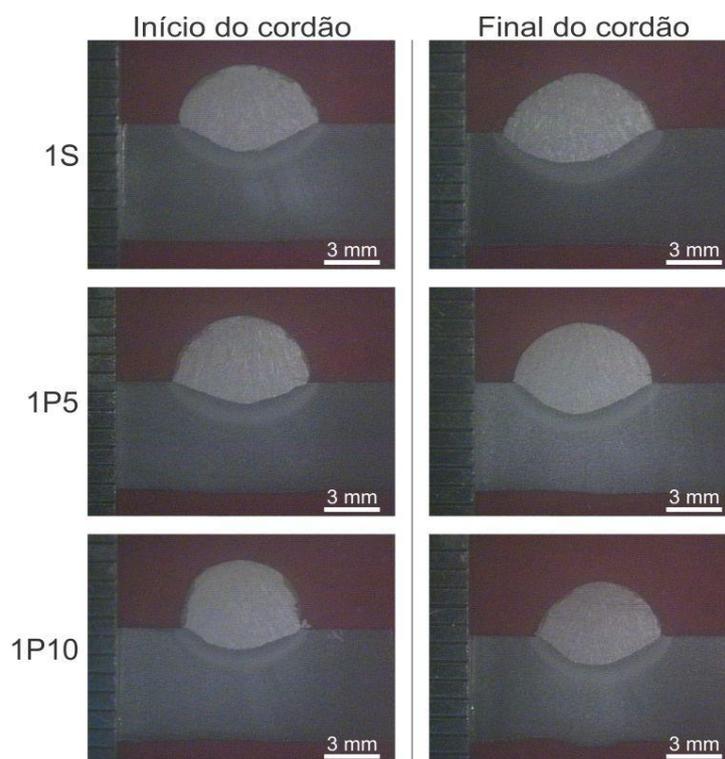


Figura 4.19 – Macrografia dos metais de solda: tensão de 26V.

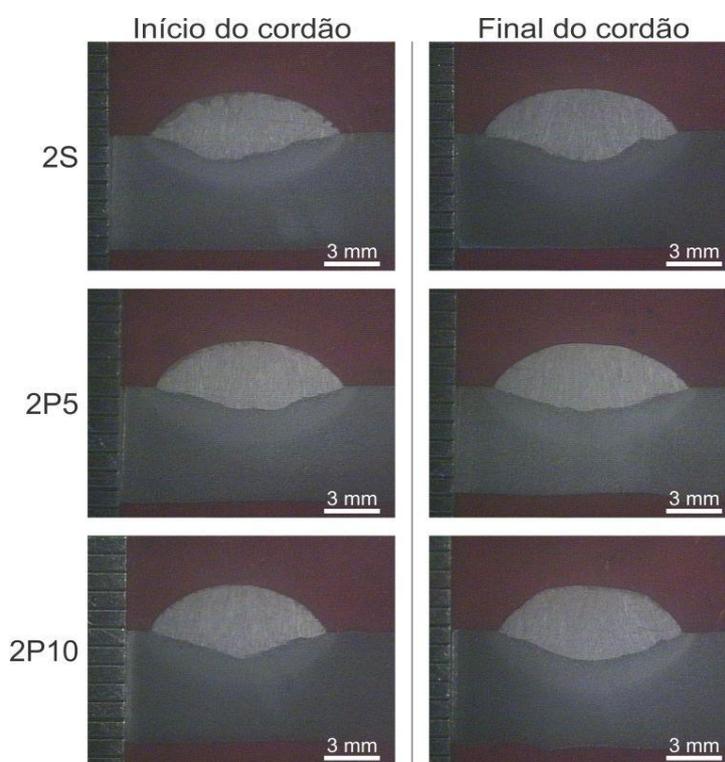


Figura 4.20 – Macrografia dos metais de solda: tensão de 32V.

Na TAB. 4.4 apresenta-se a morfologia dos metais de solda, com medições realizadas a partir da seção transversal das imagens macrográficas obtidas e também os valores da razão R/L (reforço/largura do cordão).

Tabela 4.4 – Morfologia dos cordões de solda – testes definitivos

Tensão (V)	Amostra	Corte da Amostra	L (mm)	P (mm)	R (mm)	R/L
26V	1s	I	7,6	1,2	3,3	0,43
		F	8,2	1,6	3,2	0,39
	1p5	I	7,6	1,1	3,6	0,47
		F	7,6	1,7	3,3	0,43
	1p10	I	7,0	1,1	3,8	0,54
		F	6,9	1,5	3,0	0,43
32V	2s	I	10,5	1,3	2,4	0,24
		F	10,5	1,5	2,5	0,24
	2p5	I	10,2	1,1	2,5	0,24
		F	10,5	1,2	2,4	0,23
	2p10	I	9,7	1,4	2,6	0,27
		F	10,1	1,5	2,5	0,25

Os resultados das medições realizadas na seção transversal dos metais de solda, com parâmetros similares, apontam que não houve variação significativa na morfologia, considerando as diferenças entre as medições realizadas no início (I) e as diferenças entre as medições realizadas no final (F) dos cordões de solda.

É possível observar que nos cordões depositados com maior valor de tensão, os valores obtidos na razão R/L (reforço/largura) dos metais de solda indicaram não haver grandes variações na comparação entre as soldagens depositadas com os diferentes fluxos de soldagem. Isto pode ser explicado tendo em vista que um aumento no valor da tensão de referência é acompanhado por um aumento na largura e diminuição na altura do reforço do cordão de solda, no entanto, quando a soldagem é depositada sobre chapa, o aumento da tensão de soldagem não afeta a penetração, fazendo com que a razão R/L diminua (SCOTTI, 2001; MARQUES, 2008).

Na TAB. 4.5 são apresentados os valores de diluição calculados de acordo com as medições realizadas na seção transversal dos metais de solda.

Tabela 4.5 – Diluição metais de solda – testes definitivos

Tensão (V)	Amostra	Corte da Amostra	AP (mm)	AR (mm)	AT (mm)	δ
26V	1s	I	6,8	19,2	26,0	26,3
		F	8,8	18,8	27,6	31,8
	1p5	I	5,0	20,7	25,8	19,6
		F	7,7	18,7	26,4	29,1
	1p10	I	4,5	20,1	24,7	18,4
		F	6,7	15,0	21,7	31,0
32V	2s	I	7,6	17,5	25,1	30,3
		F	8,8	18,7	27,5	32,0
	2p5	I	7,7	18,5	26,2	29,5
		F	8,6	18,1	26,7	32,1
	2p10	I	7,0	17,7	24,7	28,4
		F	9,5	18,9	28,4	33,5

Os valores indicam que também não houve grandes variações na diluição, com exceção dos valores das soldagens depositadas com tensão de 26V, nas medições realizadas nos cortes feitos no início do cordão onde geralmente o arco elétrico ainda não é estável. Nota-se, ainda, que nas soldagens onde se aplicou um maior valor de tensão, não houve variações significativas nos valores de diluição na comparação entre os diferentes fluxos de soldagem.

4.4 Microestrutura dos metais de solda

A identificação dos constituintes presentes na zona fundida (ZF) foi realizada por observação qualitativa das micrografias dos metais de solda, onde foram avaliadas as imagens metalográficas das soldagens realizadas nos testes definitivos.

4.4.1 Microestruturas dos cordões de solda depositados nos testes definitivos

Nas FIG. 4.21 e 4.22 apresentam-se as micrografias com imagens do topo, centro e raiz dos cordões depositados com tensão de 26V e 32V, respectivamente.

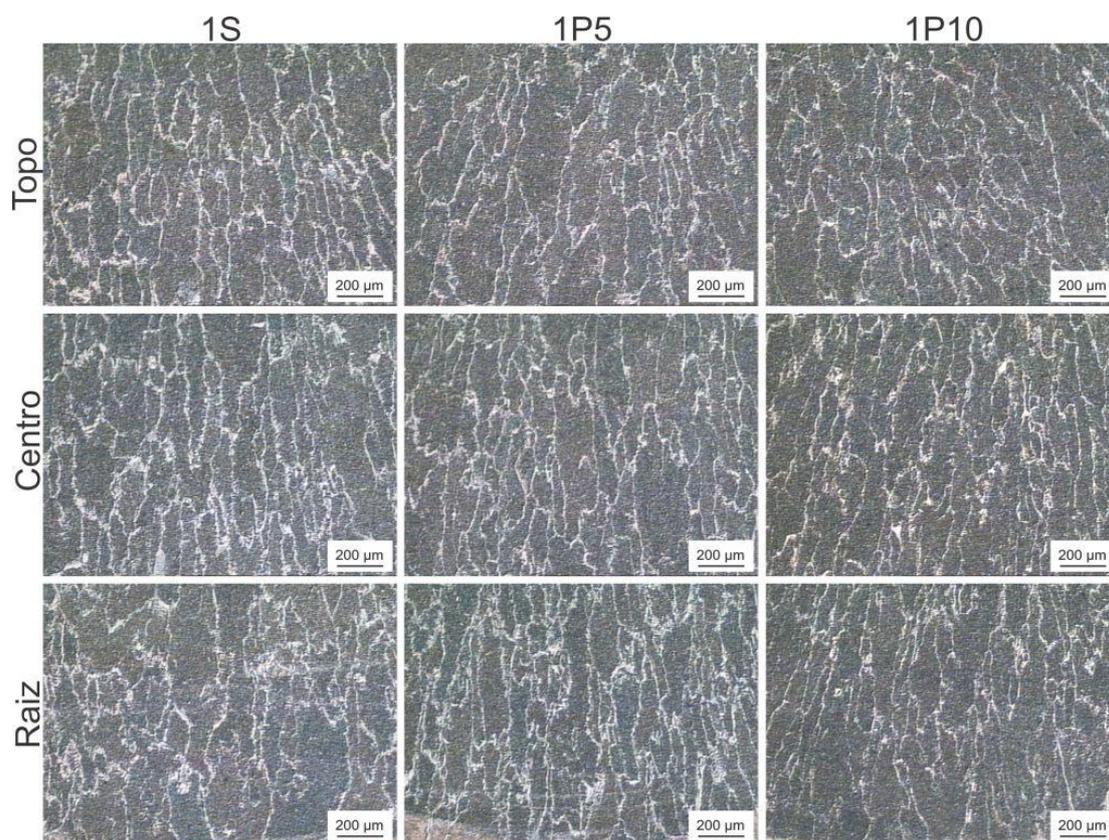


Figura 4.21 – Micrografia dos metais de solda – Tensão: 26V. Ampliação: 100X. Ataque: Nital 2%.

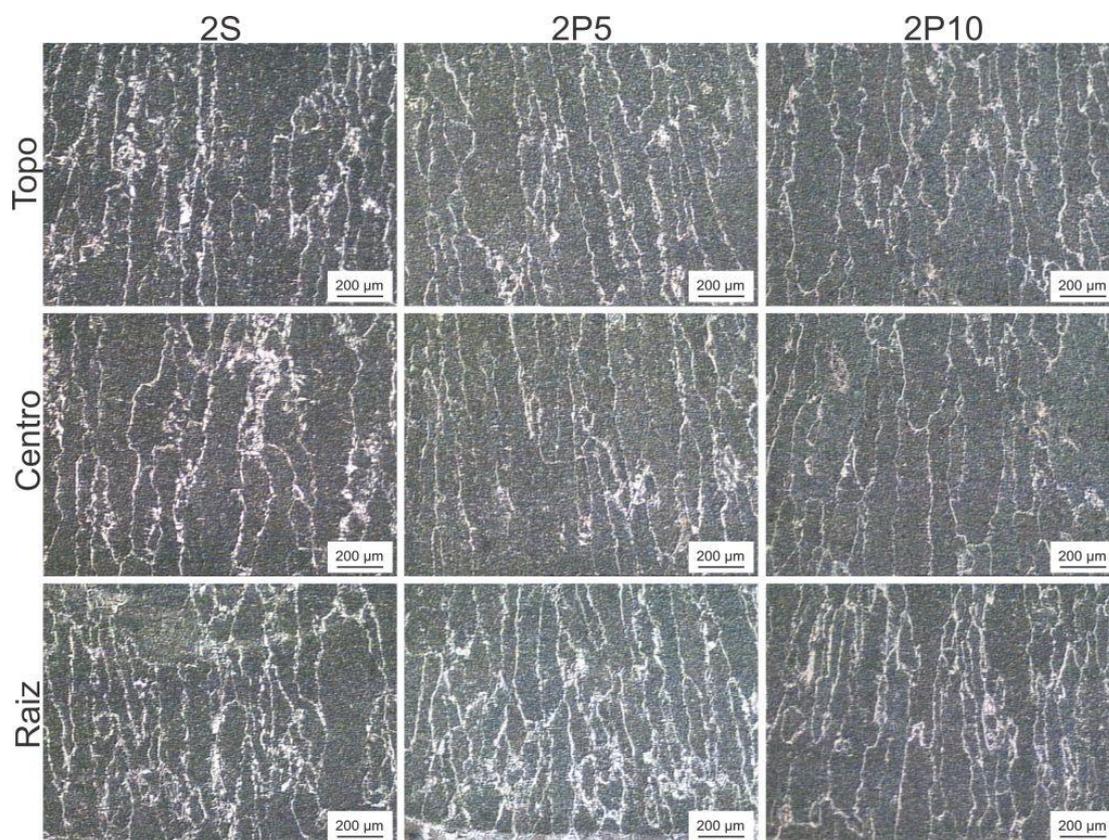


Figura 4.22 – Micrografia dos metais de solda – Tensão: 32V. Ampliação: 100X. Ataque: Nital 2%.

Mesmo sendo feito de forma qualitativa, na comparação microestrutural dos metais de solda depositados com os fluxos nos testes definitivos, apresentadas nas Figuras 4.21 e 4.22, é possível observar a diferença entre as microestruturas, indicando que há uma redução da ferrita de contorno de grão de acordo com o aumento do percentual de polímero na composição do fluxo. Tal fato pode ser verificado especialmente na região central do metal de solda, nas soldagens realizadas com tensão de 32V, na microestrutura dos cordões de solda depositados com o Fluxo P10.

4.4.2 Constituintes microestruturais da ZF dos cordões de solda – Fluxo S

Nas FIG. 4.23 e 4.24 apresentam-se as micrografias da ZF dos metais de solda depositados com o Fluxo S, com tensão de referência de 26V (1S) e 32V (2S).

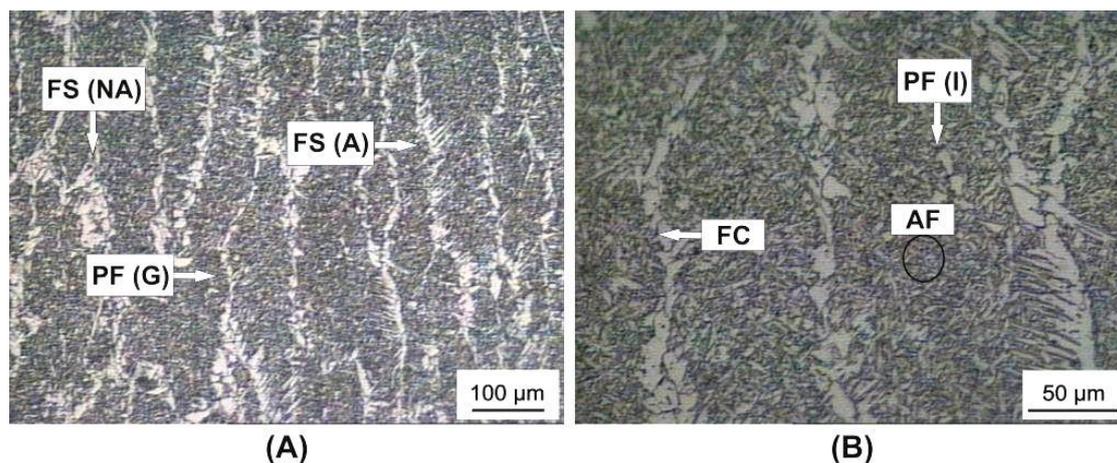


Figura 4.23 – Micrografia da ZF, Amostra 1S. Ampliação: 200X (A) e 500X (B). Ataque: Nital 2%.

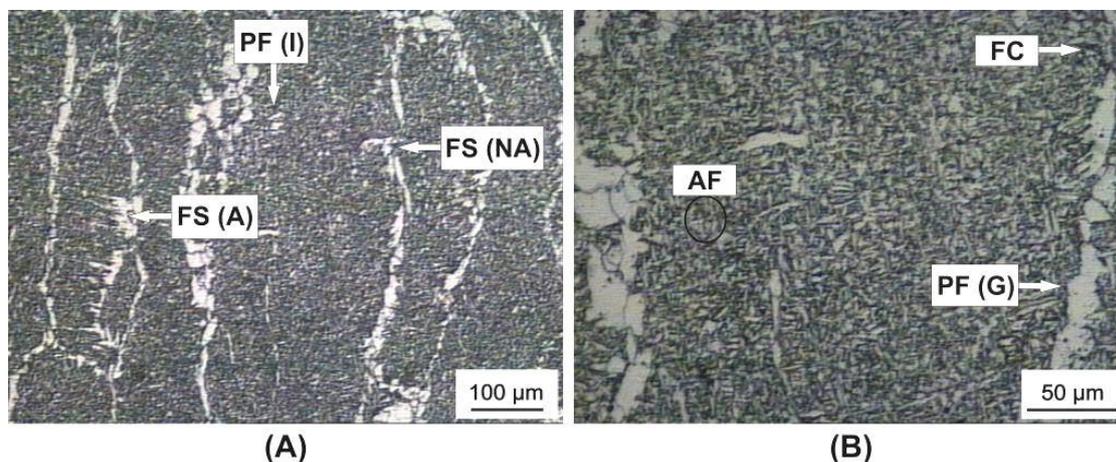


Figura 4.24 – Micrografia da ZF, Amostra 2S. Ampliação: 200X (A) e 500X (B). Ataque: Nital 2%.

Nas Figuras 4.23 e 4.24 observa-se que os metais de solda depositados com o Fluxo S apresentaram microestrutura constituída por Ferrita Acicular (AF), Ferrita Primária (PF), Ferrita com Segunda Fase (FS) e Agregado Ferrita Carboneto (FC). Apesar de indicar haver quantidade considerável de ferrita acicular, a microestrutura do metal de solda indica, também, quantidade expressiva de ferrita com segunda fase.

4.4.3 Constituintes microestruturais da ZF dos cordões de solda – Fluxo P5

Nas FIG. 4.25 e 4.26 apresentam-se as micrografias da ZF dos metais de solda depositados com o Fluxo P5, com tensão de referência de 26V (1P5) e 32V (2P5).

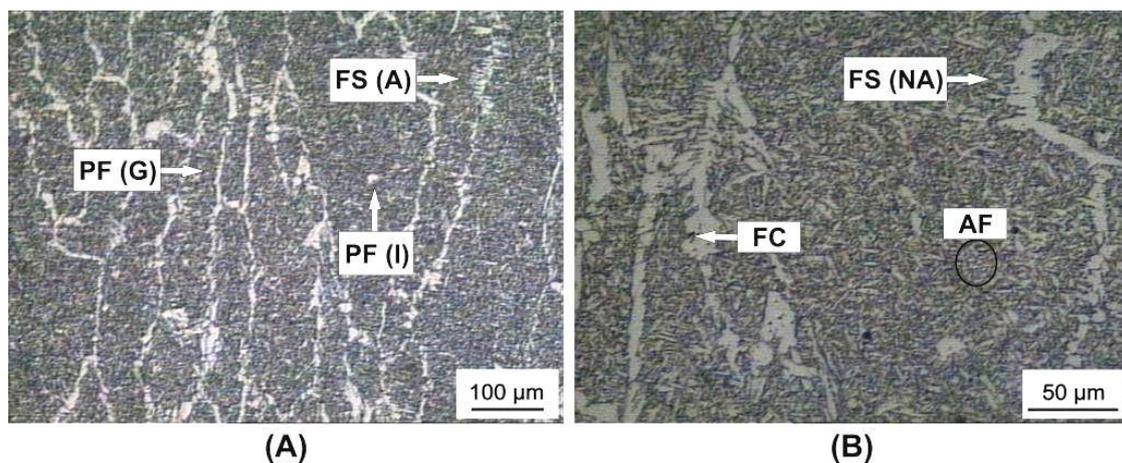


Figura 4.25 – Micrografia da ZF, Amostra 1P5. Ampliação: 200X (A) e 500X (B). Ataque: Nital 2%.

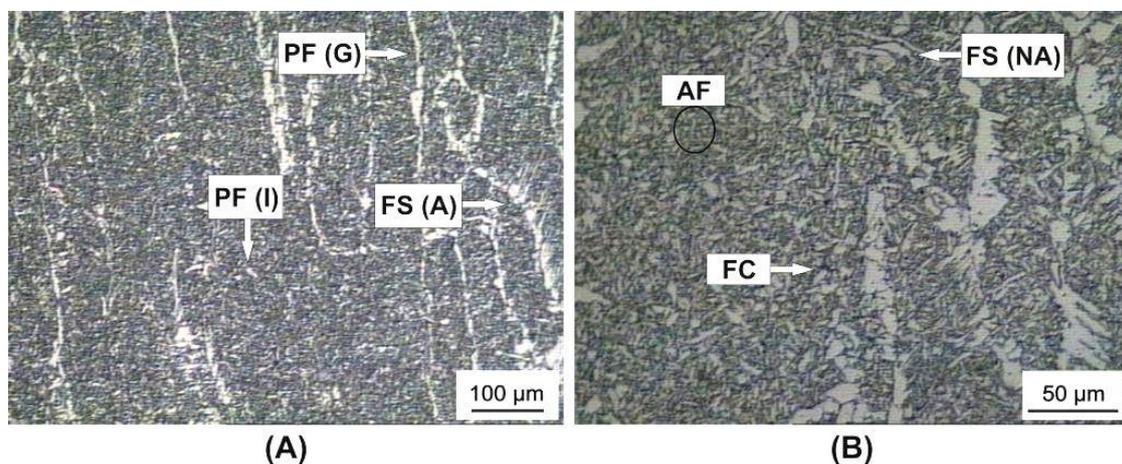


Figura 4.26 – Micrografia da ZF, Amostra 2P5. Ampliação: 200X (A) e 500X (B). Ataque: Nital 2%.

As microestruturas das deposições realizadas com o Fluxo P5 indicam haver grande quantidade de ferrita acicular na ZF. Além disto, comparada à microestrutura apresentada na deposição com o Fluxo S, é possível observar menor concentração de ferrita com segunda fase, na microestrutura do Fluxo P5.

4.4.4 Constituintes microestruturais da ZF dos cordões de solda – Fluxo P10

Nas FIG. 4.27 e 4.28 mostram-se as micrografias da ZF dos metais de solda depositados com o Fluxo P10, com tensão de referência de 26V (1P10) e 32V (2P10).

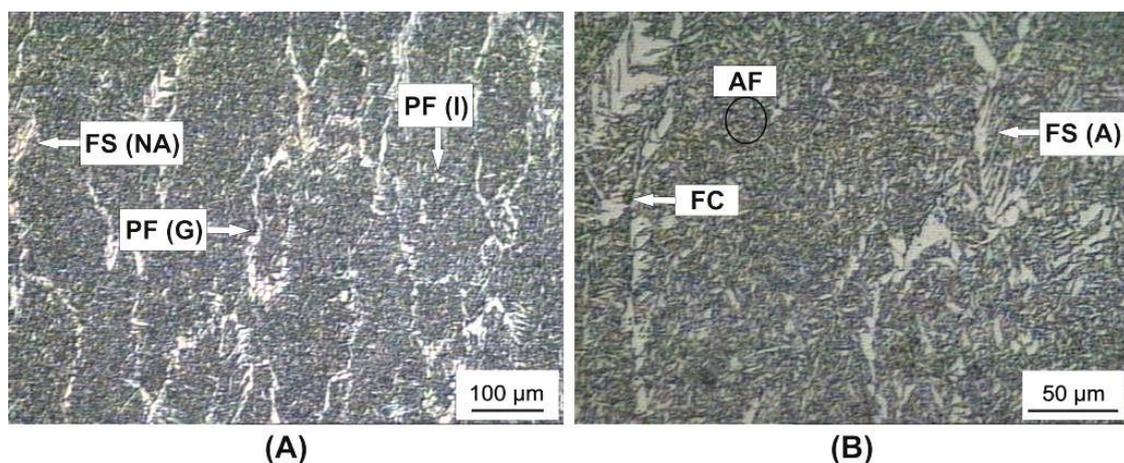


Figura 4.27 – Micrografia da ZF, Amostra 1P10. Ampliação: 200X (A) e 500X (B). Ataque: Nital 2%.

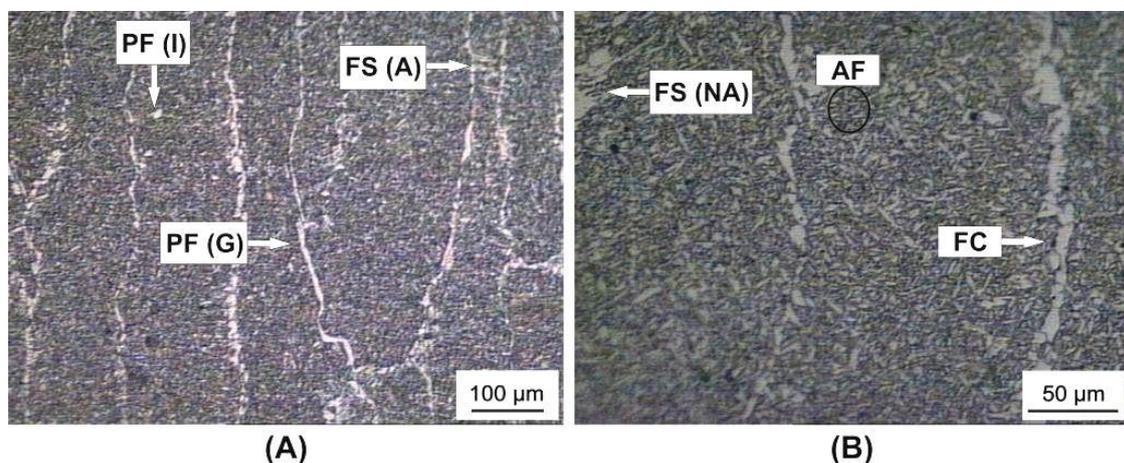


Figura 4.28 – Micrografia da ZF, Amostra 2P10. Ampliação: 200X (A) e 500X (B). Ataque: Nital 2%.

Os metais de solda depositados com o Fluxo P10 apresentaram os mesmos constituintes das soldagens realizadas com os demais fluxos. No entanto, as micrografias apontaram maior concentração de ferrita acicular na microestrutura, mais especificamente nas soldagens depositadas com tensão de referência de 32V.

Observa-se pelas Figuras 4.21 a 4.28 que os metais de solda apresentaram os mesmos constituintes, com destaque para as concentrações consideráveis de ferrita acicular presentes nas microestruturas. Sabendo que os fluxos utilizados são compostos de Mn e Si e que, de acordo com Piotrovski (1980), o manganês e o silício presentes na composição do fluxo são adicionados ao metal de solda pelas reações que ocorrem na poça de fusão, é preciso considerar o estudo realizado por Evans (1980) que ressalta a influência do manganês, levando ao aumento da ferrita acicular e diminuição da ferrita de contorno de grão na microestrutura do metal de solda. Além disto, Evans (1986) concluiu também que, em conjunto com o manganês, o silício contribui com o aumento na fração volumétrica da ferrita acicular, fatores estes que podem ser considerados determinantes nas microestruturas obtidas.

Mesmo que não tenha sido feita a medição das frações volumétricas dos constituintes nota-se, pelas microestruturas apresentadas, menor concentração de ferrita com segunda fase e maior concentração de ferrita acicular nas soldagens depositadas com o Fluxo P10, que possui um maior teor de polímero em sua composição. Estes resultados vão de encontro ao estudo realizado por Vaz (2014), indicando que a adição de polímero à composição do fluxo contribuiu com a redução de ferrita de contorno de grão e o aumento na formação de ferrita acicular na microestrutura do metal de solda.

4.5 Ensaio de microdureza Vickers

A medição de microdureza Vickers foi realizada no metal de base (MB), zona termicamente afetada (ZTA) e zona fundida (ZF) das soldas depositadas com os fluxos utilizados nos testes definitivos. Nas FIG. 4.29 e 4.30 apresentam-se os perfis de microdureza das medições realizadas nos corpos de prova dos metais soldados com tensão de referência de 26V e 32V, respectivamente.

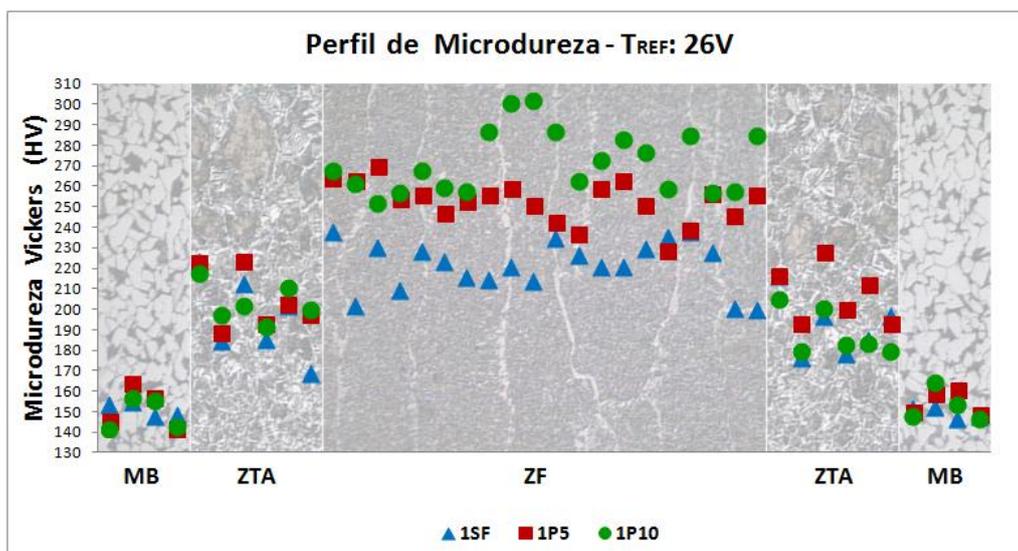


Figura 4.29 – Perfil de microdureza HV – Tensão: 26V.

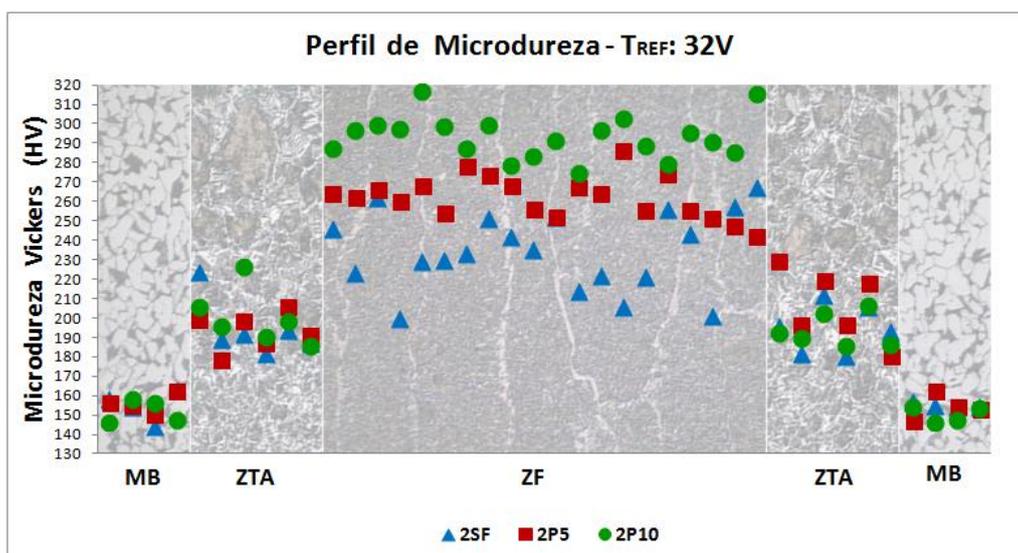


Figura 4.30 – Perfil de microdureza HV – Tensão: 32V

A partir dos perfis de microdurezas apresentados é possível verificar uma dispersão considerável na região da ZF dos metais de solda, sendo possível observar que os valores encontrados nas medições realizadas se mostraram superiores nas soldagens quando se aplicou os fluxos com adição de polímero, principalmente nas deposições realizadas com o fluxo P10.

Nas FIG. 4.31 e 4.32 apresentam-se os valores médios das medições de microdureza dos metais de solda depositados com tensão de referência de 26V e 32V, respectivamente.

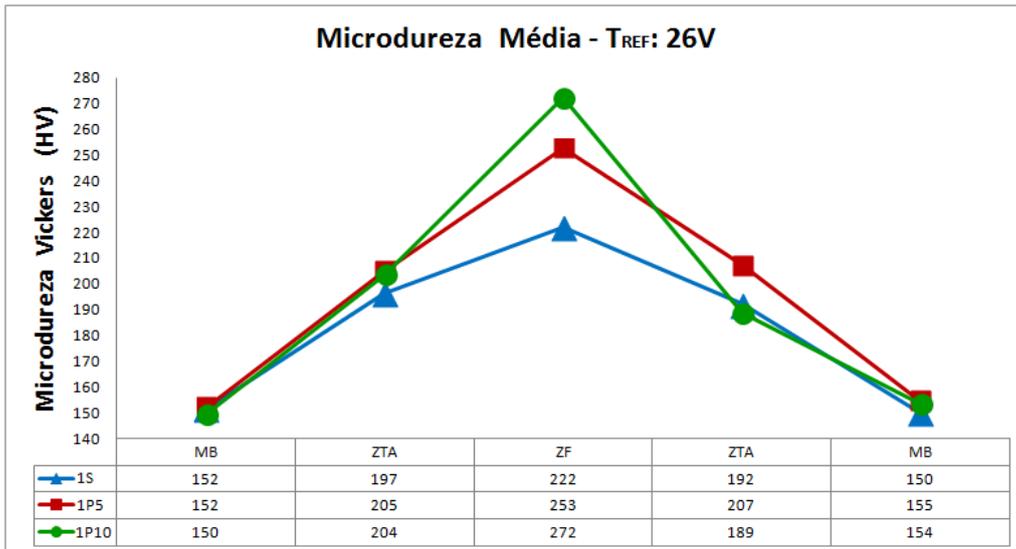


Figura 4.31 – Valores médios de microdureza HV – Tensão: 26V

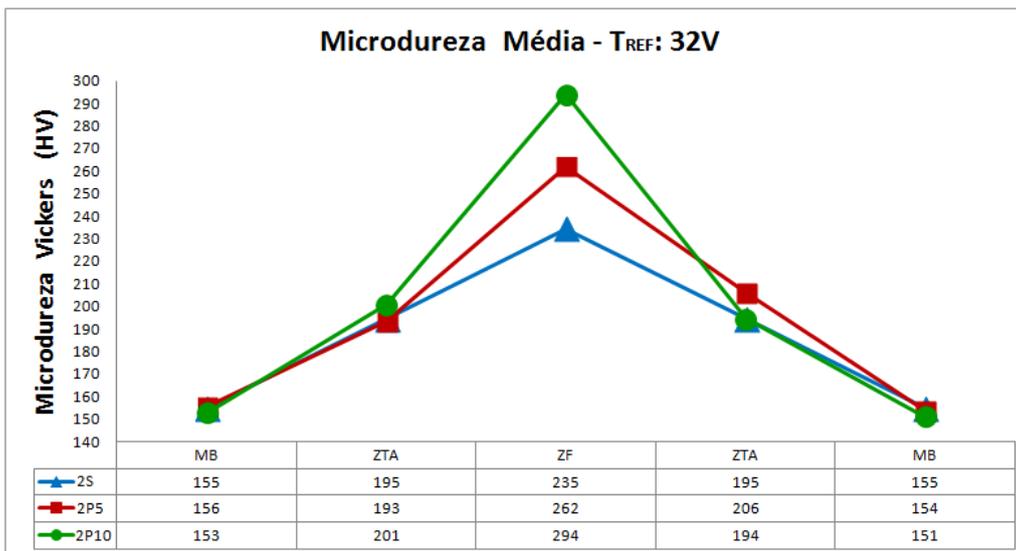


Figura 4.32 – Valores médios de microdureza HV – Tensão: 32V

Os valores de microdureza apresentados nas Figuras 4.31 e 4.32 indicam que o aumento do teor de polímero à composição dos fluxos faz com que haja aumento nos valores médios de microdureza na zona fundida dos metais de solda.

5 CONCLUSÕES

Os experimentos realizados para analisar a viabilidade de se aglomerar com polímero, fluxos de soldagem utilizados no processo SAW permitem concluir que:

- O dispositivo desenvolvido para escoamento de fluxo, adaptando uma fonte GMAW ao processo SAW, permitiu soldas com arco submerso pela deposição do fluxo de soldagem por ação da gravidade. Destaca-se a facilidade na montagem e desmontagem do dispositivo que, inclusive, permite deposições com variação no ângulo de soldagem.
- O fluxo de soldagem produzido utilizando apenas o polímero como aglomerante apresentou falha no escoamento, pelo formato irregular e alongado e a grande quantidade de partículas finas, o que impediu a deposição do fluxo, por ação da gravidade, para a zona de soldagem.
- Os fluxos produzidos com adição de polímero foram utilizados sem ressecagem depois de mantidos em temperatura ambiente por um período superior a 30 dias, não havendo indícios de porosidades ou trincas por hidrogênio oriundas de efeitos da umidade.
- Mesmo que não tenha sido feita a medição das frações volumétricas dos constituintes, as microestruturas das soldagens obtidas a partir do fluxo produzido com polímero indicaram haver maior concentração de ferrita acicular e redução na ferrita de contorno de grão, na comparação com as microestruturas das soldagens obtidas com o fluxo convencional.
- Os valores médios de microdureza encontrados na zona fundida dos metais de solda depositados com os fluxos produzidos com polímero se mostraram superiores, comparados aos encontrados quando se aplicou os fluxos convencionais. Além disto, os valores apresentados indicaram que o aumento no teor de polímero na composição do fluxo de soldagem resultou no aumento dos valores médios de microdureza.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Os resultados obtidos na realização deste trabalho permite sugerir os seguintes trabalhos futuros:

- Caracterização da escória produzida nas soldagens depositadas com o fluxo de soldagem com adição de polímero.
- Análise química dos metais de solda obtidos com o fluxo com polímero.
- Estudo das propriedades mecânicas dos metais de solda produzidos na utilização do fluxo polimérico.
- Estudo da hidrofobicidade apresentada pelo fluxo com adição de polímero em sua composição, incluindo testes de hidrogênio difusível.
- Quantificação dos microconstituintes estruturais formados em soldagens realizadas com o fluxo com polímero.
- Aplicação do fluxo com adição de polímero em soldagens multipasses com deposição em chanfro.
- Utilização do fluxo com polímero nas soldagens de outros tipos de ligas de aço como, por exemplo, o HSLA.
- Estudo da utilização do fluxo polimérico em soldagens realizadas em um equipamento SAW convencional, a fim de verificar o comportamento do fluxo em aplicações de correntes de soldagem e aportes térmicos mais elevados.

ABSTRACT

Several researches in welding have been carried out the past few years, not only to study the aspects related to existing processes, but also to contribute to the technological development of the process. Studies related to new consumables, equipment and welding techniques were developed, for improvements in products and services. In recent research, a polymer was used as binder of the covered electrodes for use in underwater welding and thereafter in welding out of water in order to achieve impermeability of the coating. The application of the polymer coatings resulted not only in the desired impermeability, but also showed good mechanical properties in the weld metal, with formation of acicular ferrite in amounts greater than the values found in welds performed with conventional coated electrodes. In this work, the polymer was applied as a flux binder for submerged arc welding. As a preliminary experiment, the coating of the impermeable coated electrode was used to produce the granular flux. In the final experiments, three fluxes were produced using the polymer as a virgin flux powder binder and for comparison was used a conventional flux, agglomerated with potassium silicate. The results indicated that the polymer contributed to the reduction of coarse grains in the microstructure and increased at formation of acicular ferrite in the molten zone of the weld metal. Moreover, it was verified that the weld metals deposited with the fluxes produced with polymer presented values of hardness higher than the values found in the weld metals deposited with the conventional flux.

Keywords: SAW process, flux, polymer, microstructure, acicular ferrite.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BAILEY, N. Development os fluxes and choice for submerged arc fluxes. Submerged Arc Welding - The Welding Institute, 1978. p.25-30

BAMANKAR, P.B.; SAWANT, S.M. Study of the effect of process parameters on depth of penetration and bead width in SAW process. International Journal of Advanced Engineering Research and Studies, v. 2, n.3. 2013. p.8-10.

BHADESHIA, H.K.D.H. Bainite in steels: transformations, microstructure and properties, Ed. Institute of Materials, 3^a ed., 400 p, 2001

BODHMAGE A. Correlation between physical properties and flowability indicators for fine powders. 2006, 108p. Dissertação (Mestrado) – College of Graduate Studies and Research, University of Saskatchewan, Canadá.

BUBNOFF, D.V.; VENTRELLA, V.A. Relação entre microestrutura/tenacidade ao impacto do metal de solda Aço API X-70 soldado por eletrodo revestido AWS E8010-G. In:XV Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Natal, RN. 2002.

CALIL JÚNIOR, C. Recomendações de fluxo e de cargas para o projeto de silos verticais. São Carlos: USP, 1990. Tese de Livre Docência, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1990.

CAMPOS, M. M. Análise da escoabilidade de pós. 2012. 126p. Dissertação (Mestrado) – Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal de São Carlos, UFSCar. São Carlos.

CANTO, R. B., Estudo teórico e experimental dos processos de compactação e sinterização do politetrafluoretileno (PTFE). 2007. 187p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo – Brasil/École Normale Supérieure de Cachan, França.

CASTRO, E.C.J. Avaliação de soldas produzidas por arames tubulares desenvolvidos em laboratório do tipo básico com adição de polímero como ingrediente do fluxo. 2015. 116p. Dissertação (Mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, CEFET/MG, Belo Horizonte.

COLPAERT, H. Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns. São Paulo, 4ª Edição, Editora Blucher, 2008.

DECKERS, H. P. F. Avaliação da aplicação da norma ACI-313:1997 no dimensionamento de silos multicelulares elevados de concreto armado para café. 2010. 137 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Lavras, Lavras.

DUPONT, J. N.; MARDER, A. R. Thermal efficiency of arc welding processes, *Welding Journal*. v. 74, 1995, p. 406s-416s.

EVANS, G. M. Effect of manganese on the microstructure and properties of all-weld-metal deposits. *Welding Journal*, 1980, p.67-75

EVANS, G. M.; Effect of silicon on the microstructure and properties of C-Mn allweld-metal deposits, *Metal Construction*, 1986, p. 438r-444r.

FICHEL, I. et al. Desenvolvimento de eletrodos revestidos impermeáveis. In: *XXXV Congresso Nacional de Soldagem*, Piracicaba, SP, 2009.

FONSECA, M.A. et al. Efeito do insumo de calor na microestrutura da solda do aço NTU-SAR50 pelo processo a arco submerso. Minas Gerais: Centro Universitário do Leste de Minas Gerais, 2006.

GLOVER, A.G. et al. The influence of cooling rate and composition on weld metal microstructures in a C/Mn and a HSLA steel. *Welding Research Supplement*, v. 60, n.70. 1977. p.267-273.

HAUSNER, H. H. Friction conditions in a mass of metal powder. *International Journal of Powder Metallurgy*, v.3, n.4. 1967. p. 7-13

IIW Sub-Commission IXJ "Guide to the light microscope examination of ferritic steel weld metals". *IIW Doc. IX-1533-88*, 1988.

ILLESCAS, S. et al. Study of the mechanical properties of low carbon content HSLA steels. *Revista de Metalurgia*, 2009. p. 424-431

IRIKURA, S.I. Estudo da influência da microestrutura no comportamento mecânico de juntas soldadas de um aço estrutural. 2006. 171p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira.

JAISWAL, D. Analysing the effect of parameters in multipass submerged arc welding process. *International Journal on Theoretical and Applied Research in Mechanical Engineering*. v. 2, n.2. 2013. p.60-70

JENIKE, A. W. Storage and flow of silos. *Bulletin of the University of Utah*, v.53, No. 26. Salt Lake. Utah, 1964, 198p.

JINDAL, S. et al. Design and development of fluxes for submerged arc welding of HSLA steel. *International Journal of Surface Engineering & Materials Technology*. v.3, 2013. p.52-57.

KARADENIZ, E.; OZSARAC, U.; YILDIZ, C. The effect of process parameters on penetration in gmaw processes. *material and design*, v. 28, 2007. p.649-656.

KOU, S. *Welding Metallurgy*, 2ed., John Willey & Sons, Inc. New Jersey, 2003. p.43

KUMAR, V.; MOHAN, N.; KHAMBA, J.S. Development of agglomerated acidic flux for submerged arc welding, *Estonian Journal of Engineering*. v.16, 2009, p 135-141.

LIU, S.; OLSON, D.L. The role of inclusions in controlling HSLA steel weld microstructures. *Welding Journal*. v.65, 1986. p.139–149.

LOPES NETO, J. P. Análise estrutural de silos metálicos prismáticos. 2005. 112f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

MACHADO, I. V. *Soldagem e técnicas conexas: Processos*. Porto Alegre, 1996.

MARQUES, P.V.; MODENESI, P.J.; BRACARENSE, A.Q., *Soldagem fundamentos e tecnologia*, 2ª Edição, Editora UFMG, 2008.

MARYA, S.; MAÎTRE, F.L. On the elaboration of a new submerged arc welding flux for titanium. *Journal of the Less Common Metals*. v.69, 1980. p.195-202.

MODENESI, P.J.; MARQUES, P.V.; SANTOS, D.B. Introdução à metalurgia da soldagem. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais – UFMG. 2012. Belo Horizonte.

MODENESI, P.J. Introdução à física da soldagem. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais – UFMG. 2012. Belo Horizonte.

MODENESI, P.J. Soldabilidade dos aços transformáveis. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais – UFMG. 2010. Belo Horizonte.

PALMA, G. Pressões e fluxo em silos esbeltos ($h/d > 1,5$). 2005. 121p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, Brasil.

PARANHOS, R.; SOUZA A. C. Soldagem a arco submerso. Rio de Janeiro: SENAI/RJ-CETEC de Solda, 1999.

PARIS, A.F.; PARIS, J.M. Estudo microestrutural de aço carbono soldado com o processo arco submerso e adições de Fe-Ti. In: *XXXVII Congresso Nacional de Soldagem*, Natal, RN, 2011.

PIOTROVSKI NETO, J. Seleção dos parâmetros em soldagem a arco submerso de aços comuns ao carbono. 1980. 169p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, Florianópolis.

SANTIAGO, G.H. Avaliação da influência do teor de polímero sobre as propriedades do metal de solda produzido com eletrodos impermeáveis. In: *XXXVIII Congresso Nacional de Soldagem*, Ouro Preto, MG, 2012.

SCOTTI, A.; PONOMAREV, V. Soldagem MIG/MAG: melhor entendimento, melhor desempenho. São Paulo. Artliber Editora, 2001.

SGARBI, P.V. Construção e validação de um calorímetro com vazão contínua de água para avaliação do rendimento térmico em processos de soldagem. 2013. 101p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, Porto Alegre.

SHARMA, L. Development of submerged arc welding fluxes for enhanced corrosion resistance of structural steel welds. 2011. 84p. Dissertação (Mestrado) – Department of Mechanical Engineering, Thapar University. Patiala.

VAZ, C. T. et al. Desenvolvimento de eletrodos revestidos de baixo hidrogênio impermeáveis. In: *XXXVI Congresso Nacional de Soldagem*, Recife, PE, 2010.

VAZ, C. T. et al. Desenvolvimento de eletrodos revestidos impermeáveis do tipo básico. In: *Rio Oil & Gas Expo and Conference*, Rio de Janeiro, RJ, 2010.

VAZ, C.T. Estudo da microestrutura e propriedades do metal de solda depositado por eletrodos revestidos impermeáveis do tipo baixo hidrogênio. In: *66º Congresso Anual da ABM*, São Paulo, SP, 2011.

VAZ, C.T. Influência do polímero utilizado como aglomerante em eletrodos revestidos básicos sobre a formação de ferrita acicular no metal de solda. 2014. 124p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

VAZ, C.T.; BRACARENSE, A.Q. Influência do uso de PTFE como aglomerante em eletrodos revestidos básicos sobre a formação de ferrita acicular no metal de solda. *Soldagem e Inspeção*. v.19, No.2. 2014. p.177-189.