

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

LEONARDO SCHIAVO DE REZENDE

FABRICAÇÃO DE ARAMES TUBULARES CELULÓSICOS COM ADIÇÃO DE
POLÍMERO

BELO HORIZONTE

2015

LEONARDO SCHIAVO DE REZEDE

FABRICAÇÃO DE ARAMES TUBULARES CELULÓSICOS COM ADIÇÃO DE
POLÍMERO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no Curso de Graduação de Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para o título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Cláudio Turani Vaz

BELO HORIZONTE

2015

LEONARDO SCHIAVO DE REZENDE

FABRICAÇÃO DE ARAMES TUBULARES CELULÓSICOS COM ADIÇÃO DE
POLÍMERO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no Curso de Graduação de Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para o título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Aprovado em 14 de dezembro de 2015

BANCA EXAMINADORA

Prof. Cláudio Turani Vaz – Orientador

Prof. Maria Celeste Monteiro de Souza Costa

Prof. Euclides Gonçalves Martins Filho

Agradecimentos

Agradeço à minha família pelo amor e apoio incondicional.

Ao Professor Cláudio Turani pelos conhecimentos transmitidos, disponibilidade, suporte, generosidade e compreensão.

Ao Professor Alexandre Bracarense por ter aberto as portas do Laboratório de Robótica, Soldagem e Simulação (LRSS) da UFMG e pela sua contribuição na realização deste trabalho.

Resumo

Eletrodos revestidos celulósicos tem uma vasta aplicabilidade, porém não existem arames tubulares com o mesmo composto. Este trabalho teve como proposta fabricar arames tubulares celulósicos com adição de polímero e sem adição deste por meio de uma máquina piloto e avaliar preliminarmente as características de soldagem desses tipos de formulações, comparando-as. Concomitantemente à fabricação dos arames, também se estudou o processo de produção, suas etapas e influências no processamento da fita metálica, onde há operações de laminação e trefilação. As etapas do processamento de arame foram analisadas por meio de macrografias, com o objetivo de investigar a conformação que a fita sofre até formação do arame, sua circularidade e tipo de fechamento. Os arames produzidos foram utilizados na deposição de metal de solda sobre chapas de aço e tiveram comparados seus resultados por meio de avaliações visuais, macrográficas e micrográficas, onde avaliou-se propriedades como formação de escória, respingos, presença de poros, reforço, penetração, largura, diluição e microestrutura qualitativa. Dos parâmetros avaliados, observou-se um processamento eficiente do arame e os resultados avaliados dos cordões não foram conclusivos a respeito de uma influência direta nos cordões de solda avaliados, necessitando de mais ensaios para avaliar sobre a influência do polímero.

Palavras-chave: arame tubular, polímero, máquina piloto de arame tubular, arame tubular celulósico, fabricação de arame tubular.

Abstract

Coated Cellulosic Electrodes has a broad applicability, but there is no cored wires with the same compound. This study was proposed to manufacture cellulosic cored wires with the addition of polymer and without addition of polymer from a pilot machine and evaluate preliminarily the welding characteristics of these types of formulations, comparing them. simultaneously with the manufacture of wires, also studied the production process, the production steps and influences processing of the metal strip, where there are rolling and drawing operations. The steps of the wire processing were analyzed by macrographs in order to investigate the conformation that the tape undergoes training to the wire, its roundness and type of closure. The wires produced were used in the deposition of weld metal on steel plates and had compared their results through visual ratings, macrograficas and micrographic for assessment properties such as formation of slag, slag, pores, reinforcement, penetration, width, dilution and qualitative microstructure.

Key words: cored wire, polymer, cored wire pilot machine, cellulosic cored wire, cored wire manufacturing.

Sumário

1	Introdução.....	8
2.	Objetivos.....	9
2.1	Objetivos específicos	Erro! Indicador não definido.
3.	Revisão bibliográfica.....	10
3.1	Soldagem	10
3.2	Soldagem ao arco elétrico.....	11
3.3	Soldagem com arames tubulares (FCAW)	11
3.3.1	Consumíveis do processo FCAW	12
3.3.1.1	Arames Tubulares Básicos	13
3.3.1.2	Arames Tubulares Rutílicos	14
3.3.1.3	Arames Tubulares com Fluxo Metálico (Metal-Cored).....	14
3.3.1.4	Arames Tubulares Autoprotégidos (self-shielded wires).....	15
3.3.2	Processos de fabricação de Arames Tubulares	15
3.3.2.1	Máquina Piloto para Fabricação de Arames Tubulares.....	17
3.4	Eletrodos Revestidos.....	18
3.4.1	Consumíveis.....	19
3.4.2	Tipos de Eletrodos Revestidos	20
3.4.2.1	Eletrodos Revestidos Oxidantes	20
3.4.2.2	Eletrodos Revestidos Ácidos.....	20
3.4.2.3	Eletrodo Revestidos Rutílicos	20
3.4.2.4	Eletrodos Revestidos Básicos.....	21
3.4.2.5	Eletrodo Revestido Celulósico	21
3.4.3	Eletrodos aglomerados com polímeros	22
4.	Metodologia.....	22
4.1	Fabricação dos Arames	22
4.1.1	Produção de Fluxo	22
4.1.2	Ajuste da Máquina Piloto de Arame Tubular	23
4.1.3	Produção dos Arames Tubulares.....	26
4.2	Avaliação dos Arames Produzidos	27
4.3	Deposição dos Cordões de Solda.....	28
4.3.1	Equipamentos Utilizados	29

4.3.2 Parâmetros de Soldagem	30
4.3.3 Materiais.....	30
4.4 Avaliação das Soldas	31
4.4.1 Avaliação Visual	31
4.4.2 Macros e Micrografias dos Cordões de Solda.....	31
5. Resultados e discussão	34
5.1 Resultados do processamento	34
5.2 Resultados do processo de soldagem.....	38
6. Conclusões.....	53
7. Sugestões para trabalhos futuros	54
Referências	55

1 Introdução

O processo de soldagem a arco elétrico iniciou-se no fim do século XIX por meio de eletrodos nus, ou sem revestimento, e ao início do século XX e durante os anos que seguiram, foram desenvolvidos eletrodos revestidos, e estes apresentavam melhor desempenho em detrimento aos não revestidos, sobretudo pela melhor qualidade do metal de solda. Contudo, com intuito de tornar o processo mais produtivo e econômico, foram desenvolvidas outras tecnologias e consumíveis em soldagem, entre os quais o processo utilizando arames tubulares.

As vantagens da soldagem com arames tubulares são, sobretudo, a alta produtividade, já que se trata de um processo semiautomático onde a alimentação é feita de forma contínua e mecânica dependendo apenas do acionamento e interrupção do soldador, e a qualidade dos metais de solda que se equipara ao processo de soldagem por eletrodos revestidos. A qualidade do metal de solda promovida pelo arame tubular está associada ao fluxo presente em seu interior.

Diferentemente do eletrodo revestido, o fluxo interno presente no arame tubular não necessita de aglomerante. Para aglomerar os revestimentos dos eletrodos revestidos, usualmente, são utilizados silicatos. Os silicatos continuam sendo empregados, mas já se encontram eletrodos comerciais produzidos com polímeros. Os polímeros são utilizados tanto como aglomerantes quanto impermeabilizantes de eletrodos. Contudo, recentemente, estudos realizados com Politetrafluoretileno (PTFE) como agente aglomerante mostraram que a presença deste polímero contribuiu para melhorar propriedades mecânicas do metal, reduzir o teor de hidrogênio difusível e minimizar a higroscopicidade do revestimento, devido ao caráter hidrofóbico do polímero, evitando a necessidade de ressecagem do eletrodo (C. Vaz, 2012).

Assim como eletrodos revestidos, existem, comercialmente, arames tubulares básicos, rúflicos, com fluxo metálico e autoprotégidos. Entretanto, diferentemente dos eletrodos revestidos, não há arames tubulares celulósicos ou com presença de polímero. Embora comercialmente não se encontre arame tubular celulósico, há um pedido de patente junto ao Instituto Nacional da Propriedade Intelectual (INPI) deste tipo de consumível.

2. Objetivo

Produzir arames tubulares celulósicos com adição de diferentes quantidades de polímero em máquina piloto e avaliação preliminar das soldas produzidas.

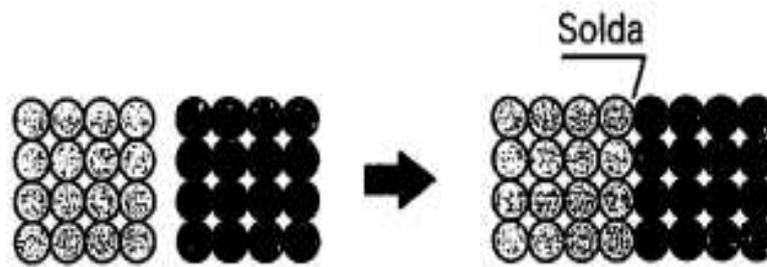
- Avaliar conformação do processamento de deformação da máquina piloto de arame tubular, o tipo de fechamento e o aspecto final de forma do arame tubular;
- Avaliar a continuidade de alimentação do silo ao arame com fluxo por meio de determinação de percentagem em peso de fluxo;
- Avaliar preliminarmente os cordões de solda produzidos por ensaios visuais, macrográficos e micrográficos.

3. Revisão bibliográfica

3.1 Soldagem

A soldagem é um processo que visa unir corpos por meio de interações atômicas, entre as superfícies destes, formando ligações químicas. Os átomos dispostos na superfície encontram-se com menos ligações químicas formadas do que os internos aos corpos, que se apresentam mais estáveis por não terem a possibilidade de formarem novas ligações. Portanto, quando aproximados a uma distância suficientemente pequena, os átomos da superfície dos corpos tendem a ligarem-se formando uma continuidade, ou seja, uma solda (P. Marques, 2009), conforme Figura 1.

Figura 1 – Formação teórica de uma solda pela aproximação de superfícies



Fonte: Marques, 2009

Apenas o contato entre os corpos não é o suficiente para formar uma solda, já que a superfície de qualquer corpo apresenta irregularidades, ou rugosidade, além de umidade, gases dissolvidos, gordura e óxido. A presença destes elementos impede o contato efetivo das superfícies, e, mesmo que não houvesse tal presença, a irregularidade da superfície impede a junção efetiva. Sendo assim, existem duas formas de superar estes obstáculos. Segundo MARQUES (2009; p.20) “o primeiro consiste em deformar as superfícies de contato, permitindo a aproximação dos átomos [...] O segundo consiste na aplicação de calor na região da junta até fusão. Como resultado desta fusão, as superfícies são eliminadas e com a solidificação a solda é formada.”

A soldagem por fusão é a mais aplicada, sobretudo a soldagem por arco elétrico, onde se utilizam consumíveis como: eletrodos revestidos, arames sólidos e arames tubulares (P. Marques, 2009).

3.2 Soldagem ao arco elétrico

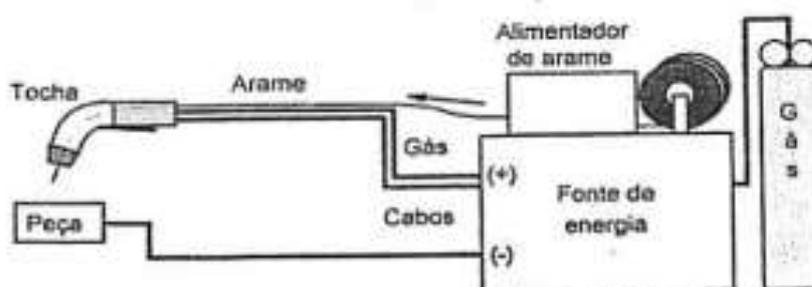
O arco elétrico é gerado por uma descarga elétrica proveniente de uma diferença de potencial, que por sua vez ioniza o gás, ou gases, ao seu entorno, denominado plasma, que auxilia na manutenção desse. O calor gerado pela ionização e pela descarga elétrica pode ser suficientemente adequado para fundir e propiciar a junção de corpos ou a deposição do metal de solda sobre algum corpo (P.Marques, 2009).

3.3 Soldagem com arames tubulares (FCAW)

O processo de soldagem por Arame Tubular (FCAW – Flux-Cored Arc Welding) foi precedido pelo de soldagem MIG/MAG (GMAW – Gas Metal Arc Welding). Ambos os processos utilizam o mesmo maquinário e são semi-automatizados. Entretanto eles se diferem pelos consumíveis (B. Oliveira, 2010).

A soldagem GMAW, como exemplificado na Figura 2, foi desenvolvida no ano de 1926 com o intuito de aumentar a produtividade, em detrimento ao processo de soldagem por Eletrodo Revestido (SMAW – Shielded Metal Arc Welding), já que nesse a alimentação é contínua. No entanto, o processo GMAW não possui as mesmas propriedades de soldagem que o SMAW, inerentes ao seu revestimento (D.Widgery, 1994).

Figura 2 - Esquema de soldagem por GMAW

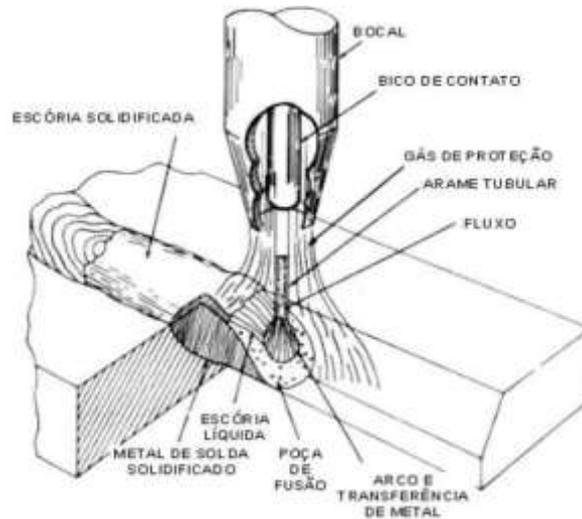


Fonte: Marques, 2009

Na década de 50 foi desenvolvido e comercializado o processo de soldagem FCAW. Derivado do GMAW, o FCAW (Figura 3) associa as propriedades metalúrgicas de soldagem que o processo SMAW possui com a produtividade do processo semi-automatizado de alimentação contínua. Outro aspecto importante é a atmosfera de auto-proteção característica da soldagem FCAW que elimina, em algumas situações, a necessidade de utilizar cilindros de

gases para proteção. Estes ganhos se devem ao fluxo que o arame tubular carrega internamente (B. Oliveira, 2010).

Figura 3 - Processo FCAW



Fonte: ESAB, 2004

3.3.1 Consumíveis do processo FCAW

Os consumíveis da soldagem FCAW são: os arames tubulares, gases de proteção e, se necessário, produtos anti-respingos. Os arames tubulares são classificados pela American Welding Society (AWS) segundo suas propriedades e parâmetros. Pode-se destacar como prerrogativa de classificação: tipo de fluxo, tipo de arame, se utiliza gás de proteção ou se auto-protegido, posição de soldagem, propriedades do cordão obtido, entre outros (P. Marques 2009). A classificação dos arames tubulares segundo a AWS segue conforme Tabela 1 e Figura 4.

O arame tubular consiste de um invólucro metálico preenchido por uma mistura de pós, denominado fluxo, que contém uma parte de material não-metálica e outra metálica. A parte não metálica exerce várias funções, como: gerar gás de proteção para soldagem, produzir escória, acrescentar elementos de liga, estabilizar arco e retirar oxigênio, nitrogênio e hidrogênio (P. Marques, 2009).

Tabela 1 - Classificação AWS de arames tubulares

Especificação	Consumível
AWS A5.9	Arames de aço inoxidável com pó metálico interno
AWS A5.15	Arames para soldagem de ferro fundido
AWS A5.18	Arames tubulares de aço carbono com pó metálico interno
AWS A5.20	Arames tubulares de aço carbono com fluxo interno
AWS A5.21	Arames para revestimento
AWS A5.22	Arames tubulares para soldagem de aço inoxidável
AWS A5.29	Arames de aços de baixa liga com fluxo interno

Fonte: P. Marques, 2009

Figura 4 - Classificação dos tipos de Arames Tubulares (AWS) para soldagem de aços baixo carbono.



Fonte: B. Oliveira, 2010

3.3.1.1 Arames Tubulares Básicos

Arames tubulares básicos recebem essa denominação devido às presenças de carbonato de cálcio e fluoreto de cálcio. Estes componentes são os responsáveis pela geração de escória com características básicas, com o ponto de fusão abaixo do metal de solda, e que, adicionada ao dióxido de carbono gerado pela decomposição do carbonato, protege a solda do contato com a atmosfera, contribuindo para o baixo teor de hidrogênio do metal depositado, e ajuda na

estabilidade do arco. Além destas características, produz uma fina camada e escória, o que reduz a possibilidade de inclusões de escória e a facilidade de destacar a mesma. (D. Widgery, 1994).

3.3.1.2 Arames Tubulares Rutílicos

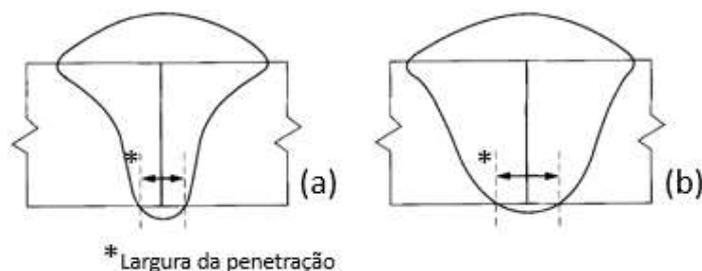
A presença de rutilo confere o nome dado a esse tipo de arame. O rutilo é um mineral que contém dióxido de titânio. Este confere propriedades como: boa estabilidade do arco, tornando-o mais suave e, conseqüentemente, um cordão de solda com melhor aparência, torna a escória mais fluida, densa e facilmente destacável, e contribui para obter cordões com baixo teor de oxigênio e hidrogênio difusível (ESAB, 2004).

3.3.1.3 Arames Tubulares com Fluxo Metálico (Metal-Cored)

Os arames tubulares com fluxo metálico possuem essa denominação por possuírem algum pó metálico como componente principal. É mais empregado pó de ferro como matéria-prima de fluxo e este aumenta a taxa de deposição do metal de solda, chegando a 95%. A baixa presença de componentes formadores de escória permite que sejam feitas soldagens multipasses, aumentando a produtividade. Além disso, quando associado ao processo misturas de Argônio e Dióxido de Carbono, obtém-se um cordão de solda com características mais suaves e melhor acabamento (D. Widgery, 1994).

Comparativamente ao processo GMAW, os Arames Tubulares com Fluxo Metálico, além de poderem ter uma maior velocidade na taxa de deposição, estes têm o perfil do cordão de solda mais largo e apresentam menor incidência de falta de fusão (Figura 5) (D. Widgery, 1994).

Figura 5 - Perfil de penetração de arames sólidos (a) e Arames com Fluxo Metálico (b)



Fonte: D.Widgery, 1994

3.3.1.4 Arames Tubulares Autoprotégidos (self-shielded wires)

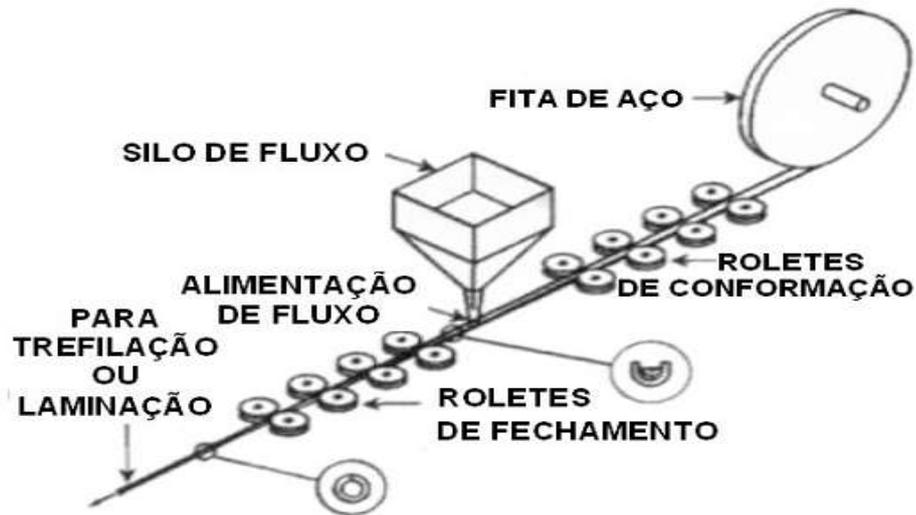
São consumíveis aplicados sem proteção gasosa. Em sua composição podem ser encontrados elementos que protegem o metal de solda de contaminação pela atmosfera influenciando na qualidade do cordão de solda. No fluxo podem ser encontrados elementos como: metais e minerais que volatilizam e/ou se decompõem durante o processo de soldagem produzindo gases protetores, elementos desoxidantes e formadores de nitretos para capturar o oxigênio e o nitrogênio provenientes da atmosfera e que podem se misturar ao gás de proteção. Além disso, o fluxo também é responsável por purificar o metal de solda, uma vez que em sua composição estão presentes elementos formadores de escória (ESAB 2004). Outras vantagens são: uso em campo para a soldagem de aço carbono em todas as posições não necessitam de equipamentos de solda especiais, apresentam boa aparência do cordão de solda, com aspecto limpo e escória facilmente removível (ESAB, 2004).

3.3.2 Processos de fabricação de Arames Tubulares

Os arames tubulares são produzidos a partir de fitas metálicas conformadas e preenchidas por fluxo, de formulação específica conforme a necessidade de aplicação. O processo de fabricação de arame tubular é de produção contínua, onde a fita metálica, que vem em bobina, alimenta a linha produção. Durante a produção as fitas são conformadas, em duas etapas, por roletes. Na primeira etapa a fita é conformada assumindo um formato de canaleta (“U”), para que, posteriormente, esta seja alimentada por fluxo por meio de um silo. Após a adição de fluxo a fita passa pela segunda etapa de conformação, onde é deformada e assume um formato de tubo (“O”), ou fechamento (D. Widgery, 1994). O esquema de produção e conformação do arame tubular é demonstrado pela Figura 6.

Após a segunda etapa de conformação o arame tubular pode ter seu diâmetro ajustado de acordo com a aplicação e tamanho desejados, portanto, é necessário um processamento pós-fechamento do arame para a redução da seção, podendo ser por trefilação ou laminação (D. Widgery, 1994), esquematizado na Figura 8.

Figura 6 - Esquema de produção de Arame Tubular



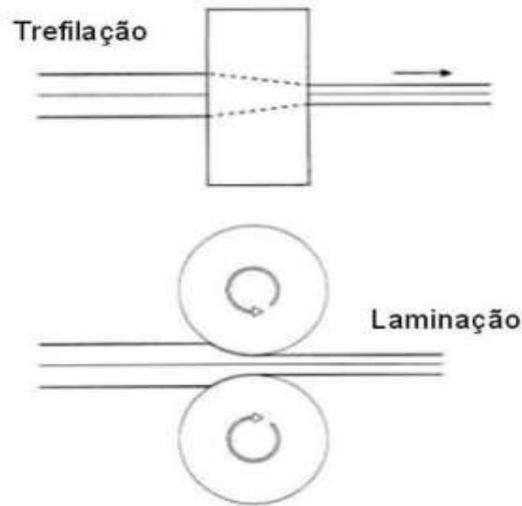
Fonte: ESAB, 2004

Figura 7 - Tipos de Seções Transversais

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

Fonte: Oliveira, 2010

Figura 8 - Conformação Mecânica do Arame Tubular



Fonte: ESAB, 2004

3.3.2.1 Máquina Piloto para Fabricação de Arames Tubulares

A máquina piloto para fabricação de arames tubulares, Figura 9, do Laboratório de Robótica, Soldagem e Simulação (LRSS), que pertence à Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), é a adaptação de um projeto existente em Cuba. Este projeto ocorreu por meio da parceria entre Cuba e LRSS (B. Oliveira, 2010).

Figura 9 -Máquina Piloto Para Fabricação de Arame Tubular – LRSS



Fonte: B. Oliveira, 2010

Essencialmente, a máquina piloto é uma simplificação do que ocorre na indústria. Os consumíveis são os mesmos e chega-se ao mesmo resultado de produção obtido na indústria, Figura 10.

Figura 10 - Arame Tubular produzido na Máquina Piloto

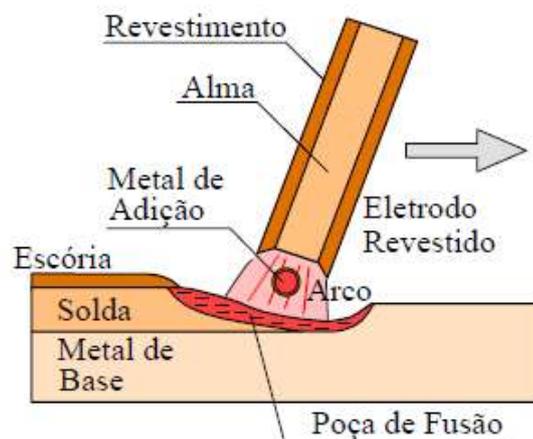


Fonte: B. Oliveira, 2010

3.4 Soldagem com eletrodos revestidos

A soldagem com eletrodo revestido (Shield Metal Arc Welding - SMAW) é um processo metalúrgico que envolve coalescência de metais por meio do arco elétrico gerado pelos eletrodos metálico revestido e peça, ocorrendo deposição metálica do eletrodo revestido sobre a peça. Esquema de Soldagem Com Eletrodo Revestido está demonstrado na Figura 11 (P.Marques, 2009).

Figura 11 - Soldagem com Eletrodo Revestido

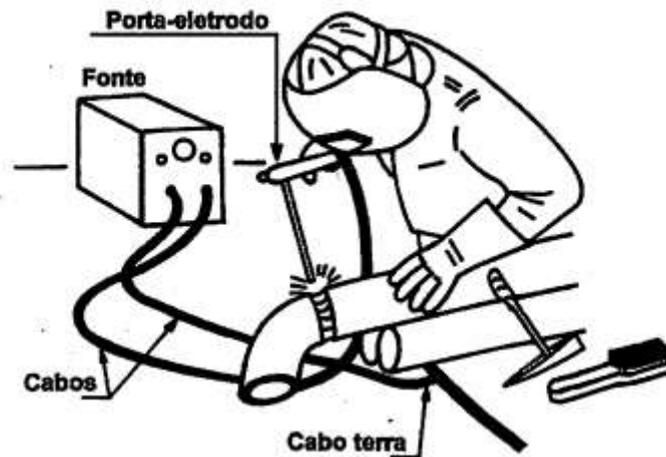


Fonte: Marques, 2009

O processo SMAW é o mais utilizado dentre todos os processos de soldagem, o motivo

se deve, talvez, pelo fato de ser manual e mais versátil (ESAB, 2005), entretanto este processo é o que apresenta menor produtividade, tanto em termos de taxa de deposição como na ocupação do soldador, uma vez que se trata de operação manual, exemplificado pela Figura 12 (P. Marques, 2009).

Figura 12 - Esquema de soldagem por SMAW



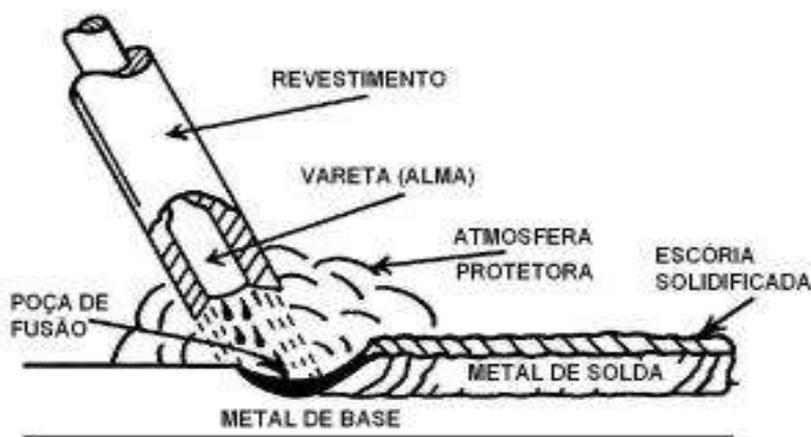
Fonte: Marques, 2009

3.4.1 Consumíveis

O eletrodo revestido é composto por duas partes: alma e revestimento, exposto na Figura 13. A alma é uma vareta metálica com diâmetro entre 1,5 e 8mm e comprimento entre 23 e 45mm, que permite que aja fluxo de corrente elétrica, por esta, e que se funde e deposita sobre o metal de base. Já o revestimento recobre a alma e tem como função estabilizar o arco elétrico, adequar a composição química do cordão pela adição de elementos de liga e eliminando impurezas, como fósforo e enxofre, protege a poça de fusão e o cordão de solda por meio da geração de atmosfera e escória protetivas (P. Marques, 2009).

Os revestimentos de eletrodo revestido podem receber em sua formulação o pó de ferro. Este aditivo permite melhor aproveitamento do metal depositado aumentando a penetração e torna o revestimento mais resistente ao calor. No entanto, uma desvantagem desta adição é que aumenta a poça de fusão tornando o processo de soldagem mais difícil, sobretudo fora da posição plana.

Figura 13 - Eletrodo revestido



Fonte: Marques, 2009

3.4.2 Tipos de Eletrodos Revestidos

3.4.2.1 Eletrodos Revestidos Oxidantes

Os eletrodos de revestimento oxidante apresentam em sua composição óxido de ferro e manganês, o cordão formado tem baixa penetração e é utilizado em situações onde o aspecto deste é mais importante que a sua resistência, sendo, portanto, aplicados apenas em baixa solicitação mecânica. Pode ser adicionado pó de ferro para melhorar seu rendimento, entretanto este tipo de eletrodo é muito pouco utilizado (P. Marques, 2009).

3.4.2.2 Eletrodos Revestidos Ácidos

Eletrodos de revestimento ácido tem óxido de ferro, manganês e sílica (SiO_2) como componentes principais de sua formulação, além de produzir escória porosa, abundante e de fácil remoção. As propriedades da solda são consideradas satisfatórias para diversas aplicações, embora sua resistência à formação de trincas de solidificação seja baixa. Este revestimento produz um cordão com aparência muito boa, embora apresente uma poça de fusão volumosa que limita sua aplicação nas posições horizontal e plana (P. Marques, 2009).

3.4.2.3 Eletrodo Revestidos Rutílicos

Eletrodos de revestimentos rútilicos tem como destaque em sua formulação a presença de Rutilo (TiO_2), que pode representar até 50% do revestimento, que proporciona uma escória densa, de fácil remoção e abundante. Podem ser empregados em diversas aplicações, mas deve haver ressecagem em baixa temperatura para não ocorrer formação de poros. Para aumentar o rendimento deste tipo de eletrodo é adicionado pó de ferro. Tal adição aumenta a taxa de deposição e fluidez da escória, entretanto, diminui a tenacidade do metal de solda (ESAB, 2005).

3.4.2.4 Eletrodos Revestidos Básicos

Eletrodos de revestimento básico contém carbonatos, principalmente de cálcio, e fluorita. As presenças destes compostos promovem a formação de uma escória básica, além ocorrer formação de dióxido de carbono pela queima dos carbonatos presentes no revestimento. O dióxido de carbono é um gás que protege o cordão de solda da atmosfera. A escória básica auxilia no processo de dessulfurar e desfosforar o metal de solda que, tem como consequência, menor possibilidades de trinca ou fissuração promovidas por estes elementos. Outro aspecto inerente a este tipo de revestimento é a ausência de elementos orgânicos, pois isto propicia, se manuseado adequadamente, cordões de solda com baixo teor de hidrogênio (P. Marques, 2009). O revestimento básico apresenta elementos higroscópicos em sua formulação, portanto é necessária uma ressecagem do eletrodo para que minimize a influência do hidrogênio no metal de solda (ESAB, 2005).

3.4.2.5 Eletrodo Revestido Celulósico

Os eletrodos de revestimento celulósico, diferentemente dos outros eletrodos, apresentam alto teor de material orgânico, a celulose. Assim como no revestimento básico, há presença de atmosfera protetiva por dióxido de carbono. Entretanto, diferentemente do revestimento básico, a formação de dióxido de carbono se deve à decomposição da celulose. A presença deste material favorece uma maior penetração do metal de solda, torna o arco elétrico “violento” e o processo de soldagem apresenta muitos respingos, em detrimento aos outros tipos de revestimentos (P. Marques, 2009). Uma desvantagem deste revestimento é a possibilidade de fragilização por hidrogênio, já que a celulose, em sua estrutura química, tem a presença deste elemento (ESAB, 2005).

3.4.3 Eletrodos aglomerados com polímeros

Usualmente os silicatos são utilizados como aglomerantes nos revestimentos de eletrodos revestidos. No entanto uma alternativa aos silicatos é o PTFE, contudo, não necessariamente, o polímero substitui totalmente o silicato. A adição do polímero permite minimizar ou dispensar o processo de ressecagem do eletrodo pois, entre outros fatores, diminui a higroscopia do revestimento (C. Vaz, 2012). Não somente os silicatos tem propriedades higroscópicas, alguns compostos como carbonatos também influenciam na higroscopicidade (P. Marques, 2009). Além de minimizar a propriedades de higroscopia do revestimento, os metais de solda produzidos por revestimentos básicos processados com o polímero apresentam baixos teores de hidrogênio e nitrogênio difusíveis, em detrimento aos eletrodos de revestimento tradicional. Isto se deve a atmosfera protetiva gerada pela decomposição do polímero durante o processo de soldagem. Outros aspectos que envolvem a presença do polímero são a maior estabilidade do arco e a presença considerável de ferrita acicular. Este constituinte propicia maior tenacidade ao metal de solda e contribui em evitar propagação de trincas devido à sua morfologia formada por lenticulas aleatórias que podem atuar como barreira. (C. Vaz, 2012)

4. Metodologia

4.1 Fabricação dos Arames

Os arames foram fabricados com o auxílio de uma máquina piloto de arame tubular do Laboratório de Robótica, Soldagem e Simulação (LRSS) da UFMG.

4.1.1 Produção de Fluxo

Os fluxos foram produzidos a partir de formulações pré-determinadas, onde ocorreram variações percentuais em peso de polímero: 0%; 7,5%; 15%. E cada formulação recebeu uma denominação, seguindo respectivamente a ordem das formulações citadas anteriormente: T1, T2 e T3. Para compensar a ausência e a menor quantidade de polímero das amostras T1 e T2, respectivamente, foi adicionada quantidade suficiente de pó de ferro para completar a fórmula.

Os insumos dos fluxos foram pesados, um por vez, em balança semi-analítica da marca

Marte, modelo AD 3300, de capacidade de 3300 gramas e com sensibilidade de 0,01 grama. Posteriormente, os insumos referentes a cada formulação foram vertidos em recipientes de fechamento hermético e homogeneizados manualmente por um período de 5 minutos.

4.1.2 Ajuste da Máquina Piloto de Arame Tubular

A máquina piloto de arame tubular foi abastecida com um carretel de fita em aço e colocado em um eixo para que gire livremente. A fita foi presa ao tambor de tração e encaixada em uma guia para evitar que saia da linha de produção e posteriormente, colocada simultaneamente, nos sistemas de conformação referentes as primeira e segunda etapas, conforme Figura 14. E foram comprimidas mecanicamente a fim de promover as conformações inerentes às etapas citadas.

Figura 14 – Início da linha de produção



Fonte: Produzida pelo próprio Autor

A primeira etapa a fita foi conformada em um formato em “V”, porém com aspecto bem suave e a segunda etapa a conformou em um formato em canaleta “U”. Após a montagem parcial da linha foi acionado o tambor de tração e iniciou o processo de conformação da fita. Assim que a fita atingiu comprimento suficiente para passar pelo terceiro sistema de roletes, ela foi ajustada a este. Sem interrupção da linha, nesta etapa foi aplicado esforço compressivo

para que a conformação da fita fosse de canaleta, para um formato próximo ao circular, “O”, inerente a esta etapa de conformação (Figura 15). Este ajuste foi feito gradativamente e monitorado visualmente para garantir que as conformações ocorressem de acordo com os formatos citados para que não houvessem distorções de conformações no processo.

Figura 15 – Ajustes na conformação da fita



Fonte: B. Oliveira, 2010

Após a terceira etapa de conformação e assim que a fita conformada por esta atingisse comprimento suficiente para alcançar o tambor de tração, a linha foi interrompida e o excedente de fita não conformado foi descartado. A partir deste ponto, a fita conformada foi passada pela trefila de 3,6mm e essa foi presa novamente ao tambor de tração e assim foi montada a linha de produção.

Após a montagem da linha a máquina piloto foi alinhada. O alinhamento foi realizado de forma que a canaleta conformada pelo segundo sistema de roletes estivesse tangente ao prato alimentador, como mostrado nas Figuras 16 e 17. Para alinhar, os eixos ficaram livres para se movimentarem pelos mancais. Esta liberdade permitiu que o sistema se ajustasse.

Figura 16 – Alinhamento e dosagem de deposição de fluxo



Fonte: Produzida pelo Autor

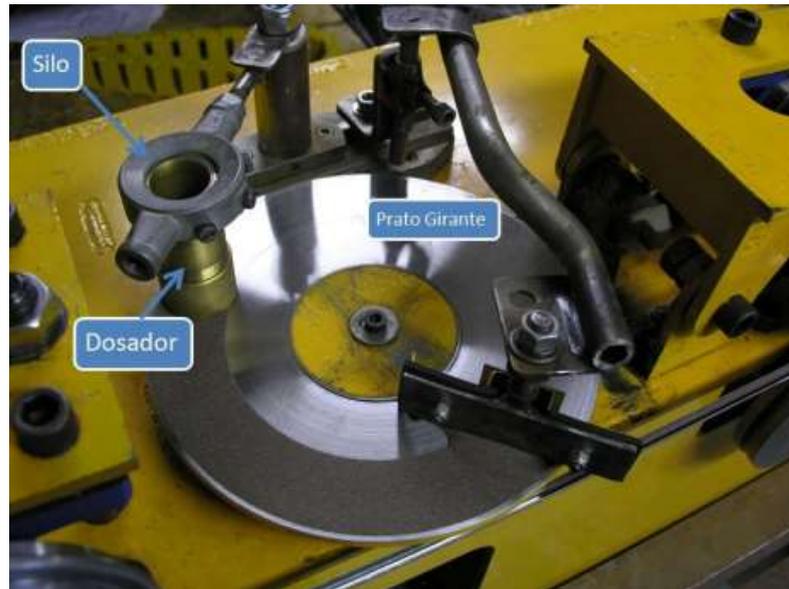
Figura 17 – Vista geral da máquina e linha alinhada.



Fonte: Produzida pelo Autor

Após a segunda etapa de conformação ocorreu a deposição de fluxo, Figura 18. Nesta etapa um silo despejou o fluxo em um prato giratório e com o auxílio de uma palheta que atuou como barreira ao fluxo o pó é despejado na canaleta. A quantidade de fluxo despejado foi regulada conforme o posicionamento da palheta e da altura do dosador do silo. Nesta etapa, o fluxo foi ajustado para preencher aproximadamente metade da altura da canaleta para que, assim, fosse garantido o preenchimento total do interior do arame tubular, além de compactação do pó. Este ajuste foi feito de forma manual e visual.

Figura 18 – Prato dosador de fluxo



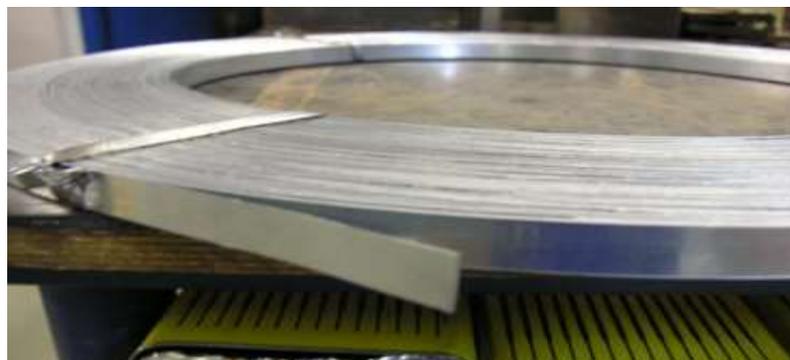
Fonte: B. Oliveira, 2010

A partir do ponto que iniciou a alimentação da linha com o fluxo, este foi marcado para que assim que atingisse o tambor de tração, todo arame produzido antes da alimentação fosse desprezado da linha.

4.1.3 Produção dos Arames Tubulares

Para este trabalho a fita utilizada foi de aço SAE 1008, com largura de 10mm e espessura de 1mm (Figura 19).

Figura 19 – Fita para fabricação do arame tubular



Fonte: B. Oliveira, 2010

Os arames foram produzidos basicamente em 5 etapas. As duas primeiras garantem que

os arames se conformem em formato de canaleta, “U”, para que, em seguida, fossem depositados sobre eles os fluxos, conforme as Figuras 16 e 18. Após a terceira etapa, alimentação da linha com fluxo, o arame passou pela quarta etapa que é a conformação deste em formato circular, “O”, e nesta parte do processo ocorreu um pré-fechamento em topo da fita. Por último, a quinta etapa onde os arames foram trefilados em 6 passes e seguiram a seguinte ordem decrescente: 3,6mm; 3,2mm; 2,9mm; 2,6mm; 2,3mm; 2,2mm. Processo mostrado na Figura 20.

Figura 20 – Trefilação



Fonte: Produzida pelo Autor

4.2 Avaliação dos Arames Produzidos

Foram coletadas amostras de todas as etapas de conformação da fita e da última etapa de trefilação do arame para avaliação do processo de fabricação. Essas amostras foram embutidas à frio em resina acrílica e lixadas (lixa 120) para posterior avaliação metalográfica, onde as amostras foram atacadas com solução de nital 5%, com a finalidade de verificar o perfil transversal das mesmas, suas simetrias e o tipo de fechamento que o processo conformacional promoveu ao arame. Para avaliação do perfil foram realizadas macrografias com ampliação de 25 vezes, com auxílio de uma lupa estereoscópica marca Olympus, modelo SZ-ST, acoplada a uma câmera CCD Sony Hyper-HAD.

Os arames produzidos tiveram sua circularidade avaliada por meio de um micrômetro externo digital da marca Mitutoyo, modelo 293-230, com faixa de medição de 0-25mm e resolução de

0,001mm.

Outro parâmetro avaliado para verificar a continuidade da deposição do fluxo nos arames foi determinação da porcentagem em massa de fluxo presente. Foram coletadas ao longo dos arames três amostras de cem milímetros de cada formulação (Figura 20). Cada amostra foi pesada individualmente, posteriormente tiveram os fluxos removidos (Figura 21) e foram pesadas novamente.

A porcentagem em massa foi determinada por meio da Equação 1.

$$\% \textit{ massa de fluxo} = \left(1 - \frac{\textit{ massa do arame vazio}}{\textit{ massa do arame preenchido}}\right) * 100 \quad (1)$$

Figura 21 – Amostra para determinação de porcentagem em peso de fluxo – arame com fluxo



Fonte: Produzida pelo próprio Autor

Figura 22 – Amostra para determinação de porcentagem em peso de fluxo – arame sem fluxo



Fonte: Produzida pelo próprio Autor

4.3 Deposição dos Cordões de Solda

4.3.1 Equipamentos Utilizados

Para realização dos cordões de solda foi utilizada uma fonte de energia eletrônica do tipo inversora marca ESAB, modelo Aristo 5000i MV, de corrente e tensão constantes e um alimentador marca ESAB, modelo Aristo Feed 3004W M0 (Figura 23).

A máquina de soldagem citada teve sua tocha acoplada à uma estrutura adaptada e feita em tubos, e esta, foi também adaptada sobre uma tartaruga mecânica que se locomove sobre um trilho a uma velocidade constante determinada pelo operador. O procedimento foi realizado para garantir que a soldagem fosse realizada a uma velocidade e distância do bico de contato à peça constantes (Figura 25). A soldagem foi realizada sem gás de proteção.

Figura 24 – Fonte inversora e alimentador



Fonte: Produzida pelo próprio Autor

Figura 25 – Montagem sobre a tartaruga para soldagem.



Fonte: Produzida pelo próprio Autor

4.3.2 Parâmetros de Soldagem

A tocha foi adaptada de forma a permanecer a uma distância de 19mm do metal de base e a tartaruga foi programada para locomover a uma velocidade aproximada de 6,3 mm/s. Já o processo de soldagem foi configurado para ocorrer a uma corrente nominal de 210 A. Embora os parâmetros já estivessem sido determinados previamente, estes foram monitorados eletronicamente pela fonte em cada processo de soldagem. Os dados obtidos do monitoramento do processo foram utilizados para o cálculo do aporte térmico (Equação 2), onde: “*H*” é o Aporte térmico (KJ/mm), “*V*” a tensão (volt), “*n*” o índice referente ao processo de soldagem e “*v*” a velocidade (mm/s). Os parâmetros estão expostos na Tabela 4.

$$H = \frac{VIn}{v} \quad (2)$$

4.3.3 Materiais

Foram utilizados arames tubulares com três formulações distintas. A amostra T1 não possuía adição de polímero, a amostra T2 possuía adição de 7,5% em peso e a amostra T3 15%.

Os arames foram depositados sobre chapas de aço ASTM A36 com 250mm de comprimento, 12,7mm de espessura e 63,5mm de largura (Figura 26).

Figura 26 – Chapa utilizada como metal de base



Fonte: Produzida pelo Autor

4.4 Avaliação das Soldas

4.4.1 Avaliação Visual

Os cordões de solda foram avaliados em comprimento, formato, largura, continuidade, quantidade de respingos gerados ao longo do processo e escória.

Após as avaliações iniciais do metal depositado, o cordão e o metal de base foram escovados para remover as escórias e os óxidos superficiais inerentes ao processo de soldagem e à exposição ao ambiente.

4.4.2 Macrografias e Micrografias dos Cordões de Solda

Nesta etapa foram determinados os sentidos das deposições dos cordões de solda. As imagens da Figura 27 mostram que os sentidos das deposições foram da esquerda para direita. Após a determinação dos sentidos dos cordões de solda, foram escolhidas as regiões destes que apresentaram formas mais regulares, e destas foram retiradas três seções de aproximadamente

cinco milímetros de comprimento, como expostos nas Figuras 27, 28, 29 e 30, para posterior embutimento. Antes do embutimento foi determinado que as faces escolhidas para as avaliações metalográficas seriam aquelas voltadas para o início de cada cordão, como mostrado na Figura 30. O excesso de metal de base foi removido e desprezado, pois não seria avaliado metalograficamente.

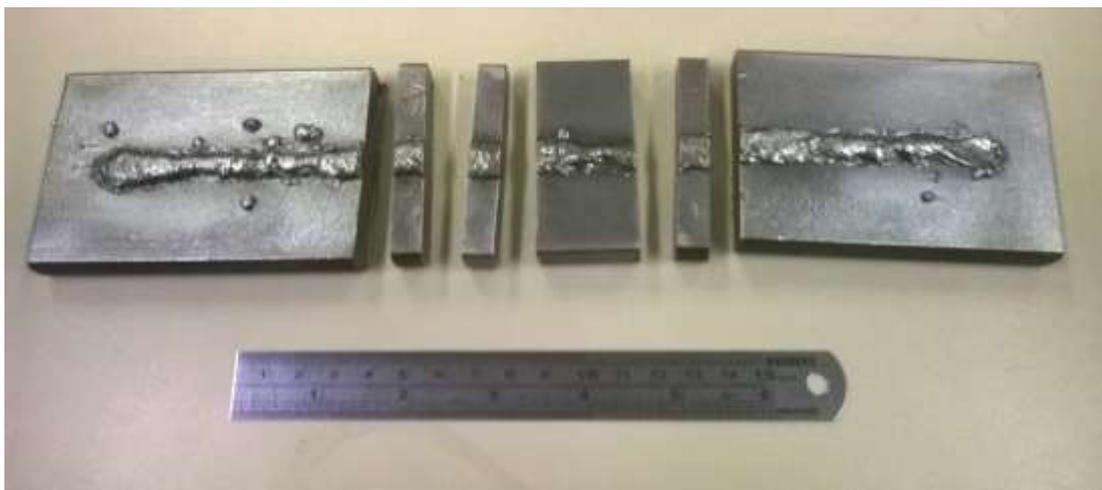
As amostras foram embutidas à quente com baquelite, lixadas (lixas 80, 240, 400, 600 e 1200) polidas com alumina 1µm e atacadas com Nital 5%. As fotografias das macrografias foram tiradas com o auxílio de uma lupa estereoscópica marca Olympus, modelo SZ-ST, acoplada a uma câmera CCD Sony Hyper-HAD. Já as fotografias das micrografias foram realizadas microscópio ótico marca Olympus, modelo BX60M, acoplado a uma câmera CCD marca Sony, modelo Hyper-HAD.

Foram avaliados também medidas da penetração, largura, reforço e diluição. Para o cálculo de diluição, as áreas do cordão correspondentes ao metal de base e ao metal de adição foram realizadas utilizando o programa Image J. Para calcular a diluição foi utilizada a Equação 3.

$$D = \frac{B}{A+B} 100 \quad (3)$$

Onde D é a diluição, B a área referente à penetração e A a área do reforço.

Figura 27 – Seções escolhidas e cortadas dos cordões de solda (T1 – 0% de polímero)



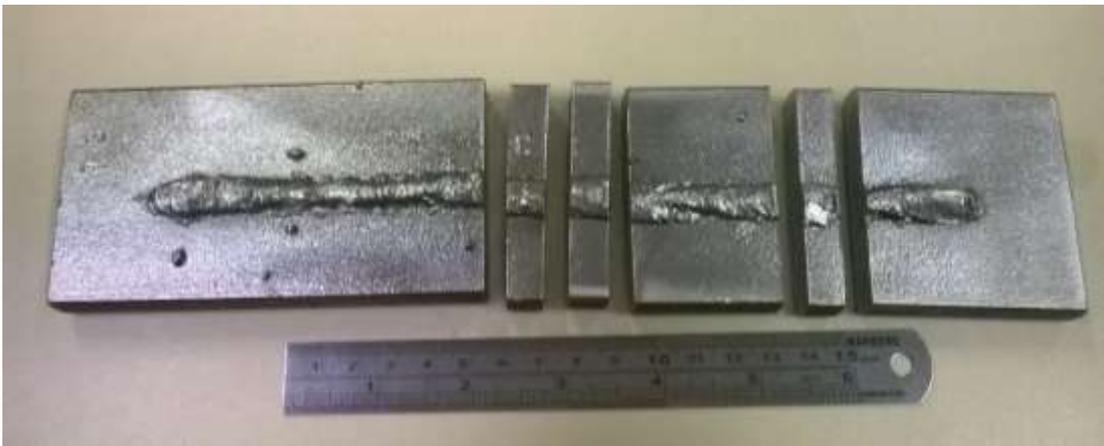
Fonte: Produzida pelo Autor

Figura 28 – Seções escolhidas e cortadas dos cordões de solda (T1 – 7,5% de polímero)



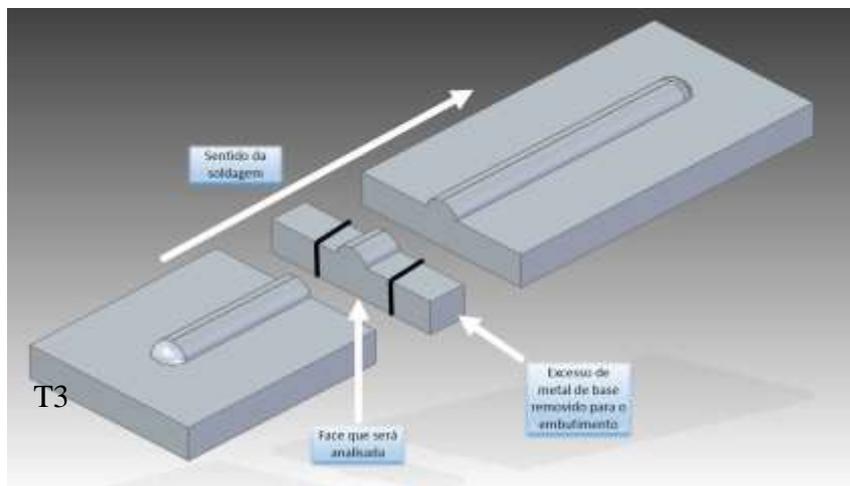
Fonte: Produzida pelo Autor

Figura 29 – Seções escolhidas e cortadas dos cordões de solda (T1 – 15% de polímero)



Fonte: Produzida pelo Autor

Figura 30 – Demonstração da escolha da face e cortes das chapas soldadas



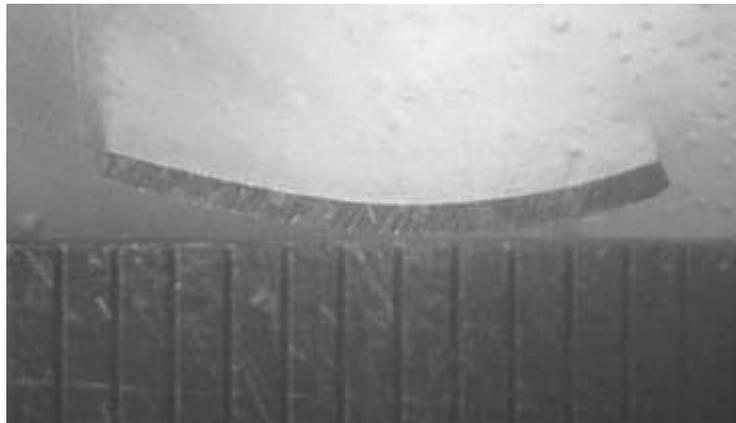
Fonte: Produzida pelo Autor

5. Resultados e discussão

5.1 Resultados do processamento

As macrografias das seções transversais das fitas expostas pelas Figuras 31, 32 e 33 mostram que há distorções dimensionais no processamento, pois todas elas estão assimétricas, embora não sejam significativas, exceto pela terceira etapa de processamento, Figura 33, onde se apresenta mais pronunciada. Estas distorções podem ter ocorrido pelos não alinhamentos perfeitos entre os pares dos roletes de laminação e entre as etapas de conformação.

Figura 31 – Primeira etapa de conformação

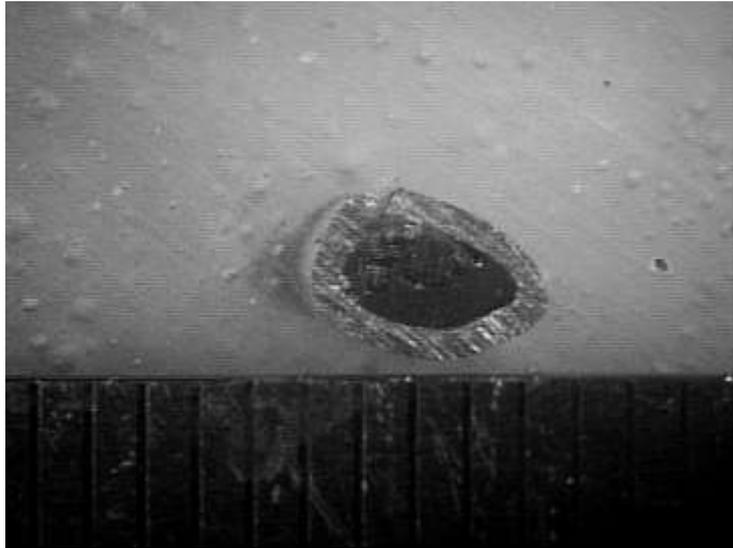


Fonte: Produzido pelo Autor

Figura 32 – Segunda etapa de conformação



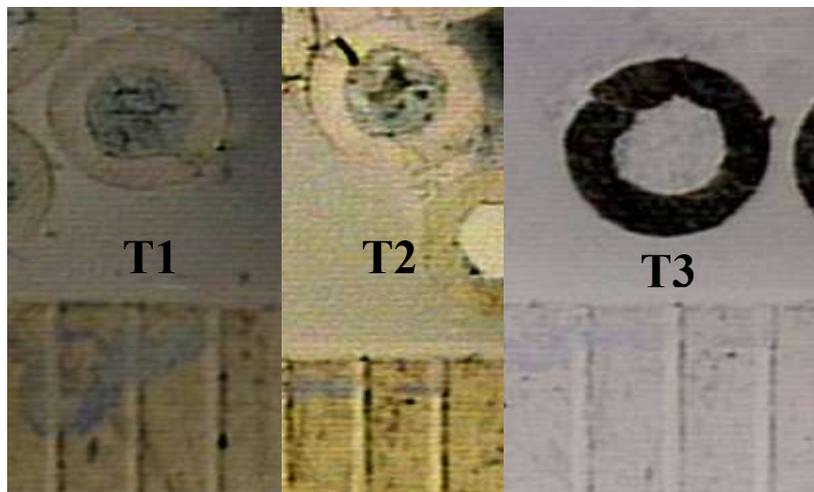
Fonte: Produzido pelo Autor

Figura 33 – Terceira etapa de conformação

Fonte: Produzido pelo Autor

A conformação demonstrada pela Figura 33 mostra a iminência de um fechamento em topo. Nesta etapa, o aspecto da conformação demonstra que não é suficiente para compactar e reter o fluxo, sobretudo pelo fechamento incompleto.

O mosaico da Figura 34 mostra o fechamento e a circularidade dos arames após a última etapa de trefilação. Fica evidenciado que há uma leve inclinação da linha de fechamento, demonstrando que de fato ocorre fechamento em topo, Figura 7 Tipo n° 2, mas com uma leve tendência ao fechamento sobreposto. Provavelmente essa tendência ocorreu devido a assimetria do processamento da fita.

Figura 34 – Fechamento dos arames

Fonte: Produzida pelo Autor

O processo de trefilação garante o fechamento do arame, embora a forma do fechamento também dependa das etapas anteriores de conformação. Isto fica evidente quando comparadas as Figuras 33 e 34. A Figura 34, mostra que o arame T1 tem um fechamento em topo, quase perfeito, enquanto T2 e T3 apresentam uma leve inclinação nos encontros de suas extremidades, uma tendência ao fechamento de sobreposição. A trefilação garante o acerto da circularidade do arame, portanto, o formato que a fita obtiver antes desse processamento influenciará também no tipo de fechamento devido à assimetria.

Um aspecto importante do processo de trefilação foi a circularidade do arame. Visualmente a Figura 34 demonstra isso, mas os resultados obtidos pela medição com micrômetro, conforme os dados da Tabela 2, confirmam este comportamento.

Tabela 2 – Medições da circularidade do arame produzido

Diâmetro dos arames (mm)			
	T1	T2	T3
	2,13	2,12	2,12
	2,12	2,12	2,12
	2,12	2,13	2,12
	2,12	2,12	2,12
	2,12	2,12	2,13
	2,13	2,12	2,12
	2,12	2,12	2,12
	2,12	2,12	2,12
	2,13	2,12	2,12
	2,12	2,13	2,13
	2,12	2,13	2,12
	2,12	2,12	2,12
	2,13	2,12	2,12
	2,13	2,12	2,11
	2,11	2,12	2,11
	2,13	2,12	2,13
	2,12	2,11	2,12
	2,12	2,12	2,12
<i>Média</i>	<i>2,12</i>	<i>2,12</i>	<i>2,12</i>
<i>Desvio Padrão</i>	<i>0,01</i>	<i>0,01</i>	<i>0,01</i>

Fonte: Produzido pelo Autor

A repetibilidade do processamento é assegurada diante dos valores médios e pela variação do desvio padrão.

Outro aspecto inerente ao processamento foi a determinação da porcentagem em massa de fluxo encontrado em cada formulação produzida. A porcentagem em massa foi calculada conforme a Equação 1 e a Tabela 3 mostram os resultados obtidos.

Tabela 3 – Resultados dos percentuais em massa dos fluxos

Fórmula	Amostra	Peso total (g)	Peso s/ fluxo (g)	% fluxo
T1	1	2,356	1,969	16,43
	2	2,355	1,917	18,60
	3	2,305	1,879	18,48
			<i>Média</i>	<i>17,84</i>
			<i>Desvio Padrão</i>	<i>1,22</i>
T2	1	2,106	1,829	13,15
	2	2,165	1,914	11,59
	3	2,004	1,765	11,93
			<i>Média</i>	<i>12,22</i>
			<i>Desvio Padrão</i>	<i>0,82</i>
T3	1	1,975	1,75	11,39
	2	2,138	1,844	13,75
	3	1,929	1,713	11,20
			<i>Média</i>	<i>12,11</i>
			<i>Desvio Padrão</i>	<i>1,42</i>

Fonte: Produzido pelo Autor

Conforme mostrado na Figura 34 percebe-se que visualmente os fluxos estão bem compactados e acomodados dentro dos arames. Além disso, os resultados obtidos de percentuais em massa mostram que o processo de alimentação apresenta uma boa continuidade no despejo de fluxo, pois os valores obtidos apresentam pequenas variações. Outro ponto, que deve ser destacado são os valores médios de porcentagem em massa. Estes estão coerentes às formulações empregadas, uma vez que a adição de polímero implica em menor densidade de fluxo.

5.2 Resultados do processo de soldagem

O monitoramento eletrônico de soldagem, Tabela 4, mostra que não houve variação no valor médio de corrente, coincidindo com o nominal. Os valores de tensão apresentaram variação, mas não podem ser relacionados à presença de polímero, pois não apresentaram uma relação com os percentuais desse nas formulações. Os valores de velocidade apresentaram baixa variação entre si. Com os dados obtidos foram calculados os aportes térmicos dos processos das amostras. Os resultados obtidos mostram uma tendência à diminuição do aporte térmico com o aumento da concentração do polímero.

Tabela 4 – Dados do processo de soldagem

Fórmula	Corrente (A)	Tensão (V)	Tempo (s)	Comprimento (mm)	Velocidade (mm/s)	<i>n</i>	Aporte térmico (KJ/mm)
T1	210	26,25	34	205	6,02	0,9	0,82
T2	210	25,5	35	219	6,26	0,9	0,77
T3	210	26,15	33	213	6,45	0,9	0,76

Fonte: Produzida pelo Autor

O processo de soldagem apresentou, como esperado, características inerentes aos eletrodos revestidos celulósicos, sendo: elevada produção de fumos devido às presenças de materiais orgânicos na composição dos fluxos, pouca escória e de fácil remoção, muitos respingos e arco elétrico instável. As Figuras 35, 36 e 37 demonstram algumas das características citadas, principalmente a quantidade de respingos.

Os cordões não apresentaram regularidade em largura. As Figuras 35, 36 e 37 mostram que ao longo dos comprimentos de todos os cordões apresentam regiões mais finas e outras mais largas. Durante o processo de soldagem dos cordões ocorreram momentos em que os arames tocaram o metal de base antes de sua fusão completa. Portanto, provavelmente, esses toques podem ser a causa das descontinuidades.

Figura 35 – Cordão da formulação T1 (0% de adição de polímero)



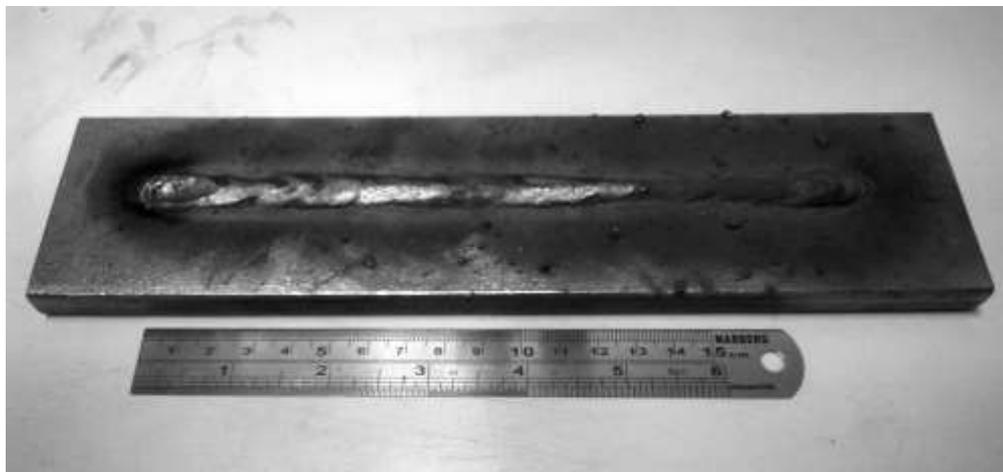
Fonte: Produzida pelo Autor

Figura 36 – Cordão da formulação T2 (7,5% de adição de polímero)



Fonte: Produzida pelo Autor

Figura 37 – Cordão da formulação T3 (15% de adição de polímero)



Fonte: Produzida pelo Autor

As Figuras 38, 39 e 40 expõem melhor as formas dos cordões, pois foram escovados, e nelas é possível para notar diferenças, além das formas dos cordões, como citado anteriormente, nos respingos provenientes da soldagem. A Figura 38, referente a formulação T1, apresentou respingos mais grosseiros, em detrimento às formulações T2 e T3, Figuras 39 e 40 respectivamente. Foi notado que a presença de polímero nos arames suavizava o arco elétrico, conferindo maior estabilidade ao processo. Embora a diferença não seja tão destoante, é perceptível a diferença nos respingos das formulações T2 e T3, pois, além da diferença entre presença ou não presença de polímero, a quantidade deste também implicou no comportamento do arco. A maior presença contribui para estabilizar ainda mais o arco.

Figura 38 – Cordão da formulação T1 (0% de adição de polímero)



Fonte: Produzida pelo Autor

Figura 39 – Cordão da formulação T1 (7,5% de adição de polímero)



Fonte: Produzida pelo Autor

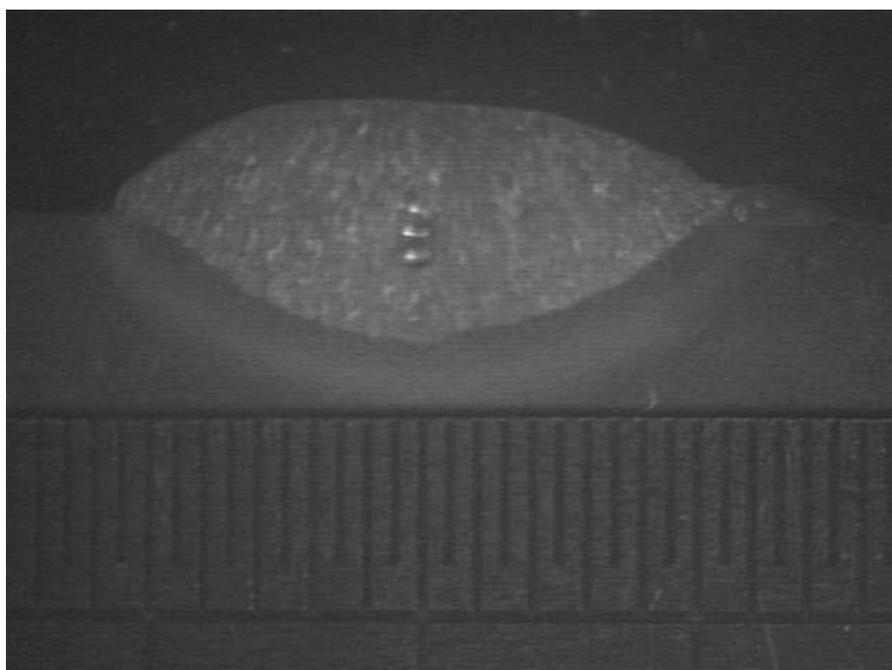
Figura 40 – Cordão da formulação T1 (15% de adição de polímero)



Fonte: Produzida pelo Autor

As macrografias realizadas nos cordões, Figuras de 41 a 49, mostram que há uma diversidade de formas, condizendo com as observações colocadas anteriormente em relação as descontinuidades do cordão.

Figura 41 – Seção transversal da Fórmula T1/Amostra 1



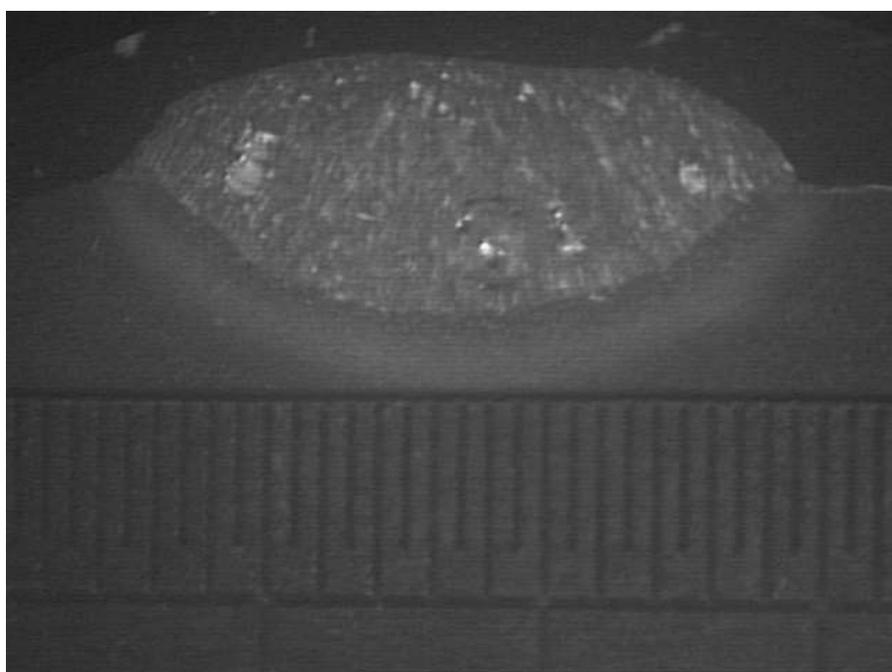
Fonte: Produzida pelo autor

Figura 42 – Seção transversal da Fórmula T1/Amostra 2



Fonte: Produzida pelo Autor

Figura 43 – Seção transversal da Fórmula T1/Amostra 3



Fonte: Produzida pelo Autor

As macrografias do cordão de solda da formulação T1, Figuras 41, 42 e 43, apresentaram poucas variações em formas e em todas foram detectadas presenças de poros

devido ao aprisionamento de gases provenientes do processo.

Figura 44 – Seção transversal da Fórmula T2/Amostra 1



Fonte: Produzida pelo Autor

Figura 45 – Seção transversal da Fórmula T2/Amostra 2



Fonte: Produzida pelo Autor

Figura 46 – Seção transversal da Fórmula T2/Amostra 3



Fonte: Produzida pelo Autor

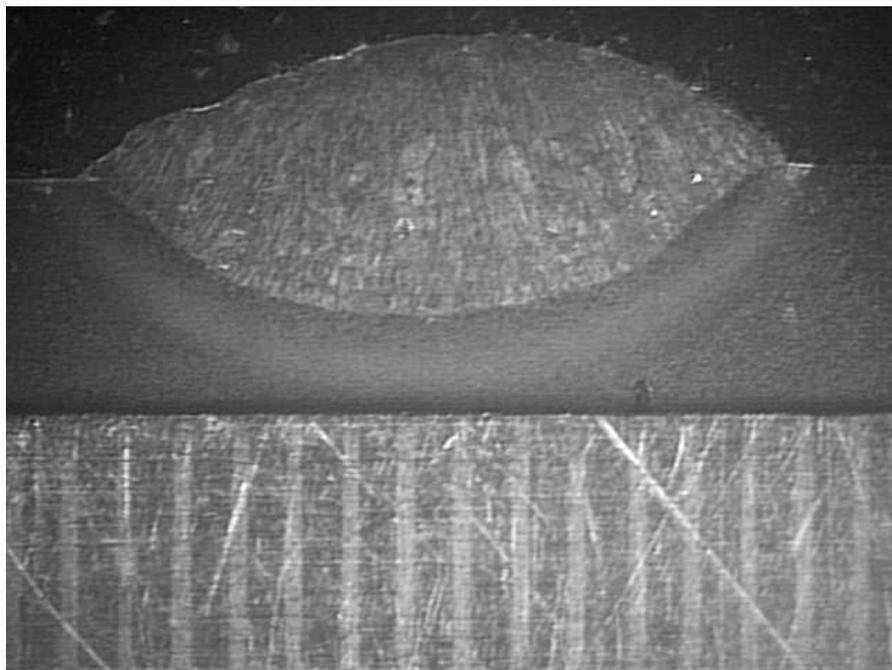
Entre as amostras analisadas, as de formulação T2, Figuras 44, 45 e 46, foram as que apresentaram maior variação em forma. Assim como ocorreu na amostra T1, também foram detectadas presenças de poros, pelo mesmo motivo da formulação T1.

Figura 47 – Seção transversal da Fórmula T3/Amostra 1



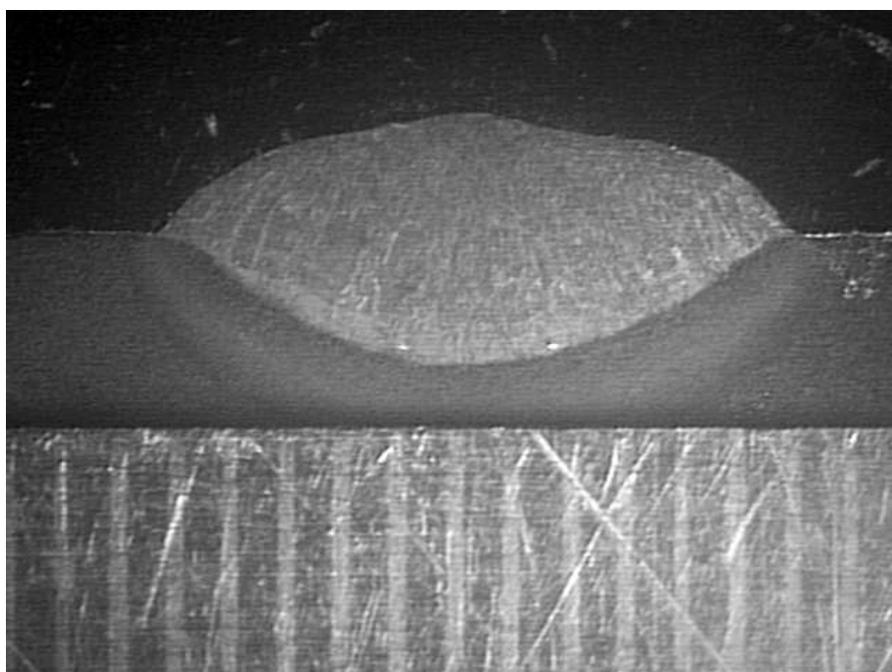
Fonte: Produzida pelo Autor

Figura 48 – Seção transversal da Fórmula T3/Amostra 2



Fonte: Produzida pelo Autor

Figura 49 – Seção transversal da Fórmula T3/Amostra 3



Fonte: Produzida pelo Autor

As amostras da formulação T3 tiveram pouca variação de forma e apresentaram poros. Os dados dos cordões obtidos pelas imagens das macrograficas estão explicitados pelas Tabelas 5, 6 e 7.

Tabela 5 – Resultados das medições das macrografias de T1

Fórmula	Amostra	Reforço (mm)	Penetração (mm)	Largura (mm)	Área penetração (mm ²)	Área total (mm ²)	Diluição (%)
T1	1	2,12	2,37	11,13	17,04	31,54	54,01
	2	2,06	2,26	10,92	15,78	32,63	48,37
	3	2,37	2,32	11,90	18,10	32,85	55,09
Média		2,18	2,32	11,32	16,97	32,34	52,49
Desvio Padrão		0,16	0,06	0,52	1,16	0,70	3,61

Fonte: Produzida pelo Autor

Tabela 6 – Resultados das medições das macrografias de T2

Fórmula	Amostra	Reforço (mm)	Penetração (mm)	Largura (mm)	Área penetração (mm ²)	Área total (mm ²)	Diluição (%)
T2	1	2,05	2,47	11,17	15,51	32,68	47,46
	2	2,01	2,40	11,09	15,41	32,51	47,41
	3	2,07	2,42	9,97	15,50	28,60	54,20
Média		2,04	2,43	10,74	15,48	31,26	49,69
Desvio Padrão		0,03	0,04	0,67	0,05	2,31	3,91

Fonte: Produzida pelo Autor

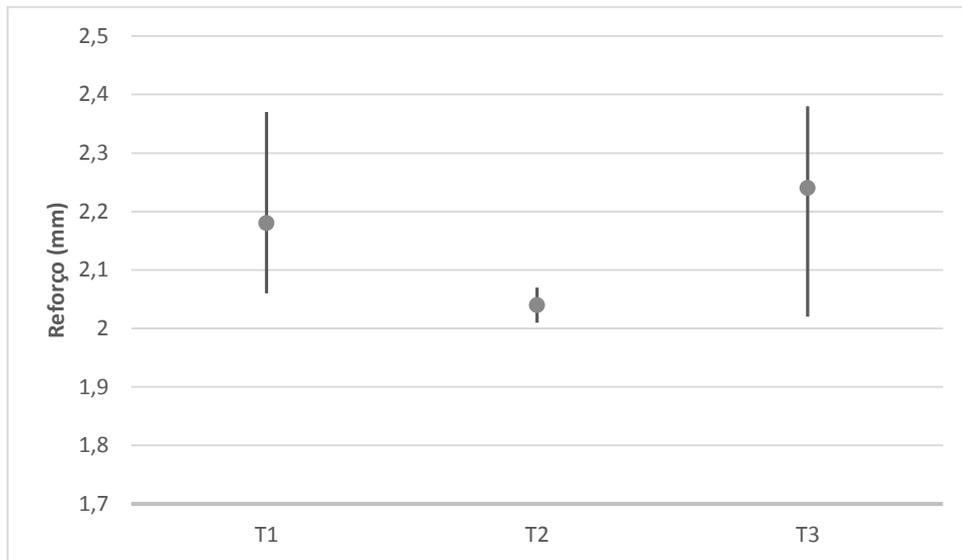
Tabela 7 – Resultados das medições das macrografias de T3

Fórmula	Amostra	Reforço (mm)	Penetração (mm)	Largura (mm)	Área penetração (mm ²)	Área total (mm ²)	Diluição (%)
T3	1	2,02	2,52	10,74	18,05	33,58	53,76
	2	2,32	2,44	12,95	22,97	44,75	51,32
	3	2,38	2,59	12,24	19,25	39,50	48,72
Média		2,24	2,52	11,98	20,09	39,28	51,27
Desvio Padrão		0,40	0,08	1,13	2,56	5,59	2,52

Fonte: Produzida pelo Autor

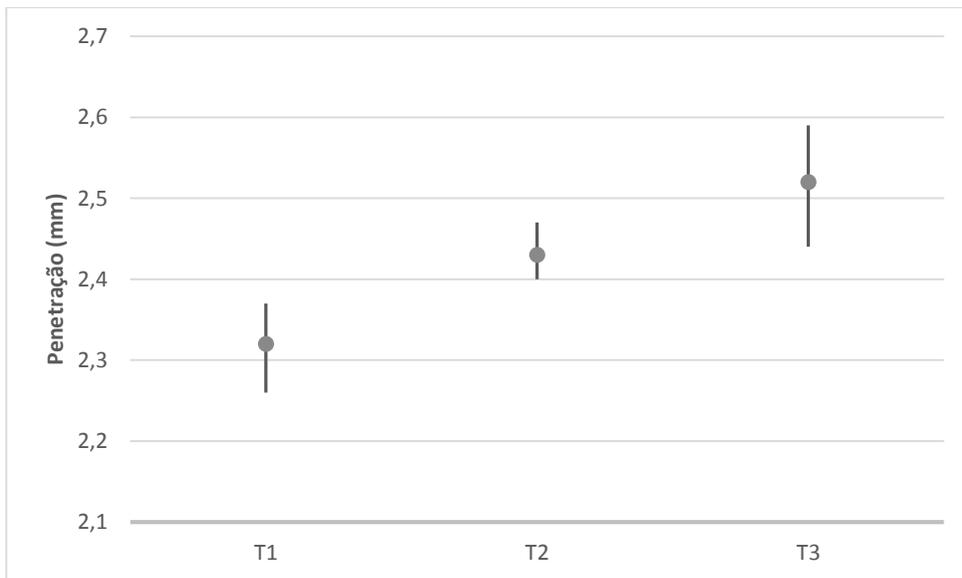
Os dados das Tabelas 5, 6 e 7 permitiram gerar os gráficos das Figuras 50, 51, 52 e 53. Os gráficos das Figuras 50, 52 e 53 mostram que não há relações, mesmo que qualitativa, entre o percentual de polímero e o reforço, largura e diluição. Entretanto, o gráfico da figura 51 mostra, por meio dos valores médios, uma tendência crescente em penetração com o aumento do percentual de polímero. A penetração aumenta devido à presença de compostos orgânicos que potencializam a penetração do metal de adição (T. Boniszewski, 1979).

Figura 50 – Variações das medidas de reforços dos cordões de solda



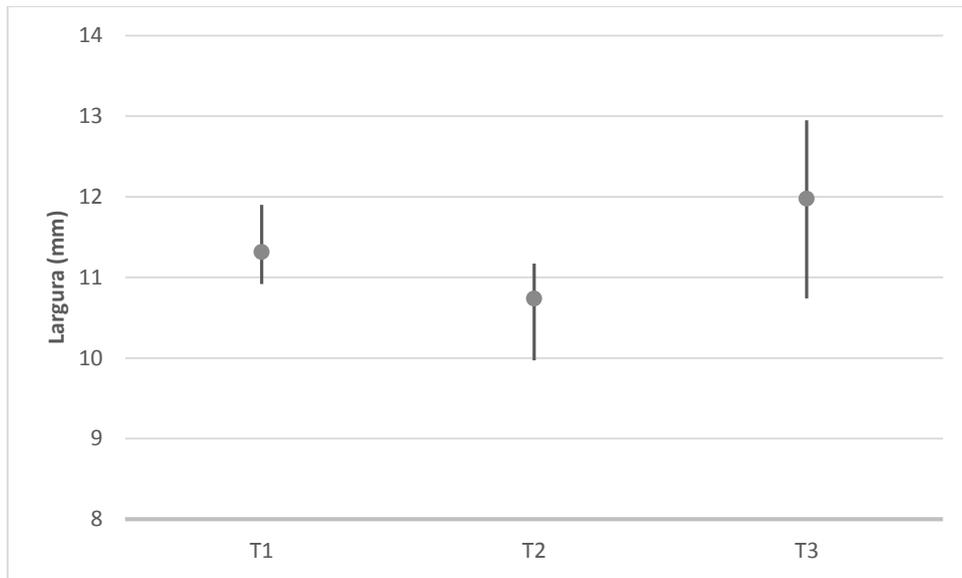
Fonte: Produzido pelo Autor

Figura 51 – Variações das medidas de penetrações dos cordões de solda



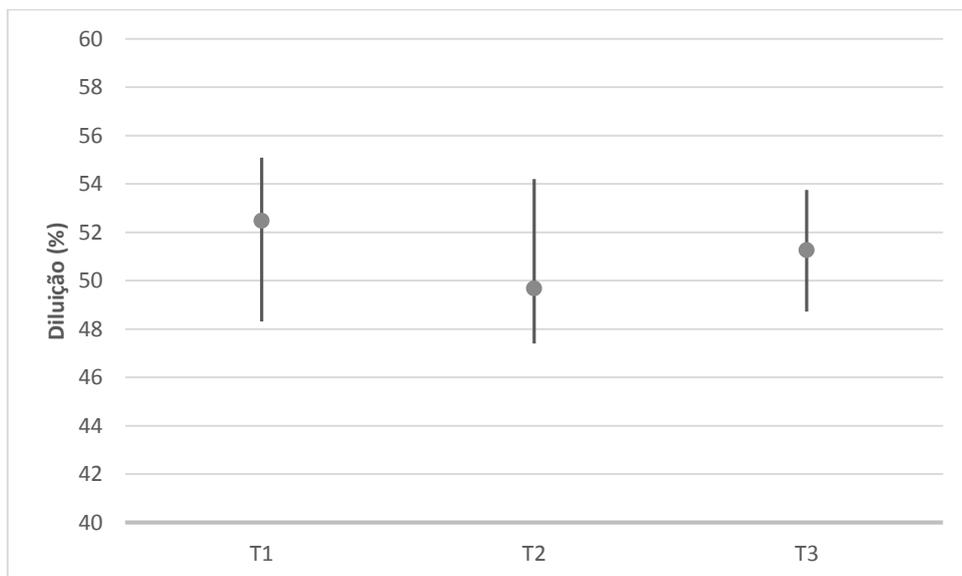
Fonte: Produzido pelo Autor

Figura 52 – Variações das medidas de larguras dos cordões de solda



Fonte: Produzido pelo Autor

Figura 53 – Variações das medidas de diluições dos cordões de solda



Fonte: Produzido pelo Autor

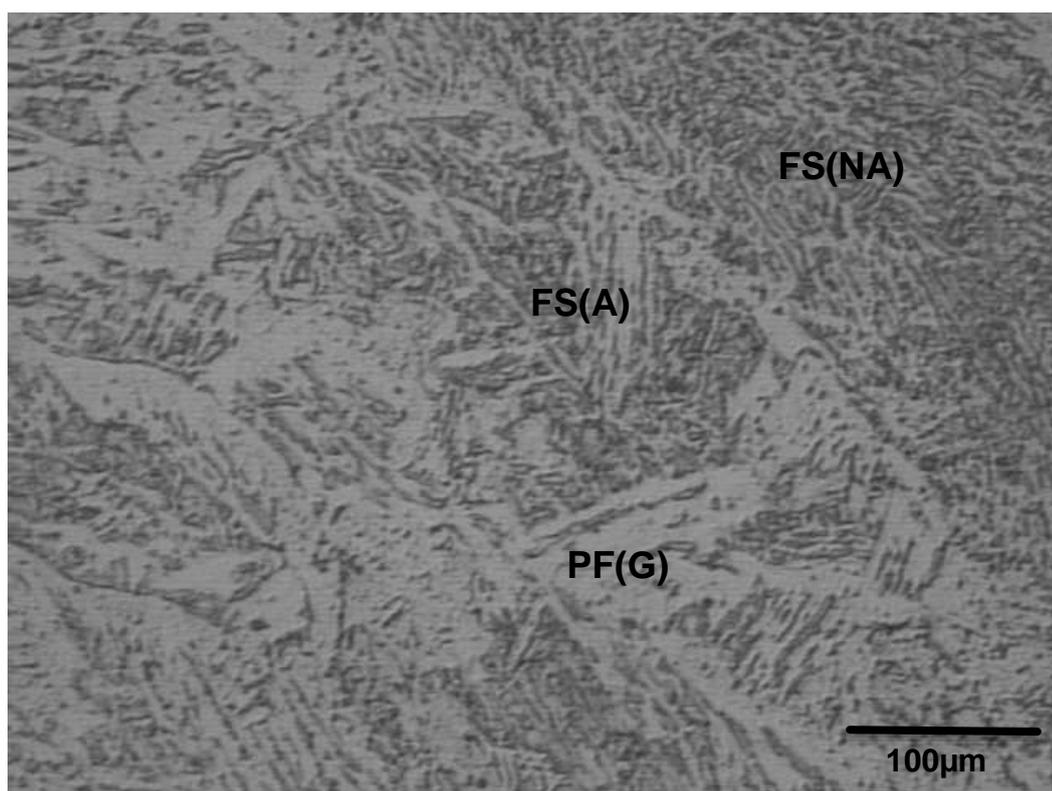
De acordo com o observado nas Figuras 50 e 52 não foi possível observar relação entre o reforço e a largura com o teor de polímero do arame tubular. Verificou-se também que os valores destas grandezas apresentaram grande dispersão. Tal fato pode ser associado a irregularidade observadas nos cordões de solda produzidos. Contudo, conforme indicado na Figura 51, o aumento do teor de polímero indicou uma tendência de aumento da penetração nos cordões de solda. Este fato está de acordo com o relatado por VAZ(2014) para eletrodos

revestidos onde este polímero foi empregado como aglomerante.

No Figura 53 nota-se que o aumento na penetração não refletiu em aumento nas diluições dos cordões de solda.

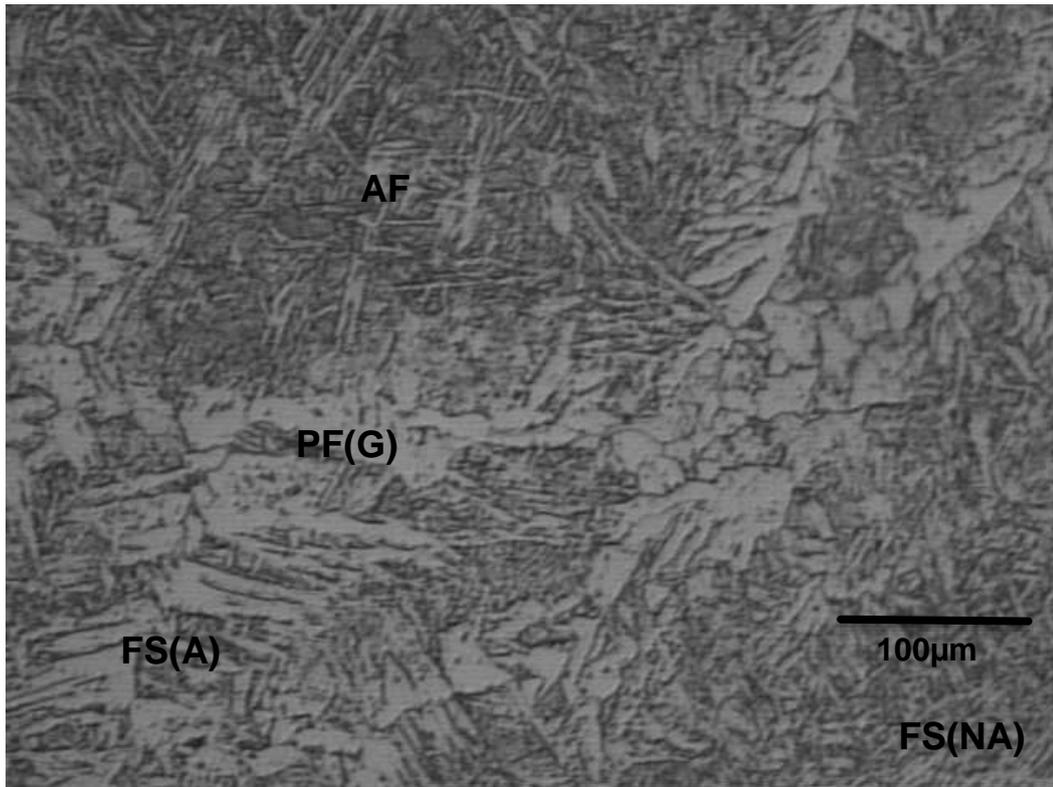
As imagens de micrografia, Figuras 54 a 59, não apresentaram diferenças significativas a ponto de concluir que a presença do polímero influenciasse na fração volumétrica dos constituintes presentes, pelo menos, qualitativamente. Os constituintes ferrita de segunda fase alinhada (FS(A)), ferrita de segunda fase não alinhada (FS(NA)), ferrita primária de contorno de grão (PF(G)) e ferrita acicular (AF) foram encontrados em todas as formulações, com exceção da ocorrência de ferrita primária intragranular (PF(I)) apenas na formulação T3, Figuras 58 e 59.

Figura 54 – Micrografia da Formulação T1 (ampliação de 500 vezes)



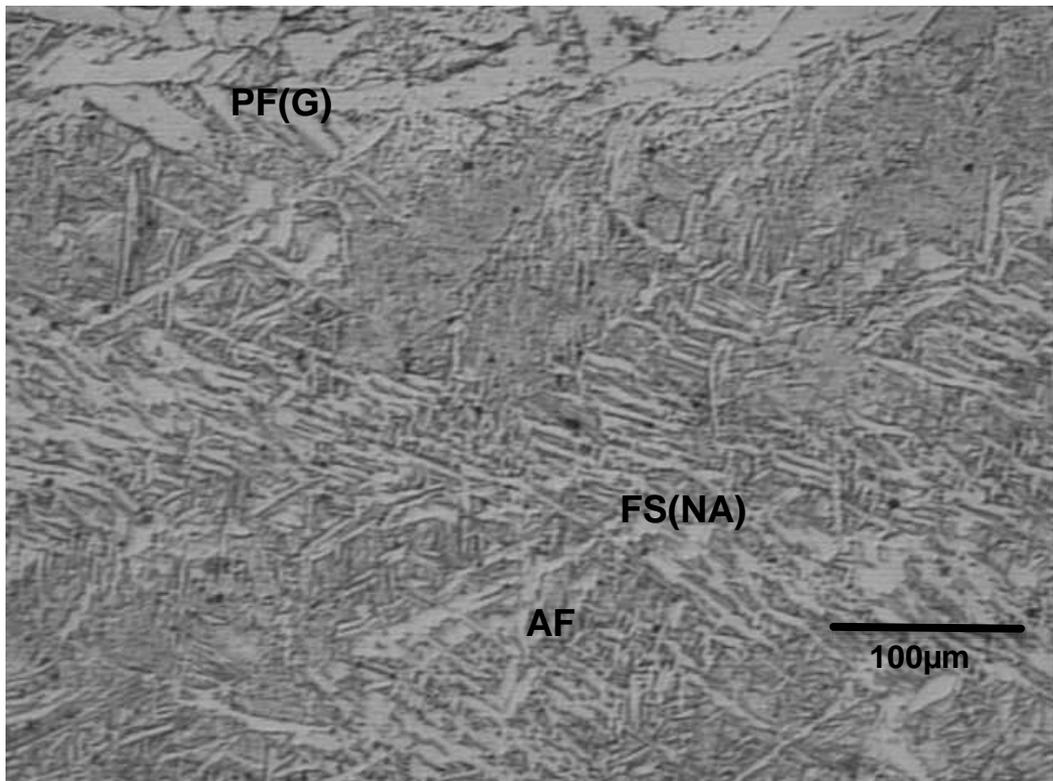
Fonte: Produzida pelo Autor

Figura 55 – Micrografia da Formulação T1 (ampliação de 500 vezes)



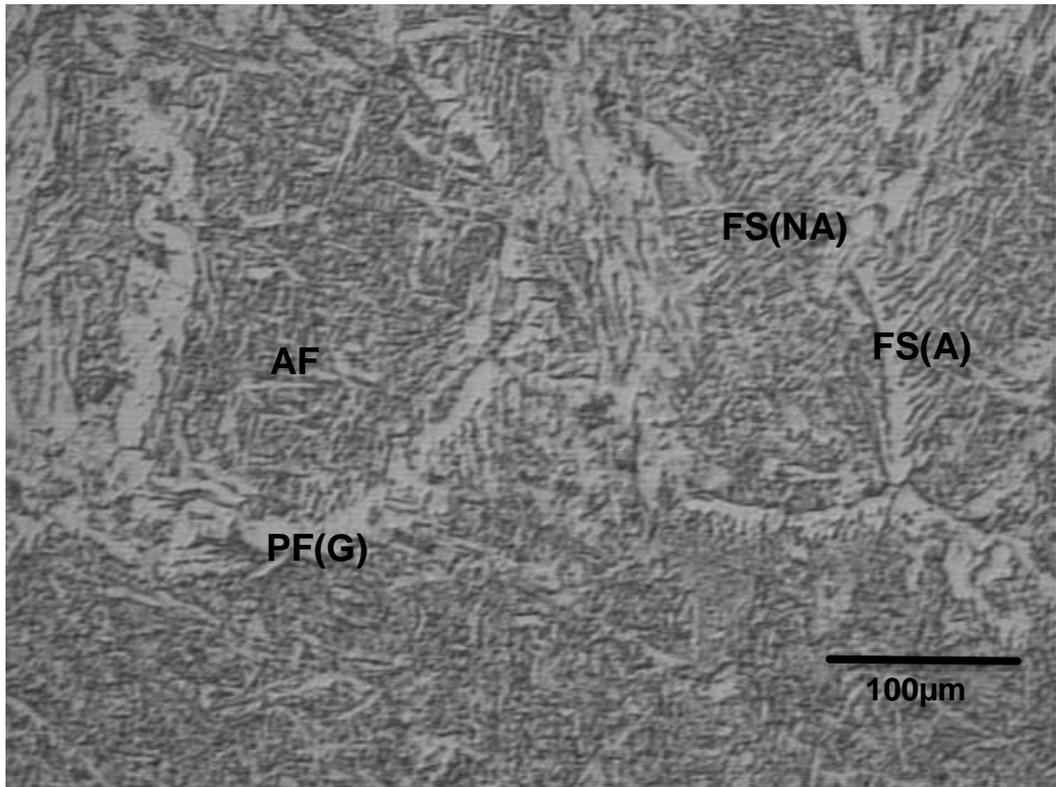
Fonte: Produzida pelo Autor

Figura 56 – Micrografia da Formulação T2 (ampliação de 500 vezes)



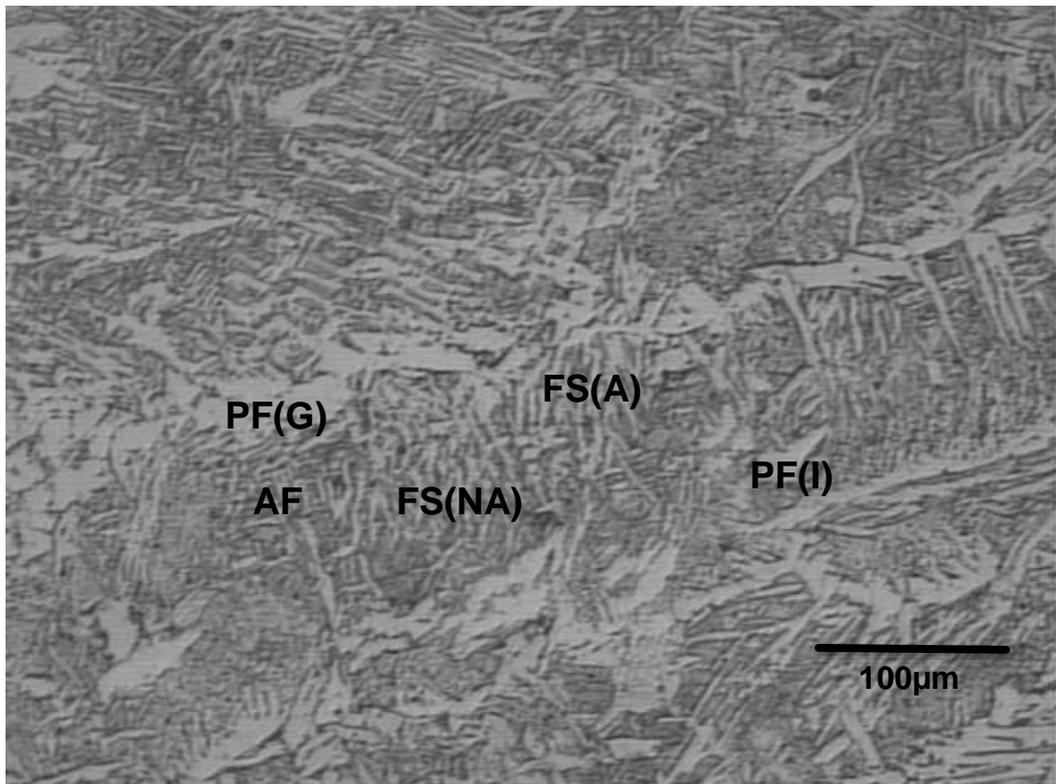
Fonte: Produzida pelo Autor

Figura 57 – Micrografia da Formulação T2 (ampliação de 500 vezes)



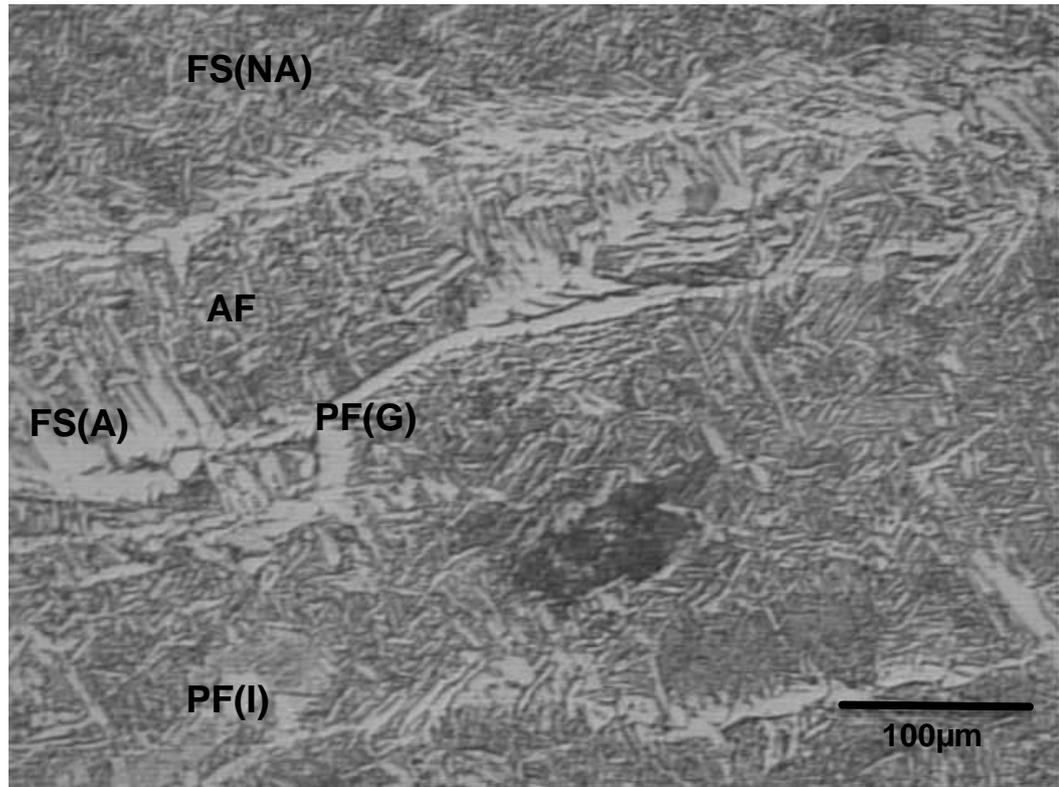
Fonte: Produzida pelo Autor

Figura 58 – Micrografia da Formulação T3 (ampliação de 500 vezes)



Fonte: Produzida pelo Autor

Figura 59 – Micrografia da Formulação T3 (ampliação de 500 vezes)



Fonte: Produzida pelo Autor

6. Conclusões

Os experimentos realizados durante este trabalho permitem concluir que:

- Os processos empregados nas conformações da fita para fabricação de arame tubular são suficientemente eficientes para a produção deste, sobretudo pelos aspectos do produto final, destacando-se a circularidade, a forma de fechamento em topo e a acomodação do fluxo em seu interior, avaliado através do percentual de fluxo medido permitiu verificar este aspecto;
- Não foram observadas diferenças destoantes e conclusivas entre as amostras analisadas de arames tubulares celulósicos com adição de polímero e sem polímero com relação as dimensões dos cordões. Exceção à penetração, pois observou-se que o aumento do teor de constituintes orgânicos possibilitou uma tendência a maior penetração;
- Os constituintes encontrados são típicos de metais de solda ferríticos e a presença do polímero não promoveu, qualitativamente, diferenças significativas nas microestruturas.

7. Sugestões para trabalhos futuros

- Avaliar a circunferência interna dos arames;
- Avaliar influências do encruamento no processamento de arame tubular;
- Realizar ensaios para determinar o teor de hidrogênio difusível no metal de solda;
- Realizar ensaios cromatográficos para avaliar os gases produzidos pelo processo de soldagem;
- Realizar deposição de mais cordões de solda para aumentar o número de amostras analisadas;
- Realizar análise metalográfica quantitativa do metal de solda;
- Realizar deposição de cordões de solda utilizando gases de proteção para avaliar o seu efeito sobre a soldabilidade e demais propriedades;
- Realizar a análise química do metal de solda produzido pelos arames tubulares;
- Produzir corpos de prova para avaliação das propriedades mecânicas do metal de solda;
- Realizar ajustes de formulação para melhorar a soldabilidade, ajustar a composição química do metal de solda e propriedades mecânicas.

Referências

Universidade Federal de Minas Gerais. Laboratório de Robótica, Soldagem e Simulação (Belo Horizonte, Minas Gerais). Alexandre Queiroz Bracarense. **Arame Tubular Celulósico para Soldagem**. BR n. PI 1020140085459, 9 de abr. 2014, 08 de dezembro de 2015.

MARQUES, Paulo Villani; MODENESI, Paulo José; BRACARENSE, Alexandre Queiroz. **Soldagem: fundamentos e tecnologia**. 3. ed. atual. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2009.

OLIVEIRA, Bernardo Venturini. **Desenvolvimento, construção e montagem de equipamento para fabricação do arame tubular para soldagem**. Belo Horizonte: UFMG, 2010.

PÉRES, Manuel Rodríguez; GONZÁLEZ, Lorenzo Perdomo. **“Maquina experimental para la fabricacion de alambres tubulares.”** CAPES/MES, 2010

ESAB. **Apostila de Arames Tubulares**. Última revisão, 2004. Belo Horizonte, 2004.

ESAB. **Apostila de Eletrodos Revestidos**. Última revisão, 2005. Belo Horizonte, 2005.

VAZ, C.T.; BRACARENSE, A.Q.; FELIZARDO, I.; PESSOA, E.C.P.; **Impermeable low hydrogen covered electrodes: weld metal, slag and fume evaluation**. Journal of Materials Research and Technology. Vol. 1(2), 2012, p.64-70.

VAZ, Cláudio Turani. **Influência do polímero utilizado como aglomerante em eletrodos revestidos básicos sobre a formação de ferrita acicular no metal de solda**. Tese de Doutorado. Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica da UFMG, 2014.