

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

COMPARAÇÃO ENTRE O COMPORTAMENTO DE ELETRODOS REVESTIDOS
UTILIZANDO DISPOSITIVOS DE SOLDAGEM POR GRAVIDADE E COM CONTROLE
AUTOMÁTICO DO COMPRIMENTO DO ARCO ELÉTRICO

por

Carlos André Nobre Cavalcanti

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, Junho de 2011.

COMPARAÇÃO ENTRE O COMPORTAMENTO DE ELETRODOS REVESTIDOS
UTILIZANDO DISPOSITIVOS DE SOLDAGEM POR GRAVIDADE E COM CONTROLE
AUTOMÁTICO DO COMPRIMENTO DO ARCO ELÉTRICO

por

Carlos André Nobre Cavalcanti

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Arnaldo Rubén Gonzalez
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Projeto e Fabricação**

Orientador: Prof. José Antônio Esmerio Mazzaferro

Co-Orientador: Prof. Carlos René Gómez Pérez, UCLV – CUBA

Comissão de Avaliação:

Prof. Flávio José Lorini

Prof. Darci Barnech Campani

Prof. Ivan Guerra Machado

Porto Alegre, 01 de Julho de 2011.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi realizado por meio da compreensão e colaboração de várias pessoas. Dentre as quais eu gostaria de agradecer:

Aos meus familiares, pelo apoio, carinho e compreensão durante este período.

Aos professores envolvidos neste trabalho, que contribuíram com seu conhecimento.

Aos amigos e colegas, pela ajuda prestada durante esses meses de dedicação.

Também gostaria de agradecer ao Laboratório de Soldagem e Técnicas Conexas (LS&TC) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul pelo apoio na realização deste trabalho.

CAVALCANTI, C. A. **Comparação entre o comportamento de eletrodos revestidos utilizando dispositivos de soldagem por gravidade e com controle automático do comprimento do arco elétrico.** 2011. 21 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo o estudo comparativo entre o comportamento de eletrodos utilizados no processo de Soldagem a Arco com Eletrodos Revestidos (*Shielded Metal Arc Welding* – SMAW), utilizando um dispositivo de soldagem por gravidade e um dispositivo com controle automático do comprimento do arco elétrico. Quando se pretende caracterizar propriedades operacionais específicas de determinado tipo de eletrodo revestido, procura-se evitar a variabilidade associada à operação manual realizada pelo soldador e assegurar a repetitividade nos diversos experimentos através da utilização de dispositivos de soldagem. Tais dispositivos têm duas concepções principais: por gravidade ou com controle da tensão durante a soldagem. O presente trabalho trata da comparação do comportamento de eletrodos revestidos comerciais quando depositados com estes dois tipos de dispositivos. Para atingir este objetivo, foram projetados, fabricados e testados diferentes concepções de dispositivos de soldagem por gravidade. Foi selecionado o dispositivo mais adequado e realizada por meio deste, a deposição de cordões de solda sobre chapas de aço ao carbono utilizando eletrodos revestidos rútilicos E6013 e básicos E7018 de 3,25 mm, com diferentes correntes de soldagem. Os cordões resultantes foram avaliados através de inspeção visual, cálculo da taxa e eficiência de deposição para cada situação. Os mesmos experimentos foram realizados com um dispositivo de soldagem com controle automático do comprimento do arco elétrico, respeitando os mesmos parâmetros operacionais utilizados com o dispositivo por gravidade. Chegou-se a conclusão que o peso do componente móvel do dispositivo de soldagem por gravidade é significativo para sua eficiência durante o processo e que os eletrodos E7018 obtiveram melhores resultados com os dois dispositivos que os eletrodos E6013. Foi observado que o aspecto visual dos cordões realizados com o dispositivo com controle automático do arco elétrico apresentou melhores resultados. No entanto, o dispositivo de soldagem por gravidade obteve melhores taxas e eficiência de deposição utilizando os eletrodos básicos. Em relação ao comportamento elétrico durante a soldagem com o dispositivo por gravidade, observou-se boa repetitividade no processo permitindo sua utilização em estudos relacionados às características operacionais de eletrodos com distintos revestimentos.

PALAVRAS-CHAVE: Eletrodo Revestido; Soldagem por Gravidade; Controle Automático do Comprimento do Arco; Estabilidade do Arco.

CAVALCANTI, C. A. **Comparison between the behavior of covered electrodes using gravity and automatic arc length control devices.** 2011. 21 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

ABSTRACT

The present work aims to compare the behavior of coated electrodes used in the Shielded Metal Arc Welding Process – SMAW, using gravity and an automatic arc length control devices. To characterize specific operational properties of different types of covered electrodes, it is necessary to avoid the variations produced by the welder manual operation and assure the repeatability of conditions using welding devices. These devices have two main conceptions: by gravity or using automatic voltage control devices. This work deals with the behavior comparison of commercial covered electrodes using these two kinds of devices. In order to reach this aim, different gravity welding devices were projected, manufactured and tested. The most suitable device was selected to perform bead on plate welds over carbon steel sheets, utilizing rutile (E6013) and basic (E7018) 3.25 mm covered electrodes. The resulting welds were evaluated by visual inspection and evaluation of deposition rate and efficiency to each situation. The same experiments were made with the automatic control device of the electric arc length, observing the same operational parameters utilized with gravity welding devices. It was concluded that the movable component weight of the gravity welding device is significant to its efficiency during the process and that the E7018 electrodes had better results with both devices than the E6013 electrodes had. Besides it was observed that the visual aspect of the weld made with the automatic control device of the electric arc had better results. However, the gravity welding device had better rates and deposition efficiency using basic electrodes. In relation to the electric behavior during the welding with gravity device it was observed good repetitivity in the process, which makes possible its use in studies related to the operational characteristics of the electrodes with different coatings.

KEYWORDS: Covered Electrodes; Gravity Welding; Automatic Arc Length Control; Arc Welding Stability

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	1
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
3.1. Processo de Soldagem com Eletrodos Revestidos.....	2
3.2. Automação do Processo.....	2
3.3. Variáveis do Processo	3
4. METODOLOGIA.....	4
4.1. Projeto e Fabricação do Dispositivo de Soldagem.....	4
4.2. Análise do Dispositivo de Soldagem por Gravidade.....	8
4.3. Análise Utilizando o Dispositivo com Controle do Arco Elétrico	9
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	10
5.1. Inspeção Visual dos Cordões	10
5.2. Cálculo da Taxa e Eficiência de Deposição	11
5.3. Comportamento Elétrico do Dispositivo de Soldagem por Gravidade	14
6. CONCLUSÕES	15
7. SUGESTÕES SOBRE TRABALHOS FUTUROS	16
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	16
APÊNDICE 1 – Histogramas de Frequência da Tensão do Arco Elétrico e da Corrente.....	17
APÊNDICE 2 – Evolução do Dispositivo de Soldagem por Gravidade	18
ANEXO	21

1. INTRODUÇÃO

O campo de aplicação dos eletrodos revestidos é na atualidade, um dos mais vastos entre os processos de soldagem. Isso é possível devido a sua simplicidade, versatilidade e baixo custo. A variedade de procedimentos aplicáveis é também muito ampla, abrange desde o mais simples serviço de ponteamto até o mais rígido controle na fabricação de vasos de pressão para usinas nucleares. Como consequência desta variedade de procedimentos, existe no mercado uma variedade de eletrodos cujo revestimento determina as características operacionais para diferentes materiais e diferentes propriedades mecânicas desejadas [Marques, 1991].

Quando se pretende caracterizar propriedades operacionais específicas de determinado tipo de eletrodo revestido como estabilidade do arco, por exemplo, procura-se evitar a variabilidade associada ao comportamento do soldador e assegurar a repetitividade nos diversos experimentos através da utilização de dispositivos de soldagem. Tais dispositivos têm duas concepções principais: por gravidade ou com controle da tensão durante a soldagem. Uma questão frequentemente levantada diz respeito às vantagens ou campo de aplicação de cada método e possibilidade de alteração nas grandezas que se deseja analisar.

O presente trabalho trata da comparação do comportamento de eletrodos revestidos comerciais quando utilizados com estes dois tipos de dispositivos. Para este fim, foi projetado, fabricado e testado no Laboratório de Soldagem e Técnicas Conexas (LS&TC) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, um dispositivo de soldagem por gravidade onde o arco elétrico se mantém aberto durante o processo somente em função das propriedades químicas e termoeletricas dos revestimentos dos eletrodos, permitindo a análise do comportamento dos parâmetros elétricos do arco durante a soldagem sem as interferências características do processo manual [Rodríguez, 2009].

Uma análise comparativa entre os dispositivos por gravidade e por controle da tensão baseada na taxa e rendimento de deposição e em inspeção visual dos cordões obtidos, permite a avaliação das características operacionais dos distintos revestimentos dos eletrodos utilizados.

2. OBJETIVOS

Este trabalho tem por finalidade o estudo comparativo das características operacionais de eletrodos revestidos do tipo básico e rutilico por meio da análise do comportamento elétrico, da taxa e do rendimento de deposição e da análise visual dos cordões obtidos por meio de distintos dispositivos de soldagem que anulem grandes variações indesejáveis no arco elétrico durante o processo de soldagem. Para cumprir com essa finalidade, o presente trabalho tem como objetivos específicos:

1 - Projetar, fabricar e testar diferentes tipos de dispositivos de soldagem por gravidade para o processo de Soldagem ao Arco por Eletrodos Revestidos (SMAW).

2 - Selecionar o dispositivo de soldagem por gravidade que apresentar melhor desempenho operacional na soldagem de eletrodos revestidos do tipo básico e rutilico de 3,25 mm de diâmetro.

3 - Realizar um estudo experimental, variando os ângulos de trabalho do dispositivo escolhido e os valores extremos de corrente para os eletrodos utilizados, que permitam avaliar o efeito das características construtivas sobre o desempenho dos mesmos durante o uso.

4 - Comparar os resultados obtidos por meio do dispositivo fabricado com os resultados obtidos utilizando um dispositivo automático com controle do comprimento do arco elétrico, utilizando parâmetros operacionais semelhantes.

5 - Avaliar o comportamento elétrico durante a deposição de cordões de solda utilizando o dispositivo de soldagem por gravidade por meio da aquisição de dados referentes à tensão do arco elétrico e à corrente de soldagem durante o processo.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Processo de Soldagem com Eletrodos Revestidos

A soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido (*Shielded Metal Arc Welding – SMAW*), também conhecida como soldagem manual a arco elétrico (*Metal Manual Arc – MMA*), é um dos processos de soldagem mais largamente empregados por ser um dos mais baratos e simples, sendo empregado em uma grande variedade de aplicações. Além disso, esse processo é o grande responsável pela expansão da soldagem e foi o primeiro a obter aceitação como método produtivo e de alta qualidade [Machado, 1996].

A soldagem é realizada com o calor de um arco elétrico mantido entre a extremidade de um eletrodo metálico revestido e a peça de trabalho. O calor produzido pelo arco funde o metal base, a alma do eletrodo e o revestimento. Quando o metal fundido é transferido através do arco para a poça de fusão este é protegido da atmosfera pelos gases produzidos durante o consumo do revestimento. A escória líquida flutua em direção a superfície da poça de fusão, onde protege o metal de solda da atmosfera durante a solidificação. Outras funções do revestimento são proporcionar estabilidade ao arco e controlar a forma do cordão de solda.

O SMAW é, dentre todos os processos de soldagem a arco elétrico, um dos mais simples em termos de equipamentos, regulagem e aplicação. É empregado na fabricação e montagem de equipamentos, na área de manutenção e reparos, em construções no campo, na soldagem por gravidade em estaleiros e em soldagem subaquática molhada [Pessoa, 2007].

3.2. Automação do Processo

É comum a utilização de dispositivos automáticos ou mecanizados para aumentar a produtividade e a repetitividade da soldagem com eletrodo revestido, além de anular as perturbações infringidas ao processo de solda por parte do operário. Dentre estes dispositivos, o mais simples é o que utiliza o método de soldagem por gravidade [Marques, 1991]. Neste tipo de dispositivo, o eletrodo é preso a um componente móvel que desliza por uma guia que pode ser vertical ou estar inclinada com determinado ângulo, conforme pode ser visto nas figuras 3.1 e 3.2. Após a abertura do arco elétrico, à medida que o eletrodo vai sendo consumido, o componente móvel se movimenta pela guia sob a ação de seu próprio peso, depositando o material sobre a peça.

Existem diferentes configurações de dispositivos utilizados na soldagem por gravidade, em todos os casos pode-se variar a velocidade de soldagem e a qualidade do cordão de solda por meio da combinação dos ângulos utilizados no processo e a corrente de soldagem. Para cada configuração dos ângulos, existem valores ótimos de corrente elétrica que permitem o equilíbrio entre as velocidades de soldagem e de mergulho do eletrodo de modo a manter o comprimento do arco praticamente constante.

Segundo Machado, 1996, este processo de soldagem geralmente requer um eletrodo mais longo do que o usual, normalmente 700 mm, além de um maior diâmetro de eletrodo e maior espessura de revestimento. Outra grande vantagem desse processo é permitir que somente um operador coordene mais de um dispositivo ao mesmo tempo com grande ganho de produtividade.

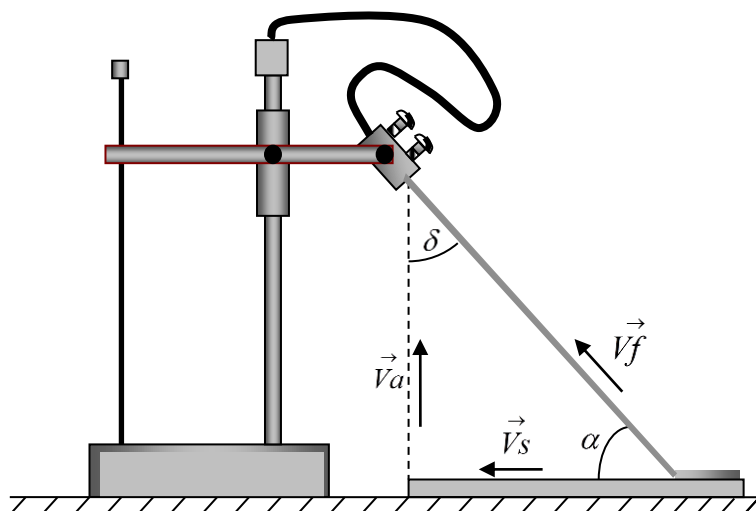


Figura 3.1: Dispositivo com dois ângulos de ajuste [Rodríguez, 2009]

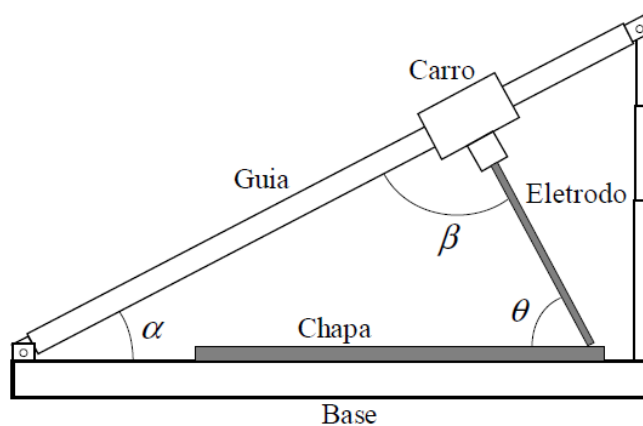


Figura 3.2: Dispositivo com três ângulos de ajuste [Lima, 2006]

3.3. Variáveis do Processo

Na soldagem com eletrodos revestidos, as principais variáveis operacionais são: tipo e diâmetro do eletrodo; tipo, polaridade e valor da corrente de soldagem; tensão e comprimento do arco; velocidade de soldagem; técnica de manipulação do eletrodo e as sequências de deposição de soldagem [Marques, 1991].

A escolha do diâmetro do eletrodo, do tipo e da espessura do revestimento deve ser feita levando em conta as propriedades mecânicas, a taxa de deposição do material, a penetração e forma do cordão resultante, além de determinar a faixa de corrente em que o

eletrodo pode ser usado. Com base nestes parâmetros de processo, foram utilizados no presente trabalho os eletrodos dos tipos básico (E7018) e rutilico (E6013) com diâmetro de 3,25 mm.

Os eletrodos E6013 contém um grande percentual de dióxido de titânio (rutilo-TiO₂) em seu revestimento. Estes são projetados para ter um arco de baixa penetração, permitindo que metais de pequena espessura sejam soldados sem furar a peça. Os eletrodos E7018 são a versão moderna do eletrodo de baixo hidrogênio. A adição de quantidades consideráveis de pó de ferro ao revestimento resulta num arco mais suave e com menos respingos. Esse balanço de ingredientes do revestimento resulta numa grande melhoria na estabilidade do arco e na facilidade de manuseio em todas as posições.

A corrente de soldagem controla de forma predominante todas as características operacionais do processo, aspecto do cordão e as propriedades da peça soldada. A sua intensidade é um parâmetro determinante na taxa de deposição. Ela controla de forma direta a magnitude e a distribuição da energia térmica disponível no arco elétrico, além da maior parte dos fenômenos que ali ocorrem. É o mais importante efeito controlador da penetração da solda, da largura e do reforço do cordão, além da diluição material de solda [Wainer et al, 1992].

A velocidade de avanço é a segunda mais importante variável operatória do processo, mesmo seu controle sendo impreciso em aplicações manuais. Quando utilizado em aplicações automáticas, a velocidade de avanço se torna um fator determinante. Altura e largura do cordão variam inversamente com a velocidade de avanço. A velocidade de soldagem deve ser escolhida de tal forma que o arco fique à frente da poça de fusão. O uso de velocidade muito alta resulta em um cordão estreito, de aspecto deficiente, com mordeduras e escória de difícil remoção, além de baixa penetração. Por outro lado, velocidade muito baixa causa um cordão muito largo e com excesso de penetração [Marques, 1991].

Outra variável importante para o processo é o ângulo do eletrodo em relação à peça. Este ângulo depende da posição e do tipo de soldagem a ser realizada. É ajustado no sentido de equalizar o fluxo térmico entre as partes soldadas, controlar a poça de fusão e o formato do cordão. O ângulo do eletrodo é uma variável importante do processo, pois pode causar o aparecimento de defeitos no cordão de difícil controle visto que seu ajuste depende da habilidade do soldador, porém em variações automáticas do processo, esse ângulo pode ser fixado sem problemas [Buzzoni, 1987].

Uma característica importante da soldagem com eletrodos revestidos consiste no fato de que a tensão do arco depende dos outros parâmetros de processo. No caso da soldagem manual, o controle da distância entre o eletrodo e a peça é realizado pelo soldador e não pode ser executado com grande precisão, entretanto nas variações automatizadas do processo de soldagem com eletrodo revestido, a tensão passa a ser menos dependente de outras variáveis. Além disso, maiores tensões são requeridas à medida que a corrente de soldagem é aumentada. Outra característica do processo é que a tensão do arco pode variar significativamente em função do revestimento. Para eletrodos rutilicos, o revestimento proporciona alta estabilidade de arco com tensões comparativamente baixas; para eletrodos com revestimentos básicos a tensão de arco é relativamente elevada [Wainer et al, 1992].

4. METODOLOGIA

4.1. Projeto e Fabricação do Dispositivo de Soldagem

No presente trabalho, foi projetado e fabricado um dispositivo de soldagem por gravidade onde o arco elétrico se mantém aberto durante o processo somente em função das propriedades químicas e termoelétricas dos revestimentos dos eletrodos evitando ao máximo as interferências características do processo manual.

Conforme mostrado na figura 4.1, inicialmente foi projetado e fabricado um dispositivo composto por uma guia vertical articulada (1) que consiste numa barra quadrada de 500 mm de aço usinada em suas faces para um melhor acabamento superficial. A barra também foi usinada em sua extremidade inferior com o objetivo de ser girada e fixada por meio de parafuso, porca e arruela de pressão, em um suporte (2) soldado em uma base metálica (3). Um porta-eletrodo de alumínio (4) foi conectado ao componente móvel ou carro (5) que desliza pela barra quadrada devido à força de seu peso enquanto o eletrodo é consumido devido à energia produzida pelo arco elétrico.

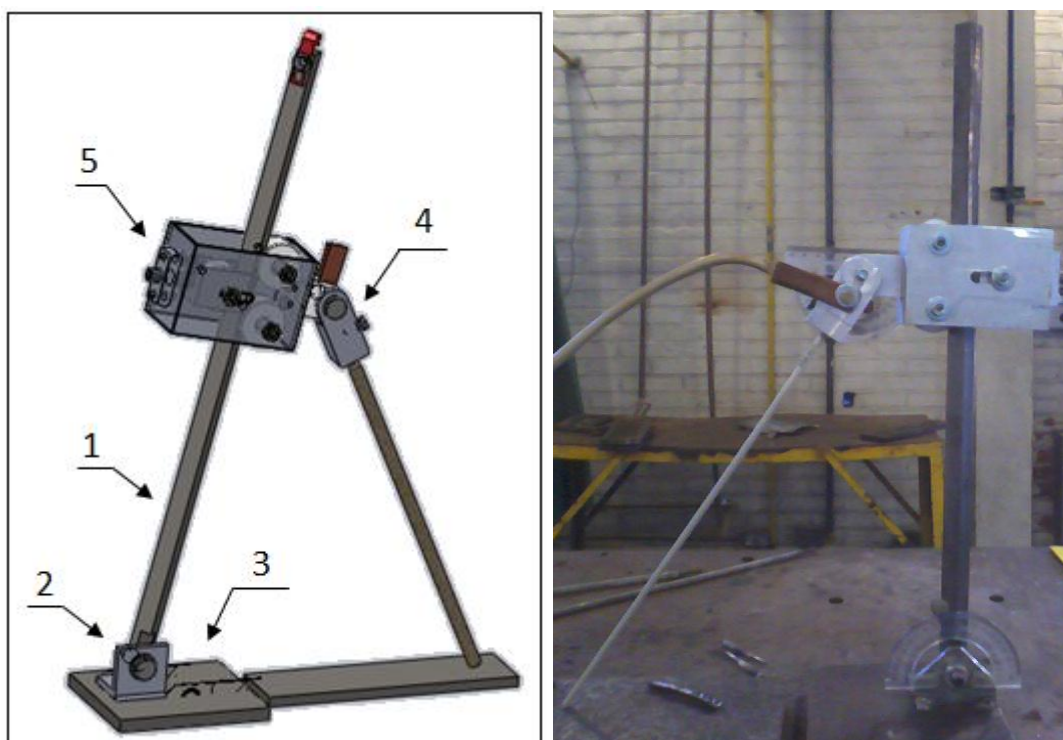


Figura 4.1 - Dispositivo de soldagem por gravidade inicial

O componente móvel (carro) que prende o eletrodo foi confeccionado em alumínio para redução de peso. Diante da necessidade de adotar uma geometria da haste de deslizamento que minimizasse, ao máximo, desvios laterais do carro e conseqüentemente do eletrodo durante a operação, verificou-se que uma configuração com roldanas de nylon de perfil reto encaixadas sobre as quinas de uma barra quadrada seria suficiente para conferir ao carro um deslocamento satisfatório sobre a mesma. Com esse objetivo, foi desenvolvido um carro composto por duas roldanas na parte dianteira e uma roldana na parte traseira. Por meio de um pino roscado conectado ao eixo da roldana traseira, pode-se ajustar a posição da mesma conferindo um aperto necessário para que as roldanas se movimentem sobre a quina da barra quadrada e o carro deslize sob o efeito do seu próprio peso. Um detalhe do carro pode ser visto nas figuras 4.2 e A.5 do apêndice 2.

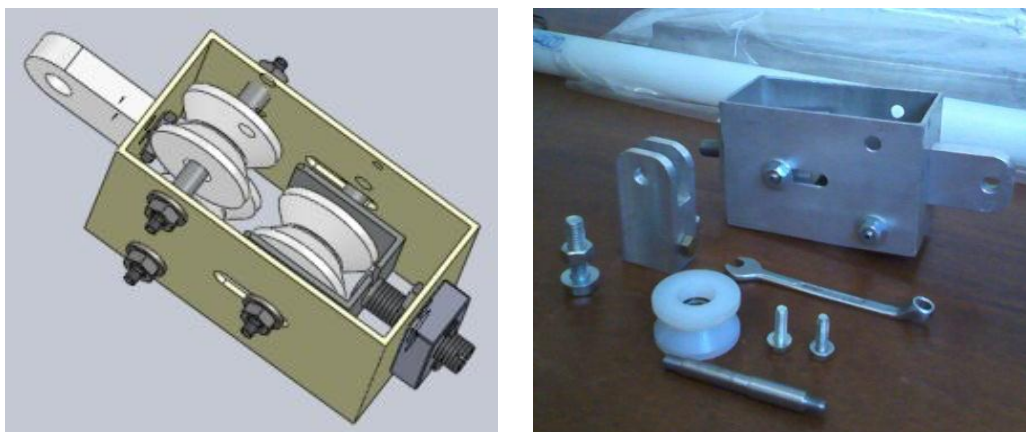


Figura 4.2 - Componente móvel inicial do dispositivo de soldagem

Com os primeiros testes realizados, verificou-se que os eletrodos fletiam e mergulhavam na poça de fusão de forma acentuada, evidenciando a necessidade de se reduzir o peso do componente móvel (carro) do dispositivo de soldagem por gravidade. Com esse objetivo, realizou-se a retirada de material da carenagem e a redução das dimensões do porta-eletrodo articulado, além da substituição de alguns componentes de alumínio do carro por componentes de nylon. O dispositivo mais leve pode ser visto na figura 4.3.

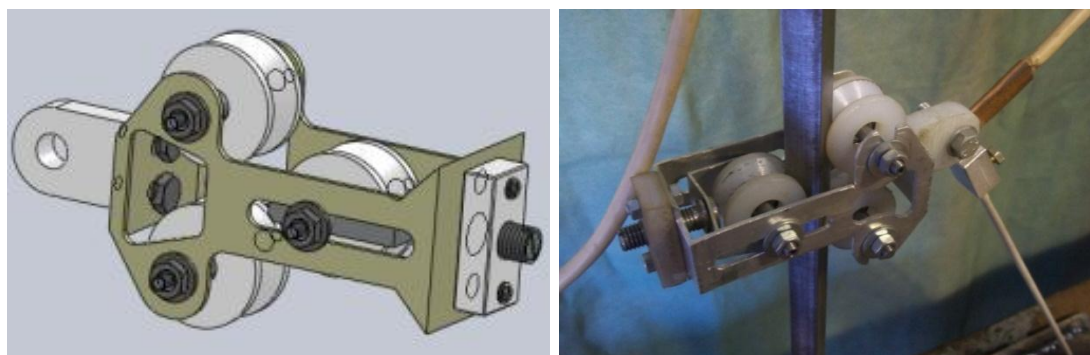


Figura 4.3 - Componente móvel mais leve

Com o novo carro mais leve, observou-se que a tendência do eletrodo fletir diminuiu consideravelmente dando um melhor aspecto ao cordão de solda e aumentando a velocidade do processo. Ao mesmo tempo percebeu-se a possibilidade de se estudar qual seria o comportamento de um carro ainda mais leve. Com isso, foi confeccionado um componente móvel que consistia em um tubo de PVC modificado em seu interior para que o mesmo deslizasse sobre a barra por atrito e sob o efeito do seu peso conforme pode ser visto na figura 4.4. Após os testes verificou-se que o eletrodo fletia ainda menos e que o aspecto visual do cordão após a soldagem também foi satisfatório. Entretanto, o deslizamento do carro com esta configuração só poderia ser executada com a guia na posição vertical, o que limitaria a variação de ângulos e a possibilidade de se trabalhar com velocidades diferentes de soldagem. A tabela 4.1 contém informações sobre peso de cada componente móvel.



Figura 4.4 – Tubo de PVC deslizando

Tabela 4.1 - Peso dos componentes móveis

COMPONENTE MÓVEL	PESO (g)
Carro com roldanas e carenagem	420,68
Carro com redução de carenagem	300,35
Tubo deslizando	82,71

Após a realização de testes preliminares verificou-se que o dispositivo de soldagem por gravidade com o componente móvel composto de roldanas deslizando sobre uma barra articulada como guia, seria o mais indicado para a realização da análise comparativa. Com essa configuração foi possível testar várias combinações de ângulos do dispositivo. Essas combinações influenciam a velocidade de soldagem, a componente da força peso atuando sobre a chapa e o comportamento do arco elétrico que influem diretamente no aspecto do cordão de solda.

Desta forma, todas as combinações possíveis de ângulos obedecem ao triângulo vetorial de velocidades mostrado na figura 4.5.

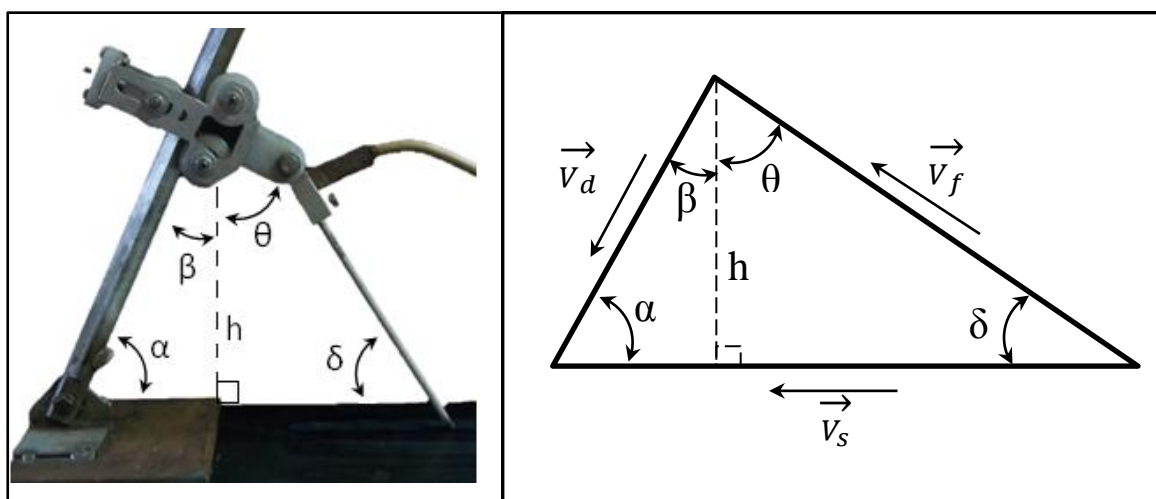


Figura 4.5 – Dispositivo de soldagem e triângulo vetorial de velocidades.

$$h = \vec{V}_d \cos \beta = \vec{V}_f \cos \theta \quad (4.1)$$

$$\vec{V}_d = \frac{\vec{V}_f \cos \theta}{\cos \beta} \quad (4.2)$$

$$\vec{V}_f = \frac{\vec{V}_d \cos \beta}{\cos \theta} \quad (4.3)$$

$$\vec{V}_s = \vec{V}_a \cos \alpha + \vec{V}_f \cos \delta \quad (4.4)$$

$$\vec{V}_s = \vec{V}_a \left(\cos \alpha + \frac{\cos \beta \cos \delta}{\cos \theta} \right) \quad (4.5)$$

Onde: \vec{V}_s – Velocidade de soldagem

\vec{V}_f – Velocidade de fusão do eletrodo

\vec{V}_a – Velocidade de deslocamento do componente móvel

δ – Ângulo de ataque do eletrodo em relação à chapa

α – Ângulo da barra articulada (guia) em relação à base

θ – Ângulo de ajuste do porta-eletrodo

β – Ângulo oposto ao ângulo da barra articulada

h – Altura normal do componente móvel em relação à chapa

4.2. Análise do Dispositivo de Soldagem por Gravidade

Com o objetivo de analisar características operacionais dos eletrodos revestidos E6013 e E7018 por meio do dispositivo de soldagem por gravidade selecionado, realizou-se um estudo experimental do desempenho do dispositivo durante o processo variando os ângulo de ataque do eletrodo e o ângulo da guia vertical onde corre o componente móvel. Verificou-se um desempenho satisfatório utilizando $\delta=60^\circ$ como ângulo de ataque entre o eletrodo e a chapa de aço e $\alpha=60^\circ$ como ângulo da guia vertical em relação a base do dispositivo, sendo estes definidos como ângulos de trabalho.

Para a realização dos cordões de solda, trabalhou-se com uma fonte de soldagem Migatronic, com comando digital, modelo BDH 550 utilizando corrente contínua com polaridade direta (CC+), onde o eletrodo é ligado ao polo positivo e a peça ao negativo. Trabalhando com esse tipo de corrente, conferindo melhor estabilidade do arco, realizou-se a deposição de material de solda sobre chapas de aço AISI 1020 com dimensões 6,35 mm de espessura, 300 mm de comprimento e 150 mm de largura.

Por meio do dispositivo de soldagem por gravidade, utilizando eletrodos revestidos do tipo rutilico E6013 e do tipo básico E7018 de 3,25 mm, foram depositados 3 cordões de solda com corrente de 100 A e 3 cordões com 130 A. Para cada um dos 12 cordões resultantes, foi calculada a taxa de deposição, a taxa de rendimento e a velocidade de soldagem, além da verificação da qualidade através de inspeção visual, para cada eletrodo.

Em todos os cordões depositados, adquiriu-se os valores instantâneos de tensão e corrente de soldagem com uma frequência de 5 kHz para cada sinal, utilizando uma placa de aquisição NIUSB-6009 e o *software* Labview 8.5. Utilizou-se também um cronômetro para medir o tempo de arco aberto e deposição do cordão que pôde ser confirmado pelos dados adquiridos pelo *software*. Os *softwares* Excel 2010 e Statistica 8 foram utilizados para análise e apresentação de histogramas representativos da tensão elétrica e da corrente de soldagem durante o processo.

4.3. Análise Utilizando o Dispositivo com Controle do Arco Elétrico

O dispositivo de soldagem com controle automático do comprimento do arco elétrico existente no Laboratório de Soldagem e Técnicas Conexas (LS&TC), conforme mostrado na figura 4.6, é formado por um cabeçote que desliza sobre um barramento horizontal sob a ação de um fuso acionado por um motor DC com regulagem de velocidade. Neste cabeçote é fixado o eletrodo revestido, estabelecendo a velocidade de soldagem. Outro motor DC é responsável pelo movimento vertical. Este último motor é controlado por um circuito eletrônico que mede a tensão do arco elétrico e a compara com uma tensão definida pelo usuário, fazendo o motor baixar o eletrodo caso a tensão medida do arco elétrico seja maior que a tensão determinada pelo usuário. Desta forma o controle da tensão do arco e consequentemente a distância do eletrodo em relação a chapa pode ser controlado automaticamente.

Utilizando este dispositivo, fez-se a deposição de cordões de solda respeitando os mesmos parâmetros operacionais utilizados com o dispositivo por gravidade. Com o ângulo de ataque (δ) definido em 60° e (α) ajustado em 60° , foram depositados três cordões de solda operando com corrente contínua a 100 A e três depositados com 130 A para eletrodos E7018 e E6013. Para cada solda foram calculados velocidade de soldagem, taxa e eficiência de deposição e realizada a inspeção visual.

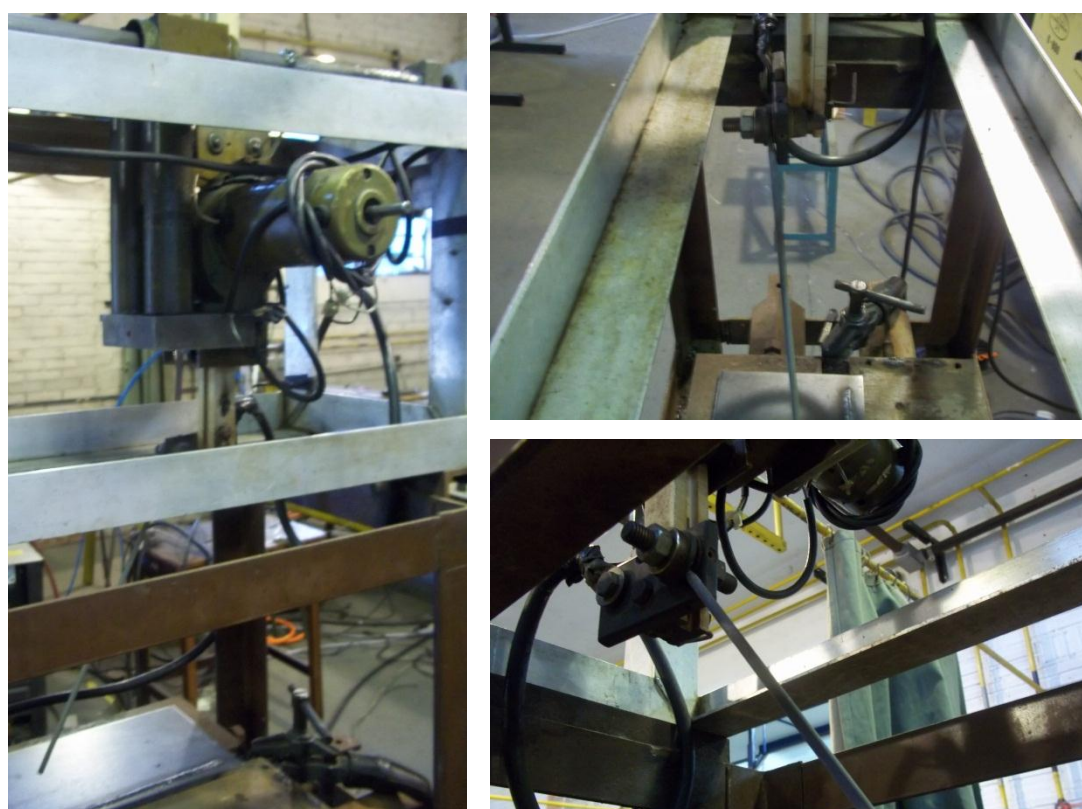


Figura 4.6 Dispositivo com controle automático do comprimento do arco elétrico

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os experimentos do presente trabalho foram realizados no Laboratório de Soldagem e Técnicas Conexas (LS&TC) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Utilizando o dispositivo de soldagem por gravidade que foi confeccionado e o dispositivo de soldagem com controle automático do comprimento do arco elétrico existente no laboratório, foram depositados 24 cordões de solda.

Com cada um dos dispositivos foram realizados doze cordões de solda. Seis utilizando eletros revestidos básicos E7018 e seis utilizando eletrodos rutilicos E6013, todos com 3,25 mm de diâmetro. Em ambos os casos, trabalhou-se com corrente contínua positiva de 100 A e 130 A, respeitando a faixa de operação fornecida pela fabricante (OK – ESAB).

5.1. Inspeção Visual dos Cordões

Os cordões depositados com o dispositivo de soldagem por gravidade apresentaram desvios laterais no início do processo de soldagem, esses desvios laterais diminuía quando o arco elétrico se estabilizava e as variações na velocidade de soldagem eram reduzidas. Isso mostra que o conceito de roldanas ajustadas a uma barra não foi eficiente em relação a evitar desvios laterais durante o processo. Além disso, os cordões apresentaram pequenas distorções no perfil do cordão que também diminuía da metade até o fim do processo. Provavelmente, essas distorções na primeira metade do cordão podem ter sido ocasionadas devido ao momento gerado pela força peso do componente móvel que vai diminuindo ao passo que o eletrodo ia sendo consumido.

Os cordões depositados utilizando o dispositivo automático com controle da tensão do arco elétrico obtiveram melhores resultados em qualidade visual. Os cordões apresentaram menores desvios laterais e menores distorções no seu perfil, mostrando que o controle automático do arco elétrico e conseqüentemente da distância entre a chapa e a ponta do eletrodo, foi mais eficiente no que se refere à uniformidade geométrica do cordão.

Trabalhando com eletrodo no polo positivo (CC+), pôde-se constatar uma boa penetração na chapa e um cordão mais estreito. Os cordões depositados com os eletrodos básicos E7018 apresentaram um arco mais suave e com menos respingos durante o processo, devido à adição de pó de ferro ao seu revestimento. Obteve-se com esses eletrodos melhor aspecto visual, menos desvios laterais e menores distorções geométricas no perfil que os depositados com eletrodos rutilicos E6013 que apresentaram como característica cordões mais planos que o E7018.

A figura 5.1 mostra na chapa à esquerda três cordões depositados utilizando o eletrodo E7018 e corrente de 130 A. Na chapa à direita, seis cordões com o mesmo eletrodo, utilizando corrente de 100 A nos primeiros três (da direita pra esquerda) e 130 A nos outros três.

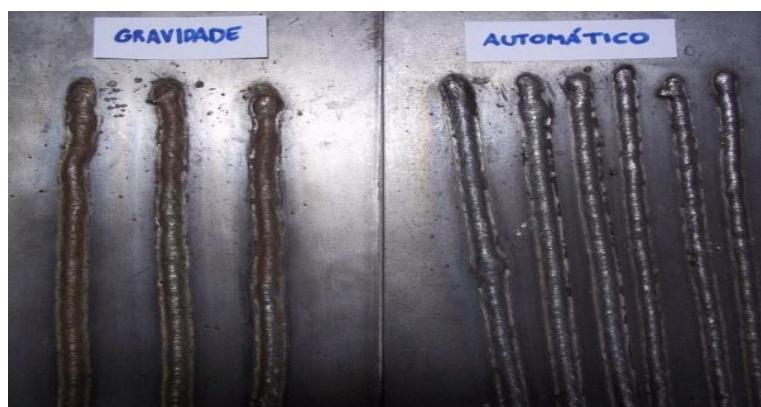


Figura 5.1- Cordões de solda realizados com eletrodos E7018

5.2. Cálculo da Taxa e Eficiência de Deposição

A taxa de deposição é a massa de metal de solda depositado por unidade de tempo de arco aberto. Ela aumenta com a corrente de soldagem dentro dos limites determinados para cada eletrodo. A eficiência de deposição, expressa em percentual, representa a massa de metal de solda depositado comparada com a massa total de eletrodo consumido. Durante o processo de soldagem, parte da massa do eletrodo revestido se perde como escória, gases, respingos e as partes dos eletrodos que são descartadas (pontas) [ESAB, 2000].

Para calcular a taxa e a eficiência de deposição foi medido inicialmente o peso da chapa e do eletrodo antes de cada experimento. Após cada deposição de cordão, a chapa e o eletrodo foram pesados novamente. Também foram medidos a ponta de eletrodo e o tamanho do cordão. Para o cálculo da taxa e eficiência de deposição foram utilizadas respectivamente as equações 5.1 e 5.2.

$$Td = \frac{Mm}{t} \quad (5.1)$$

$$Ed = \frac{Mm}{Me} \times 100 \quad (5.2)$$

Onde: Td – taxa de deposição

Ed – eficiência de deposição (%)

Mm – massa do metal depositado

Me – massa total de eletrodo consumido

t – tempo de soldagem

Conforme a figura 5.2 e a tabela 5.1, as taxas de deposição utilizando o dispositivo por gravidade e eletrodos E6013, não apresentaram grandes variações. A taxa média foi de 0,93 kg/h com corrente em 100 A e 0,92 kg/h com 130 A. Estes valores ficaram bem próximos do valor de 1,00 kg/h para o valor ótimo de corrente de 125 A, conforme a tabela para linha OK[®] de eletrodos revestidos no anexo. Para este eletrodo não houve um aumento significativo na taxa de deposição com a elevação da corrente de trabalho possivelmente em decorrência da maior quantidade de respingos gerados na deposição com 130 A.

Para o eletrodo E7018, a taxa média de deposição foi de 1,00 kg/h com corrente em 100 A e 1,15 kg/h com 130 A. Estes valores ficaram próximos do valor de 1,2 kg/h para o valor ótimo de corrente de (120-140) A. Para este eletrodo verificou-se um aumento da taxa de deposição com a elevação da corrente, provavelmente devido ao fato de que, para o eletrodo básico, há adição de pó de ferro no revestimento que se transfere para o metal de solda, resultando em maiores taxas e eficiências de deposição.

Utilizando o dispositivo automático de controle da tensão do arco elétrico, a taxa média de deposição para o eletrodo E6013 ficou em 0,78 kg/h com 100 A e 1,12 kg/h com 130 A, um valor ficando acima e outro ficando abaixo do valor esperado de 1,00 kg/h para corrente ótima de 125 A. Para o eletrodo E7018, a taxa média de deposição ficou em 0,90 kg/h para 100 A e 1,10 kg/h para 130 A, valores bem próximos de 1,20 kg/h para corrente ótima de operação de (120-140) A. Por meio destes resultados, verificou-se que a taxa de deposição aumentou juntamente com a elevação da corrente de soldagem e os seus valores médios não ficaram distantes dos valores estabelecidos para a corrente ótima de trabalho especificada pelo fornecedor. Porém, conforme pode ser visto na figura 5.3 e na tabela 5.2, alguns valores para a taxa de deposição utilizando este dispositivo foram menores que os valores obtidos utilizando o dispositivo por gravidade. Provavelmente devido à velocidade elevada de deslocamento horizontal do cabeçote móvel que leva o eletrodo determinada para soldagem, a taxa e consequentemente a eficiência de deposição foram afetadas.

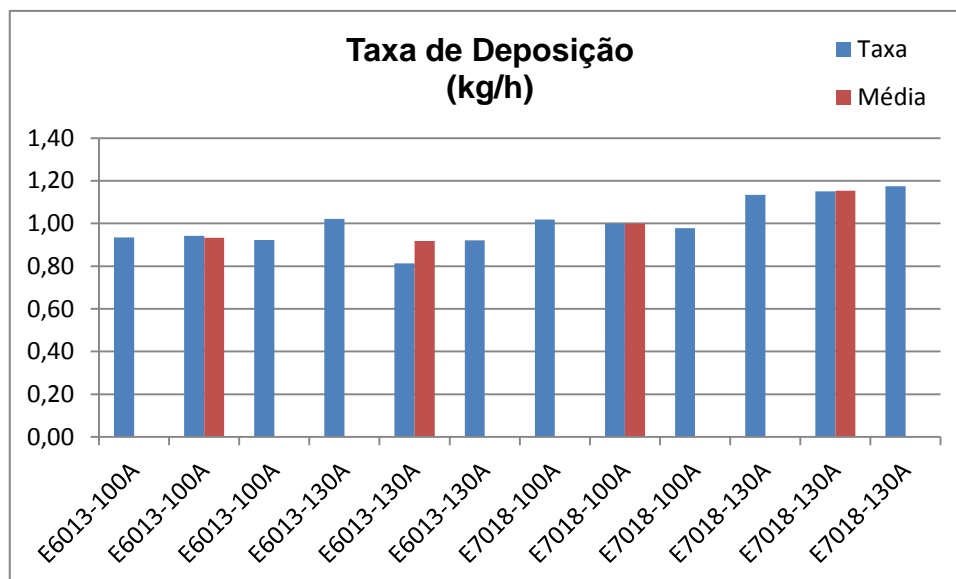


Figura 5.2 – Desempenho do dispositivo de soldagem por gravidade

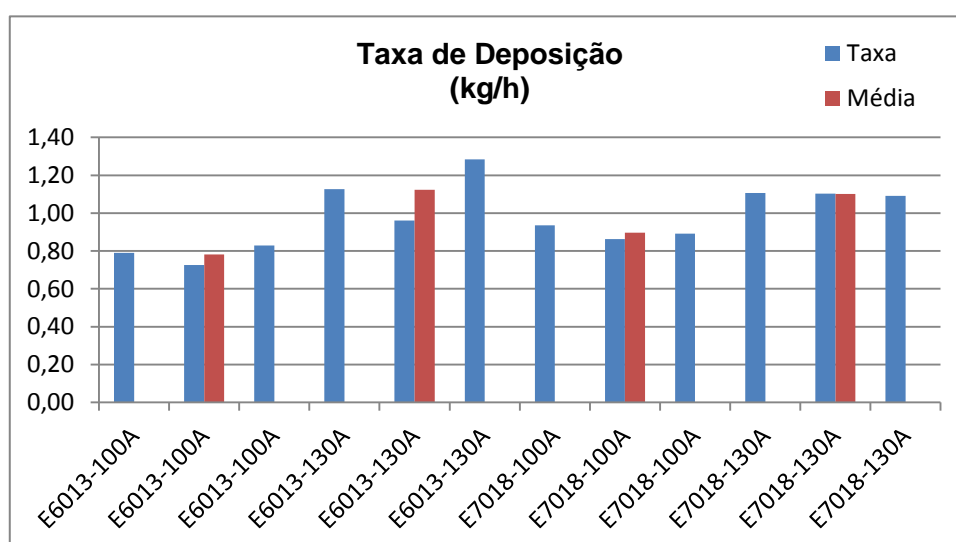


Figura 5.3 – Desempenho do dispositivo automático com controle do arco elétrico

Verificou-se, como pode ser observado na tabela 5.1, que a eficiência de deposição para os eletrodos E6013 e E7018, utilizando o dispositivo de soldagem por gravidade não obteve uma melhora significativa com o aumento da corrente. Até mesmo houve reduções da eficiência de deposição para o eletrodo E6013. A eficiência média foi de 69,89 % com corrente em 100 A e 58,05 % com 130 A. Este último valor distante do valor de 73 % para o valor ótimo de corrente de 125 A, possivelmente devido à operação do eletrodo acima deste limite ótimo e ao aumento da quantidade de respingos gerados durante a deposição.

Para o eletrodo E7018 a eficiência se manteve sem grandes alterações, porém em todos os cordões, apresentou resultados melhores que os obtidos com o eletrodo rutilico devido à adição de pó de ferro e pela faixa de correntes utilizada ser mais compatível com este eletrodo. Para o eletrodo E7018, a eficiência média de deposição foi de 72,91 % com corrente em 100 A e 72,67 % com 130 A. Estes valores ficaram próximos do valor de (71-72) % para o valor ótimo de corrente de (120-140) A, conforme a tabela para linha OK[®] de eletrodos revestidos no anexo.

Utilizando o dispositivo com controle automático da tensão do arco elétrico, verificou-se que para o eletrodo E6013 a eficiência média de deposição foi de 56,68 % com corrente em 100 A e 66,61 % com 130 A. Para o eletrodo E7018 a eficiência média ficou em 71,51 % para 100 A e 70,46 % para 130 A, não havendo mudanças significativas na eficiência de deposição com a elevação da corrente, mas os valores se mantiveram levemente abaixo da eficiência esperada conforme pode ser visto na tabela 5.2 e na tabela para a linha OK[®] de eletrodos revestidos no anexo.

Com estes resultados, pôde-se concluir que a velocidade ajustada para o deslocamento horizontal do cabeçote móvel que leva o eletrodo foi elevada, influenciando a taxa e a eficiência de deposição.

Tabela 5.1 – Resultados obtidos com dispositivo de soldagem por gravidade

Teste	Eletrodos	Cordão (mm)	Velocidade (mm/s)	Deposição (g)	Tempo (s)	Taxa de Deposição (kg/h)	Eficiência de Deposição (%)
1	E6013-100A	235	4,18	14,61	56,27	0,93	70,04
2	E6013-100A	233	4,18	14,59	55,78	0,94	69,68
3	E6013-100A	225	4,08	14,11	55,10	0,92	69,96
4	E6013-130A	226	4,89	13,12	46,25	1,02	65,21
5	E6013-130A	224	4,94	10,23	45,30	0,81	51,15
6	E6013-130A	218	4,93	11,31	44,19	0,92	57,79
7	E7018-100A	200	3,65	15,52	54,84	1,02	73,21
8	E7018-100A	198	3,62	15,18	54,68	1,00	72,95
9	E7018-100A	193	3,59	14,59	53,73	0,98	72,59
10	E7018-130A	200	4,22	14,92	47,39	1,13	74,23
11	E7018-130A	207	4,26	15,51	48,54	1,15	71,38
12	E7018-130A	203	4,30	15,42	47,25	1,17	72,39

Tabela 5.2 – Resultados obtidos com o dispositivo de controle automático do arco elétrico

Teste	Eletrodos	Cordão (mm)	Velocidade (mm/s)	Deposição (g)	Tempo (s)	Taxa de Deposição (kg/h)	Eficiência de Deposição (%)
1	E6013-100A	215	4,81	9,81	44,71	0,79	55,49
2	E6013-100A	216	4,88	8,92	44,25	0,73	53,16
3	E6013-100A	220	4,83	10,48	45,56	0,83	61,39
4	E6013-130A	230	4,46	16,13	51,56	1,13	65,89
5	E6013-130A	120	3,36	9,54	35,73	0,96	59,37
6	E6013-130A	183	4,50	14,52	40,70	1,28	74,58
7	E7018-100A	218	4,23	13,39	51,53	0,94	73,17
8	E7018-100A	223	4,41	12,11	50,56	0,86	69,84
9	E7018-100A	238	4,27	13,81	55,73	0,89	71,52
10	E7018-130A	216	4,51	14,72	47,87	1,11	70,63
11	E7018-130A	218	4,42	15,12	49,34	1,10	71,19
12	E7018-130A	225	4,57	14,93	49,27	1,09	69,57

5.3. Comportamento Elétrico do Dispositivo de Soldagem por Gravidade

Para o eletrodo E6013 e corrente de soldagem ajustada em 100 A, foram determinados os parâmetros da distribuição normal, média aritmética e desvio padrão. A figura 5.4 mostra os histogramas de frequência da tensão do arco elétrico e da corrente de soldagem para os três primeiros testes realizados. Segundo os valores obtidos, não houve diferenças significativas para os três testes, a tensão média do arco elétrico ficou entre 20,42 V e 20,97 V e o respectivo desvio padrão entre 7,24 V e 7,08 V. A corrente média de soldagem ficou entre 102,62 A e 102,67 A e o respectivo desvio padrão entre 6,10 A e 6,44 A.

Para o mesmo eletrodo e operando com corrente ajustada em 130 A, a tensão média do arco elétrico ficou entre 22,96 V e 25,67 V e o respectivo desvio padrão entre 6,58 V e 6,11 V. A corrente média de soldagem ficou entre 133,71 A e 133,76 A e o respectivo desvio padrão entre 8,07 A e 8,13 A, conforme pode ser visto na figura 5.5.

De acordo com os histogramas de frequência da tensão do arco elétrico e da corrente de soldagem para os eletrodos E6013, observou-se maior repetitividade nos parâmetros elétricos utilizando corrente ajustada em 100 A. Para os eletrodos E7018, observou-se maior repetitividade durante o processo utilizando corrente ajustada em 130 A, como pode ser visto nas figuras A.1 e A.2 do apêndice 1.

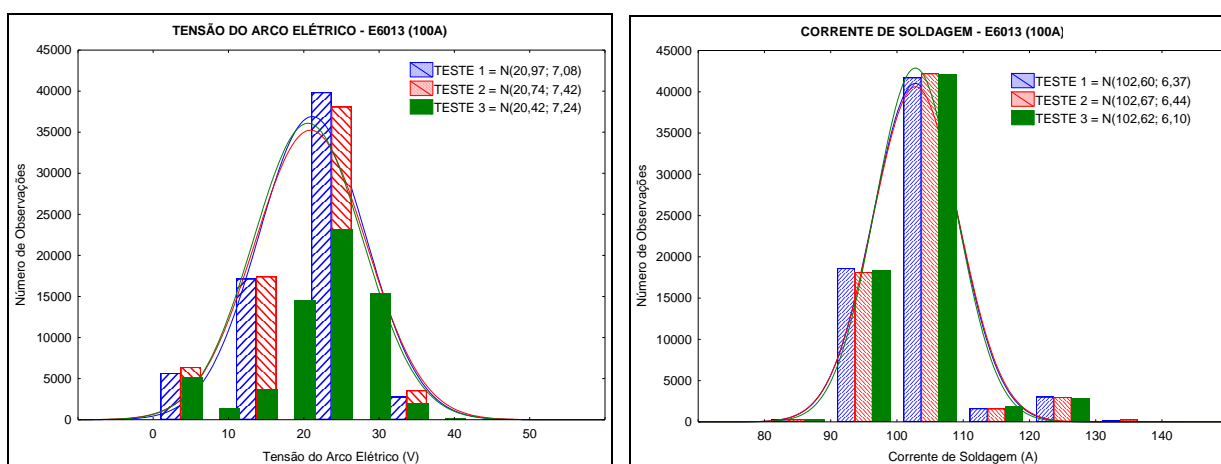


Figura 5.4 – Histogramas de tensão e corrente de soldagem com eletrodos E6013 para 100 A

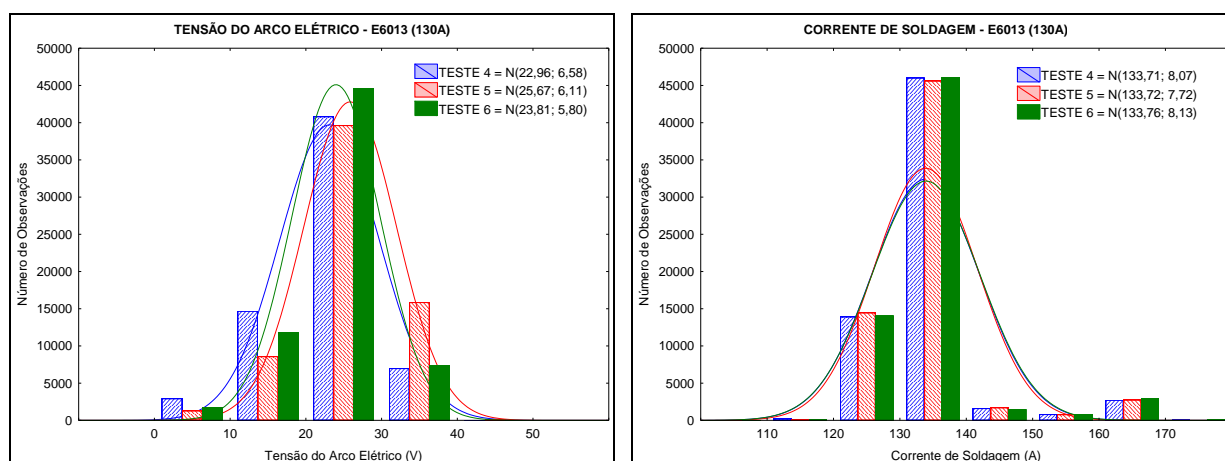


Figura 5.5 – Histogramas de tensão e corrente de soldagem com eletrodos E6013 para 130 A.

6. CONCLUSÕES

Considerando que o presente trabalho tem por finalidade a comparação entre o comportamento de eletrodos revestidos utilizando dispositivos de soldagem por gravidade e com controle automático do comprimento do arco elétrico para o processo SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*), concluiu-se que:

- Em relação ao projeto do dispositivo de soldagem por gravidade, o peso do dispositivo é muito relevante para sua eficiência no processo SMAW. Quanto mais leve for o componente móvel do dispositivo, menor será a influência dos momentos causados pela força peso ao longo do eletrodo e no seu deslocamento durante o processo de soldagem.

Pôde-se observar que à medida que o eletrodo se consumia, a influência do peso do componente móvel diminuía. Também foi observado que os eletrodos E7018 eram menos afetados pelo peso do componente móvel que os eletrodos E6013, mostrando que a espessura do revestimento influencia na eficiência de soldagem com um dispositivo por gravidade.

- Em relação ao aspecto visual dos cordões depositados com os dois dispositivos, os cordões realizados com o dispositivo com controle automático do comprimento do arco elétrico apresentaram melhores resultados. O dispositivo de soldagem por gravidade produziu cordões com maiores distorções no seu perfil e maiores desvios laterais que o dispositivo automático, principalmente na primeira metade do processo.

- Utilizando os dois dispositivos, os eletrodos básicos E7018 obtiveram melhores resultados relacionados à qualidade visual que os rutilicos E6013, operando com as duas correntes de trabalho. Provavelmente este resultado está relacionado às características do revestimento que contém quantidades consideráveis de pó de ferro resultando no arco mais suave e com boa estabilidade.

- Em relação à taxa e eficiência de deposição, o dispositivo de soldagem por gravidade obteve melhores resultados, provavelmente devido à velocidade elevada de deslocamento horizontal do eletrodo determinada para soldagem com o dispositivo automático.

Utilizando o dispositivo por gravidade, o progresso da deposição do cordão é composto pelo movimento de mergulho do eletrodo na poça de fusão e deslocamento na direção de soldagem, causando pequenas variações na velocidade de soldagem, porém contribuindo para uma boa deposição. No caso do dispositivo automático, a tensão do arco elétrico controla a distância da ponta do eletrodo em relação a chapa durante a deposição do cordão, além disso, o movimento de deslocamento horizontal do eletrodo é controlado por um motor que impõe uma velocidade constante ao cabeçote móvel que o leva.

Portanto, para um melhor desempenho do dispositivo automático em relação a taxa e eficiência de deposição, faz-se necessário a determinação da velocidade ótima do deslocamento horizontal do cabeçote móvel que leva o eletrodo.

- Utilizando os dois dispositivos, os eletrodos básicos E7018 obtiveram melhores resultados relacionados à taxa e eficiência de deposição que os rutilicos E6013 para 100 A e 130 A, provavelmente isso se deve ao fato de que para o eletrodo básico há adição de pó de ferro fundido no metal de solda, resultando em maiores taxas e eficiências de deposição.

- Em relação ao comportamento elétrico durante a soldagem com o dispositivo por gravidade, verificou-se maior repetitividade nos valores médios para a tensão do arco elétrico e corrente de soldagem para os eletrodos E6013 operando com corrente ajustada em 100 A. Entretanto, para os eletrodos E7018, observou-se maior repetitividade nos parâmetros elétricos utilizando corrente ajustada em 130 A.

7. SUGESTÕES SOBRE TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros, seria interessante a aquisição dos dados elétricos durante a soldagem com o dispositivo de controle automático do comprimento do arco elétrico e a realização do estudo comparativo do comportamento elétrico entre os dois dispositivos, utilizando ferramentas estatísticas que possibilitem um estudo mais aprofundado do processo de soldagem com eletrodos revestidos distintos.

Também seria interessante a realização de testes por meio do dispositivo de soldagem por gravidade com diferentes parâmetros de soldagem e utilizando outros tipos de eletrodos revestidos. Há também a possibilidade do estudo comparativo dos resultados adquiridos com eletrodos com um diâmetro maior de bitola utilizando os dispositivos de soldagem por gravidade e com controle automático do comprimento do arco elétrico.

Outra possibilidade de trabalho futuro, seria o projeto e fabricação de um dispositivo por gravidade que permitisse a soldagem em posições diferentes da posição plana, abrindo caminho para o estudo de sua viabilidade econômica e sua eficiência em posições de soldagens que exigem maior perícia do soldador.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BUZZONI, H. A. - **“Manual de solda elétrica”**, Ed. TecnoPrint, pp 53-68, 1987.

ESAB, **“Catálogo de Consumíveis”**, <http://www.esab.com.br>, Acessado em 09/06/2011

ESAB, **“Filler Metal Technology Course”**, ESAB Welding and Cutting Products, 2000.

LIMA, E. J. – **“Soldagem Robotizada com Eletrodo Revestido”**, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

MACHADO, I. G. - **“Soldagem & Técnicas Conexas: Processos”**, Porto Alegre, editado pelo autor, pp 14,99; 1996.

MARQUES, P. V. – **“Tecnologia da Soldagem”**, Belo Horizonte, ESAB, UFMG, pp 146, 162,164; 1991.

PESSOA, E. C. P. – **“Estudo da Porosidade ao Longo do Cordão em Soldas Subaquáticas Molhadas”**, Tese de Doutorado – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

RODRÍGUEZ, A. G. – **“Valoración del Desempeño de un Dispositivo de Autoalimentación Diseñado para la Evaluación Operativa de Electrodo Revestidos”**, SOLDAGEM & INSPEÇÃO. São Paulo. Vol. 14, No. 1, p. 058-065, Março 2009.

WAINER, E.; BRANDI, S. D.; DE MELLO, F. D. H. – **“Soldagem Processos e Metalurgia”**, Edgard Blücher, 1992.

APÊNDICE 1 – Histogramas de Frequência da Tensão do Arco Elétrico e da Corrente

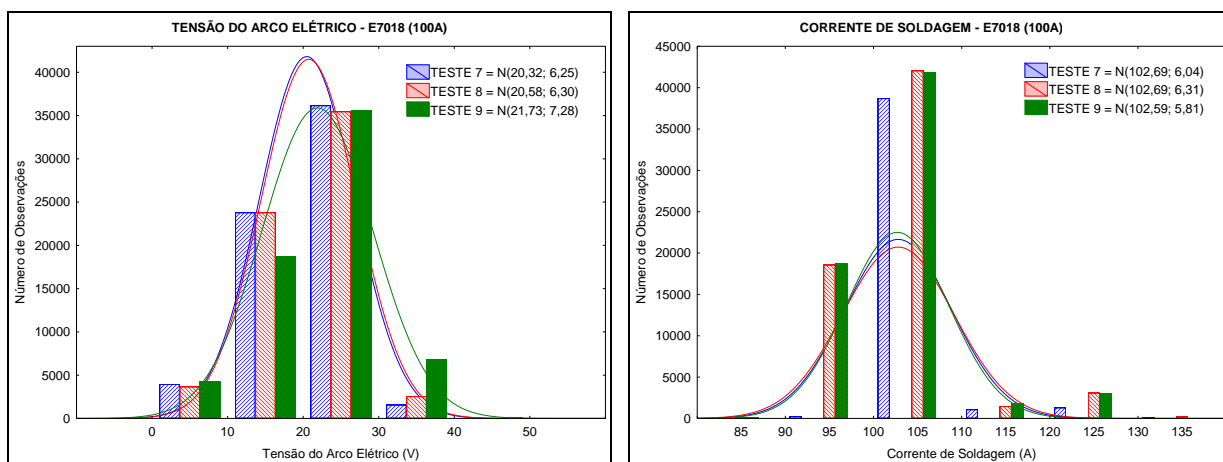


Figura A.1 – Histogramas de tensão e corrente de soldagem com eletrodos E7018 para 100 A.

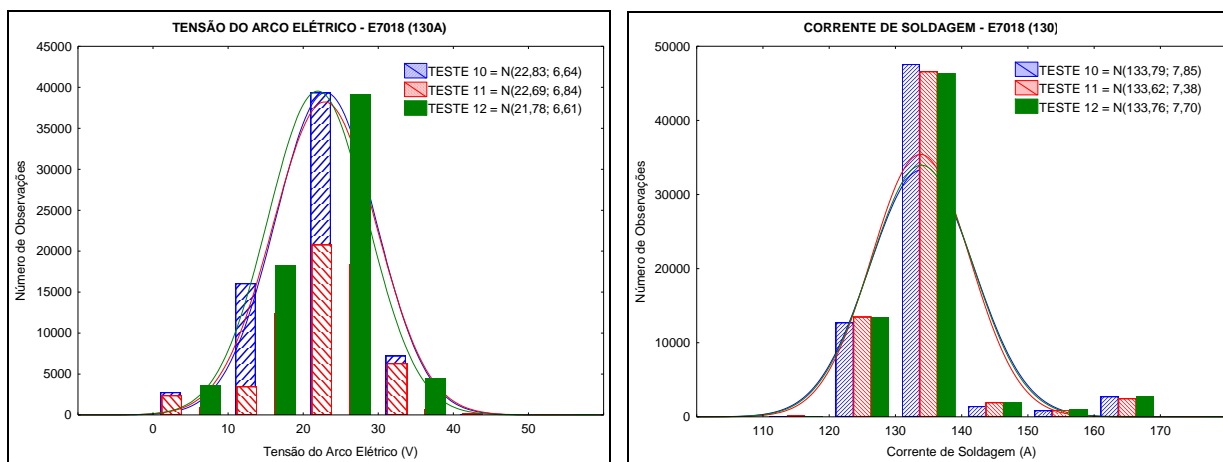


Figura A.2 – Histogramas de tensão e corrente de soldagem com eletrodos E7018 para 130 A.

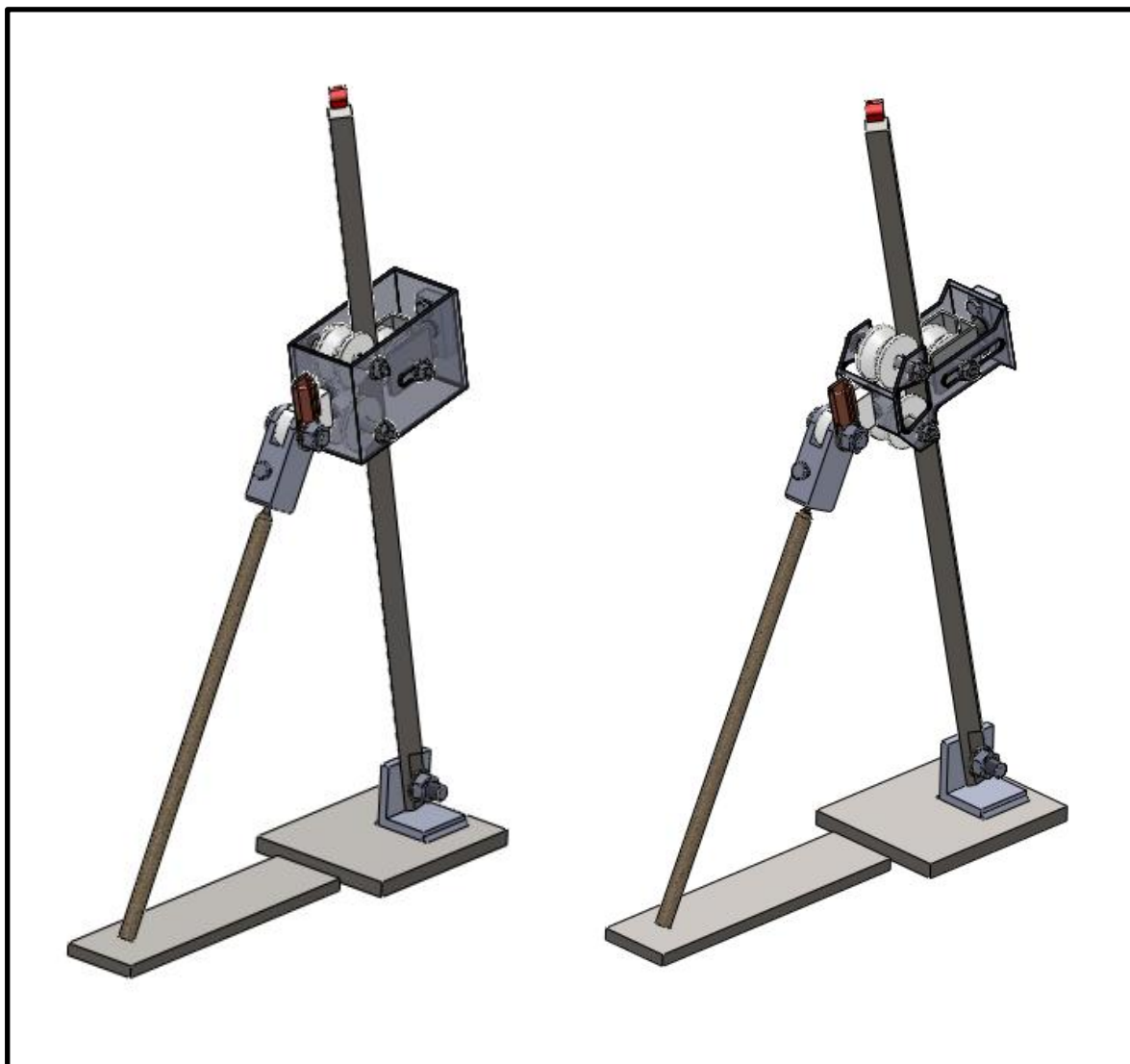


Figura A.3 - Evolução do dispositivo de soldagem por gravidade.

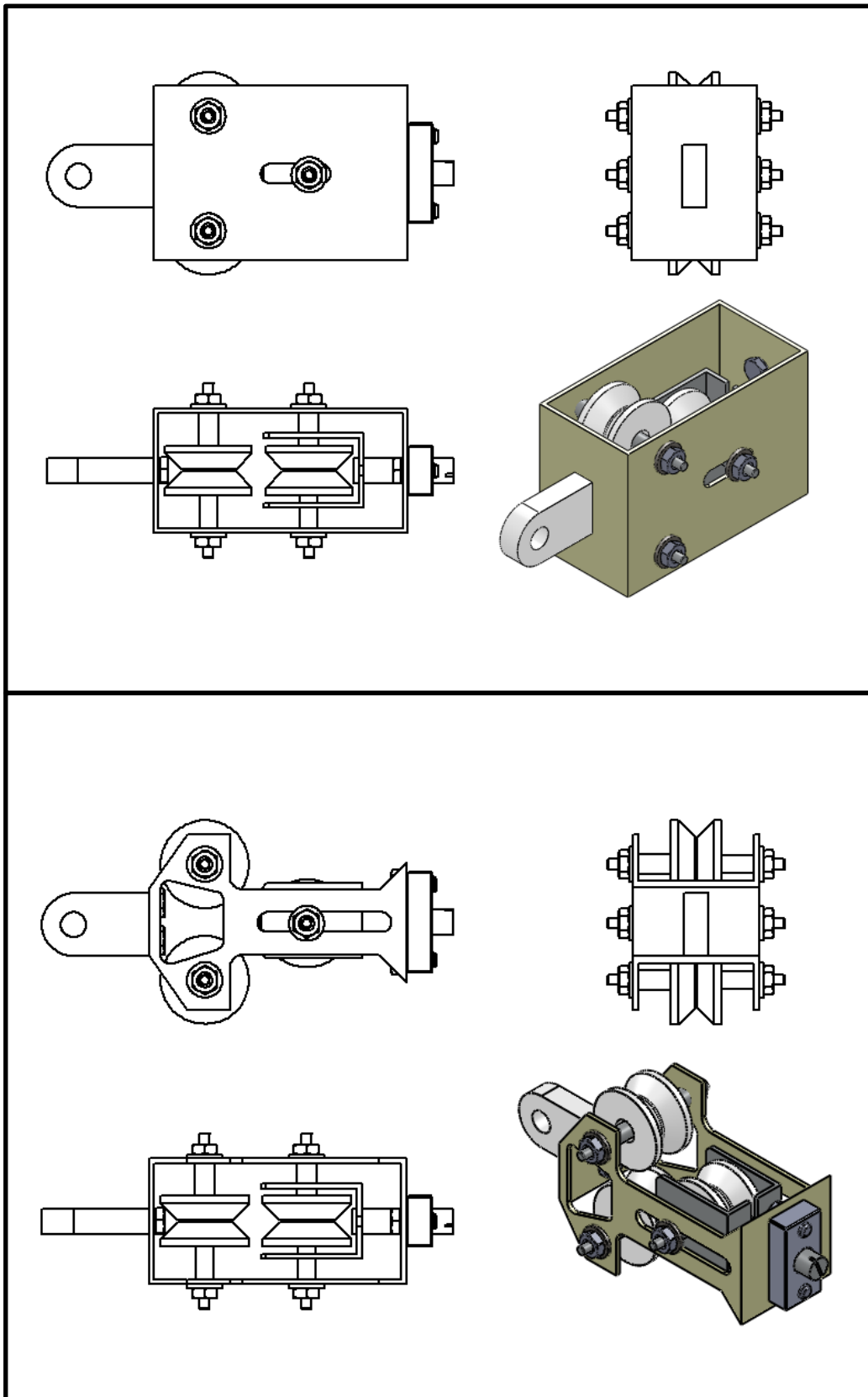


Figura A.4 - Evolução do componente móvel do dispositivo.

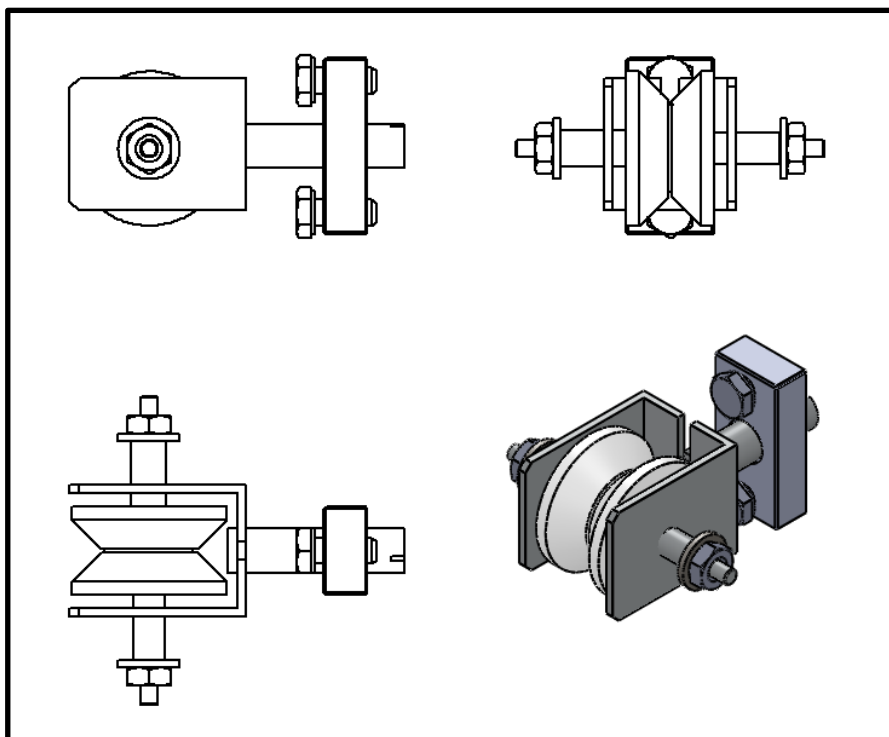


Figura A.5 – Detalhe do dispositivo de ajuste do eixo traseiro

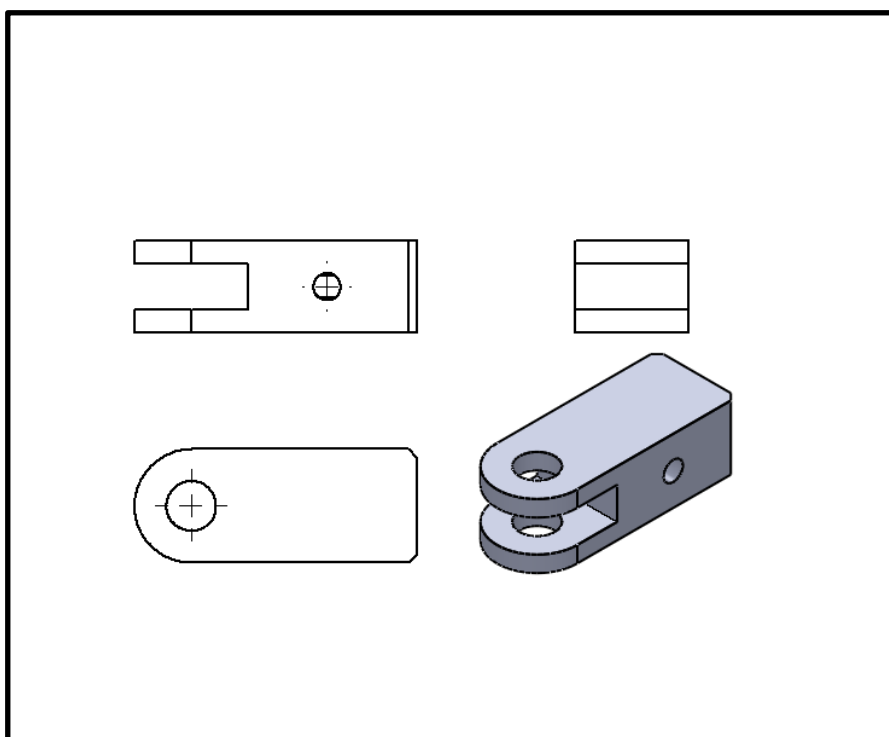


Figura A.6 – Detalhe do porta-eletrodo inicial

ANEXO



ELETRODOS REVESTIDOS OK

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

Tabela VII - Recomendações de parâmetros de soldagem para os eletrodos revestidos OK[®] para a soldagem de aços carbono