



**Mauri Rafael Beck**

**DESENVOLVIMENTO DE UM DISPOSITIVO PARA  
SOLDAGEM CAPACITIVA**

**Horizontina**

**2014**

**Mauri Rafael Beck**

**DESENVOLVIMENTO DE UM DISPOSITIVO PARA SOLDAGEM  
CAPACITIVA**

Trabalho Final de Curso apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, pelo Curso de Engenharia Mecânica da Faculdade Horizontina.

ORIENTADOR: Richard Thomas Lermen, Dr.

**Horizontina**

**2014**

**FAHOR - FACULDADE HORIZONTINA  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a monografia:**

**“Desenvolvimento de um dispositivo para soldagem capacitiva”**

**Elaborada por:**

**Mauri Rafael Beck**

como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em  
Engenharia Mecânica

**Aprovado em: 04/11/2014  
Pela Comissão Examinadora**

---

**Dr. Richard Thomas Lermen  
Presidente da Comissão Examinadora - Orientador**

---

**Dr. Ademar Michels  
FAHOR – Faculdade Horizontina**

---

**Me. Anderson Dal Molin  
FAHOR – Faculdade Horizontina**

**Horizontina  
2014**

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho aos meus pais, Milton e Vera, e meus irmãos Marcos e Marcelo, pelo incentivo, apoio e carinho, além dos formidáveis exemplos de vida que me inspiram.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço aos meus amigos Cristiano Reghelin, Jorge Passos, Djonathan Güntzel, Claudia Kraulich e Alexandre Heirich por realizarem boa parte desta caminhada ao meu lado, bem como ao Prof. Dr. Richard Lermen pela formidável orientação.

“O estudo em geral, a busca da verdade e da beleza, são domínios em que nos é consentido ficar crianças toda a vida.”

Albert Einstein

## RESUMO

O processo de soldagem por descarga capacitiva caracteriza-se por realizar a fusão entre dois componentes através da aplicação de uma descarga capacitiva no ponto de união dos dois componentes. Este processo caracteriza-se pela elevada qualidade da solda, bem como rapidez e versatilidade do processo. Este trabalho possui como objetivo principal fabricar um dispositivo para realização de soldagem por descarga capacitiva. Para atingir este objetivo, realizou-se uma pesquisa bibliográfica sobre este processo de soldagem e os principais equipamentos já disponíveis no mercado. A partir destas informações, fabricou-se um dispositivo completo de soldagem, sendo o mesmo composto por um banco de capacitores, responsável pelo armazenamento e descarga da energia durante a soldagem, bem como um dispositivo de forjamento onde os componentes a serem soldados são fixados durante o processo de soldagem. Após a fabricação do dispositivo, foram realizados testes experimentais de soldagem com pinos de 3,2mm de diâmetro sobre chapas de 6mm de espessura, sendo ambos os componentes de aço com baixo teor de carbono. As amostras soldadas foram submetidas a testes de arrancamento manual, visando ter-se uma noção geral da qualidade da solda gerada pelo equipamento. Após os testes de soldagem e de análise das amostras soldadas, concluiu-se que o dispositivo de soldagem apresentou bom funcionamento e que o processo é realmente versátil e rápido.

**Palavras-chave:** Dispositivo. Soldagem. Descarga Capacitiva.

## **ABSTRACT**

The capacitive discharge welding main characteristic is that it makes possible to weld two components by applying a capacitive discharge in the point where both components need to be welded. The process produces welding with high quality in a quick and flexible process. The main purpose of this work is to build a capacitive discharge welding equipment. To reach this goal, a complete bibliography research in this field was done, focusing especially on the process and the equipments that we can find in the market. With all this information, a complete capacitive discharge welding equipment was built. The equipment is composed of a capacitor bank, responsible for storing and discharging de weld energy during the welding process, as well as a forging device where the components are hold during the process. After finishing the welding system, experimental tests were performed by welding SAE1020 pins with 3.2mm of diameter to steel sheets with a thickness of 6mm. The samples were submitted to a manual pull test, aiming to see if the process works. After the tests were performed, the conclusion is that the capacitor discharge welding equipment worked well and proved to be a flexible and a quick process.

**Keywords:** Equipment. Capacitive Discharge. Welding.

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1: Etapas do processo de soldagem capacitiva. ....  | 15 |
| Figura 2: Soldagem de pino com utilização de ponteira. ....  | 16 |
| Figura 3: Aparelhos para soldagem por descarga capacitiva. ....  | 17 |
| Figura 4: Circuito elétrico do banco de capacitores. ....  | 23 |
| Figura 5: Banco de capacitores após o término de sua montagem. ....  | 24 |
| Figura 6: Dispositivo de forjamento. ....  | 25 |
| Figura 7: Sistema de gatilho fechado (a) e aberto (b). ....  | 26 |
| Figura 8: Dispositivo para fixação dos pinos. ....   | 26 |
| Figura 9: Imagem das amostras submetidas ao teste de soldagem: (a) pino de diâmetro de 3,2 mm e (b) chapa de aço. ....       | 27 |
| Figura 10: Chaves seletoras liga/desliga na parte frontal do equipamento. ....   | 28 |
| Figura 11: (a) Dispositivo de forjamento na posição de final de curso e (b) contato entre os componentes. ....               | 30 |
| Figura 12: Folga encontrada: (a) amostra soldada com energia de 5 mF e (b) amostra soldada com 30 mF. ....                   | 32 |
| Figura 13: Local da solda - (a) amostra com energia de soldagem de 5 mF e (b) amostra com energia de soldagem de 30 mF. .... | 33 |

## SUMÁRIO

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1. INTRODUÇÃO</b> .....                                | <b>12</b> |
| 1.1 JUSTIFICATIVA.....                                    | 12        |
| 1.2 OBJETIVO GERAL.....                                   | 12        |
| 1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....                            | 12        |
| <b>2. REVISÃO DA LITERATURA</b> .....                     | <b>14</b> |
| 2.1 SODAGEM POR DESCARGA CAPACITIVA: O PROCESSO.....      | 14        |
| 2.2 EQUIPAMENTO.....                                      | 17        |
| 2.2.1 Banco de capacitores.....                           | 18        |
| 2.2.2 Tensão nos capacitores.....                         | 19        |
| 2.2.3 Capacitores em série.....                           | 19        |
| 2.3.4 Capacitores em paralelo.....                        | 20        |
| <b>3. METODOLOGIA</b> .....                               | <b>21</b> |
| 3.1 CONSTRUÇÃO DO DISPOSITIVO DE SOLDAGEM CAPACITIVA..... | 21        |
| 3.1.1 Materiais utilizados.....                           | 21        |
| 3.1.2 Banco de capacitores.....                           | 22        |
| 3.1.3 Dispositivo de forjamento.....                      | 24        |
| 3.2 TESTES DE FUNCIONAMENTO.....                          | 27        |
| 3.2.1 Descrição da amostra.....                           | 27        |
| 3.2.2 Parâmetros de teste.....                            | 27        |
| <b>4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS</b> .....     | <b>28</b> |
| 4.1 FUNCIONAMENTO DO DISPOSITIVO DE SOLDAGEM.....         | 28        |
| 4.2 CUSTOS DO DISPOSITIVO.....                            | 30        |
| 4.3 ANÁLISE DAS AMOSTRAS SOLDADAS.....                    | 31        |
| <b>5. CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....                      | <b>34</b> |
| 5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....                 | 34        |
| <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....                   | <b>36</b> |

# 1. INTRODUÇÃO

O contínuo avanço tecnológico, bem como as crescentes exigências de qualidade e custo acessível dos produtos oferecidos ao consumidor, gera novos desafios às áreas de desenvolvimento e manufatura, que precisam desenvolver novos processos de fabricação que sejam rápidos, versáteis, baratos e com garantia de qualidade. A área de soldagem apresenta novidades constantes que visam preencher algumas das lacunas criadas por essas novas exigências. Contudo, alguns processos ainda geram dúvidas quanto à sua real efetividade e custo-benefício de sua aplicação, fatores levados em consideração por indústrias no momento da implantação de um novo processo de fabricação.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

Um dos processos de fabricação mais recentes é a soldagem por descarga capacitiva, desenvolvida com o intuito de possibilitar a união principalmente de componentes com dimensões reduzidas, muitas vezes apresentando propriedades químicas e mecânicas distintas. Por ser um processo novo para a indústria, ainda gera dúvidas quanto à seu funcionamento e efetividade. Sendo assim, decidiu-se aprofundar os estudos no que diz respeito principalmente ao equipamento e a sua fabricação.

## 1.2 OBJETIVO GERAL

Objetivou-se através deste trabalho, realizar a concepção e fabricação de um dispositivo para soldagem por descarga capacitiva.

## 1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para atingimento do objetivo principal, definiu-se os seguintes objetivos específicos:

- Apresentar uma revisão bibliográfica sobre o tema;
- Construir o banco de capacitores;
- Construir o dispositivo de forjamento;

- Testar o funcionamento do equipamento projetado;
- Apresentar os custos envolvidos em sua fabricação.

Ao final do trabalho é demonstrado o dispositivo de soldagem fabricado, com os detalhes do funcionamento de cada componente ou sistema, demonstrando assim que o objetivo delimitado foi atingido. Com a realização de testes de arrancamento dos pinos soldados, pôde-se observar uma variação de resistência da solda de acordo com a variação da energia liberada pelo banco de capacitores: menores energias resultaram em solda com fusão incompleta, enquanto energias maiores resultaram em melhor fusão entre os componentes.

## 2. REVISÃO DA LITERATURA

Na etapa inicial deste trabalho é apresentada uma revisão bibliográfica contendo as informações relativas ao processo de soldagem por descarga capacitiva, com o intuito de introduzir o processo e melhor compreendê-lo. Em seguida são apresentados exemplos de equipamentos para soldagem capacitiva já disponíveis no mercado, além de uma revisão geral sobre detalhes a serem observados na concepção do banco de capacitores do equipamento.

### 2.1 SODAGEM POR DESCARGA CAPACITIVA: O PROCESSO

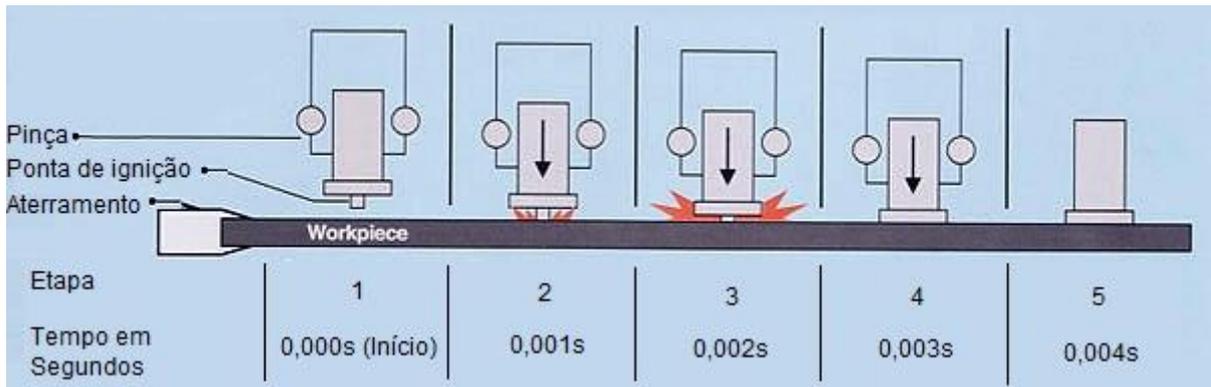
Com base em princípios básicos da união de materiais a soldagem capacitiva pertence ao grupo da solda por resistência, pois no momento da descarga capacitiva uma resistência à passagem de corrente é formada no local. Devido ao próprio material dos componentes ser fundido, não é requerido outro material adicional para gerar a união, diferindo-se, portanto, do processo de soldagem por arco elétrico (ENTRON, 1998).

Os processos normais de soldagem recebem energia diretamente de uma fonte externa de eletricidade. Uma característica particular deste processo é que a energia necessária para a união dos metais é armazenada em um banco de capacitores e descarregada com intensidade máxima e de forma instantânea no momento da soldagem, sendo recarregada nos intervalos entre cada soldagem (FUSION SOLUTIONS, 2001).

O processo de soldagem por descarga capacitiva caracteriza-se pela elevada velocidade em que ele é realizado: tempos abaixo de 10 milissegundos para a fusão do material. Para a efetivação da soldagem em um curto período de tempo, o material requer um rápido aquecimento e resfriamento, concentrado nas faces de união entre os dois componentes (FUSION SOLUTIONS, 2001).

O entendimento do processo é facilitado com a sua divisão em cinco etapas principais, as quais podem ser visualizadas na Figura 1.

Figura 1: Etapas do processo de soldagem capacitiva.



Fonte: Adaptado de Keystone, 2014.

As etapas podem ser descritas como:

1. O componente é posicionado próximo ao material base. O polo positivo é conectado ao componente a ser soldado e o polo negativo ao material base.
2. O gatilho da pistola é pressionado, o pino entra em contato com o material base e um arco elétrico é criado.
3. O pino continua sendo pressionado contra o material base e as duas superfícies começam a fundir devido à elevada intensidade de corrente elétrica formada no local.
4. O pino continua sendo pressionado até o arco ser extinguido e o material fundido solidificar-se.
5. Após um tempo aproximado de 0,004 segundos, os componentes estão unidos e o processo finalizado, sem geração de excessos que necessitem ser removidos.

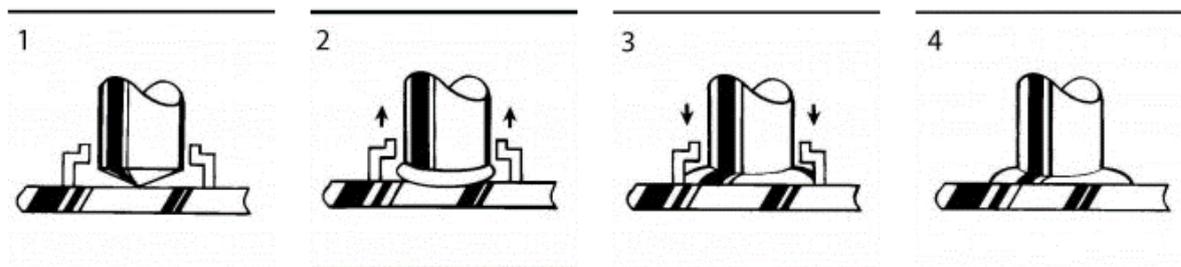
A região localizada em torno do local de fusão entre os dois componentes é chamado comumente de zona afetada pelo calor (ZAC). Esta região é caracterizada pela modificação da microestrutura do metal base localizado próximo à zona de fusão, na qual podem ocorrer alterações alotrópicas importantes, como crescimento do grão e transformação de fase. As modificações e a região total da ZAC variam de acordo com a parametrização do tempo de permanência da ferramenta de soldagem e das taxas de aquecimento e resfriamento (MACHADO, 1996). Como o processo de soldagem por descarga capacitiva ocorre praticamente de forma instantânea, é impedido que os grãos do material tenham um crescimento considerável e que grandes áreas sejam afetadas pela solda (FUSION SOLUTIONS, 2001).

O sistema de soldagem capacitiva é relativamente novo no mercado, possuindo ainda pequena presença nas indústrias. Analisando-se alguns fabricantes de equipamentos para este tipo de soldagem, percebeu-se que o foco principal é a soldagem de parafusos e porcas de diversos materiais (aço baixo carbono, aço inoxidável, alumínio, cobre, bronze, titânio, entre outros) sobre chapas planas.

As vantagens ressaltadas pelos fabricantes são a eliminação de processos posteriores à solda, como remoção de excessos ou respingos de solda, além de não causar descoloração ou marcas na superfície oposta de chapas de baixa espessura. Segundo os fabricantes, com equipamentos normais atinge-se resultados satisfatórios em parafusos com roscas M3 até M10, com um tempo de processo de aproximadamente 0,004 segundos (KEYSTONE, 2014).

Pinos com diâmetros de até 32mm também podem ser soldados, porém os equipamentos são geralmente fabricados sob encomenda. Além disso, o processo exige que seja utilizada uma ponteira que envolve o local da solda. Essa ponteira pode ser visualizada na Figura 2, e tem a função de concentrar o calor na base do pino e evitar escorrimento do material fundido, gerando melhores resultados na solda (IMTEC, 2014).

Figura 2: Soldagem de pino com utilização de ponteira.



Fonte: Imtec, 2014.

Por ser um processo onde duas superfícies entram em contato para serem unidas, os materiais necessitam preparação especial para que haja um bom contato no momento da solda, o que muitas vezes faz dele um processo mais trabalhoso e demorado no quesito preparação dos componentes para a soldagem (DATTOMA, PALANO e PANELLA, 2010). Contudo, se utilizado para pinos, é possível adquiri-los já com uma ponta específica para solda, como pode ser visto no pino da Figura 1, sendo necessário apenas uma operação de lixamento ou escovamento sobre o material base para remoção de eventuais carepas.

Os materiais em que o processo é mais aplicado são: aço baixo carbono, aço inox, bronze, cobre e alumínio. O processo também possui aplicações mais restritas e específicas, como união de componentes em placas eletrônicas, principalmente em casos de soldas entre componentes de diferentes materiais (ARC WELD, 2013).

## 2.2 EQUIPAMENTO

O equipamento comumente utilizado no processo consiste basicamente em um banco de capacitores (responsável por armazenar a energia da fonte e descarregá-la de forma instantânea durante a soldagem) e um dispositivo que permita a fixação dos materiais a serem soldados e execute pressão de forjamento entre eles, realizando a soldagem (OH, LEE e YOO, 2007).

Alguns modelos disponíveis no mercado (Figura 3) possuem um banco de capacitores com botões para ajuste de tensão e corrente, além de diversos modelos de pistolas para soldagem de pinos.

Figura 3: Aparelhos para soldagem por descarga capacitiva.



DIGITAL  
BS 308/318 CD Stud Welder



ANALOG  
TS 308/318 CD Stud Welder



Sistemas de soldagem incluem grampos duplos para conectar os cabos positivo e negativo, além de pistolas de precisão.

Com base em informações encontradas em estudos experimentais sobre equipamentos de soldagem por descarga capacitiva, o mesmo pode ser reproduzido de uma forma simples. Nestes casos, o dispositivo possui apenas ajuste da capacitância e, conseqüentemente, da energia de soldagem, possibilitando variá-la de acordo com o tipo de material e/ou dimensões dos componentes. Estes ajustes variam de um equipamento para outro, de acordo com o número de capacitores no banco.

### **2.2.1 Banco de capacitores**

Um dos componentes de maior importância no dispositivo de soldagem capacitiva é o banco de capacitores. Os capacitores interferem diretamente na parametrização e aplicação nos elementos a serem soldados. Sendo um dispositivo de grande aplicabilidade em circuitos elétricos, na sua forma mais simples o capacitor apresenta-se com dois condutores separados por um isolante, tendo como função básica armazenar energia e descarregá-la de forma instantânea quando necessário. Essa energia varia de acordo com o tamanho do capacitor, podendo-se também fazer uso de associação de capacitores para variá-la (BURIAN JR e LYRA, 2006).

Os capacitores são divididos em dois grandes grupos: fixos e variáveis. Na classe dos fixos podem ser destacados os capacitores de papel, óleo, mica e eletrolítico. O capacitor de papel utiliza o próprio papel como dielétrico podendo cobrir valores de 300 pF até 4  $\mu$ F, onde na maioria dos casos a tensão limite entre as placas não excede 600 V. Para evitar danos como corrosão devido a umidade este tipo de capacitor possui um revestimento específico a base de cera. Muito similares, os capacitores de óleo são simplesmente compostos de papel e imersos em óleo, o que proporciona selamento entre as placas durante a formação do arco elétrico. São também conhecidos como capacitores auto-recuperáveis (HALLIDAY, RESNICK e KRANE, 1996).

Outro modelo de capacitor coberto por um plástico moldado é o composto por mica, sendo um excelente material dielétrico variando sua capacitância entre 50 $\mu$ F até 0,02 $\mu$ F. Já os capacitores eletrolíticos são utilizados quando são necessários elementos de grande capacidade, podendo ser na forma líquida (capacitor eletrólito líquido) ou similar a uma pasta (capacitor eletrólito seco), cobrindo a faixa de 4  $\mu$ F

até diversos milhares de microfarads, com tensão limite que gira em torno de 500 V (HALLIDAY, RESNICK e KRANE, 1996). Por final, os capacitores variáveis são configurados de forma que os valores de capacitância se alteram. Consiste em duas placas de metal disponibilizados de forma com que o conjunto de metal móvel do rotor possibilita o encaixe entre as placas do estator, sendo comumente aplicado para a sintonia de rádios.

### 2.2.2 Tensão nos capacitores

Dois fatores são de grande importância na utilização de capacitores: o valor de capacitância desejado e a tensão a qual será submetido, que depende do material a ser utilizado e da espessura do dielétrico. Em casos de excesso de tensão o capacitor pode sofrer danos que comprometem o seu funcionamento, desta forma a tensão de trabalho deve ser considerada com uma tolerância de cinquenta por cento maior do que a mais alta tensão a ser aplicada no capacitor (HALLIDAY, RESNICK e KRANE, 1996).

### 2.2.3 Capacitores em série

Quando os capacitores são associados em série, pode-se dizer que a corrente que flui no circuito é a mesma e a tensão se divide individualmente (BURIAN JR e LYRA, 2006). Sendo que a corrente tem somente um percurso, a sua quantidade é a mesma em qualquer ponto do circuito. Ela é de curta duração e fluirá até que a tensão da fonte se iguale à tensão total entre os capacitores de acordo com a Equação 1, obedecendo a Lei de Kirchoff (HALLIDAY, RESNICK e KRANE, 1996).

$$Et = E_1 + E_2 + E_n \quad (1)$$

A Equação 2 utilizada para o cálculo da capacitância em série determina o valor total em microfarads, obtendo-se um resultado ligeiramente inferior do que o capacitor de menor capacitância individual (HALLIDAY, RESNICK e KRANE, 1996).

$$Ct = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}} \quad (2)$$

### 2.3.4 Capacitores em paralelo

Na associação dos capacitores em paralelo as suas placas são ligadas diretamente ao terminal da fonte, esta forma de ligação aumenta diretamente a área das placas e, conseqüentemente, a capacitância. Sendo que a capacitância total é o somatório de todos os capacitores que compõem o circuito descrita conforme a Equação 3 (HALLIDAY, RESNICK e KRANE, 1996).

$$C_t = C_1 + C_2 + C_3 + \dots C_n \quad (3)$$

Os dados apresentados até o momento conferem uma visão detalhada sobre os quesitos necessários para o projeto adequado de um banco de capacitores para o dispositivo de soldagem capacitiva.

### **3. METODOLOGIA**

A metodologia utilizada para a realização do projeto pode ser dividida em duas fases principais:

- 1) Construção do dispositivo de soldagem capacitiva
- 2) Testes de funcionamento do dispositivo de soldagem capacitiva

Os detalhes referentes à cada uma destas fases estão descritos na sequência deste capítulo.

#### **3.1 CONSTRUÇÃO DO DISPOSITIVO DE SOLDAGEM CAPACITIVA**

##### **3.1.1 Materiais utilizados**

Durante a etapa de construção do dispositivo de soldagem capacitiva, fez-se necessário fabricar vários componentes, principalmente para a parte mecânica do dispositivo de forjamento. A fabricação destes componentes foi realizada no Laboratório de Usinagem da Faculdade Horizontina, fazendo-se uso das seguintes máquinas, equipamentos e ferramentas: torno mecânico, fresadora universal, furadeira de bancada, morsa, lima, machos e cossinetes para rosca, brocas, fresas, entre outros.

Os materiais utilizados na fabricação destes componentes (chapas de aço, acrílico e madeira, além de barras redondas de aço) estavam disponíveis no almoxarifado da Faculdade Horizontina. Fixadores (porcas e parafusos) e molas foram adquiridos em uma loja de ferragens de Horizontina.

Além dos componentes mecânicos, foram utilizados também vários componentes elétricos. Itens padronizados como capacitores, retificador de onda, chaves liga/desliga e chave disjuntora, foram adquiridos em uma loja de produtos elétricos e eletrônicos de Horizontina. Os fios e a flecha para interruptor estavam disponíveis no Laboratório de Eletricidade e Eletrônica da Faculdade Horizontina, onde também se fez uso de um estanhador, arames de estanho e alicates.

### 3.1.2 Banco de capacitores

Com base nos dados sobre o processo e o equipamento, levantados na etapa de pesquisa bibliográfica, iniciou-se o projeto do banco de capacitores. Definiu-se que os capacitores que a serem utilizados seriam os eletrolíticos, pois, conforme descrito na bibliografia, operam com tensões mais elevadas e geralmente apresentam-se com valores de capacitância maiores. Possuindo maior capacitância, a energia descarregada no momento da soldagem é maior, o que torna esses capacitores ideais para o circuito necessário.

Foram analisados catálogos de fornecedores de componentes elétricos, disponíveis na loja de eletrônica onde os componentes foram adquiridos. O capacitor que apresentou a melhor relação entre tensão de operação e alta capacitância, foi o capacitor eletrolítico com tensão de 80 V e capacitância de 10 mF. A partir desta definição, iniciou-se a elaboração do circuito elétrico.

Para o cálculo do banco de capacitores, precisou-se levar em consideração o requisito de que a tensão máxima suportada pelo capacitor deve ser 50% maior do que a tensão aplicada à ele. Este requisito visa evitar sobrecarga do capacitor durante sua operação, evitando danificação do componente. Sendo assim, ao utilizar o capacitor de 80 V, a tensão aplicada aos capacitores deve ficar na faixa dos 53 V.

Considerando-se que o valor da tensão da fonte é de 110 V, a mesma não poderia ser ligada diretamente à apenas um capacitor, pois seria gerado uma sobrecarga. Para solucionar este problema, decidiu-se ligar dois capacitores em série, pois neste tipo de ligação a tensão é dividida igualmente entre os dois capacitores. Sendo assim, a tensão final à qual os capacitores são expostos é de apenas 55V, valor muito próximo do indicado (53 V).

Com a utilização da ligação em série de capacitores, os valores de capacitância total também são diminuídos. Conforme mostrado no cálculo abaixo, a capacitância final é de 5mF para os capacitores em questão.

$$Ct = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}} = \frac{1}{\frac{1}{10mF} + \frac{1}{10mF}} = 5 \text{ mF}$$

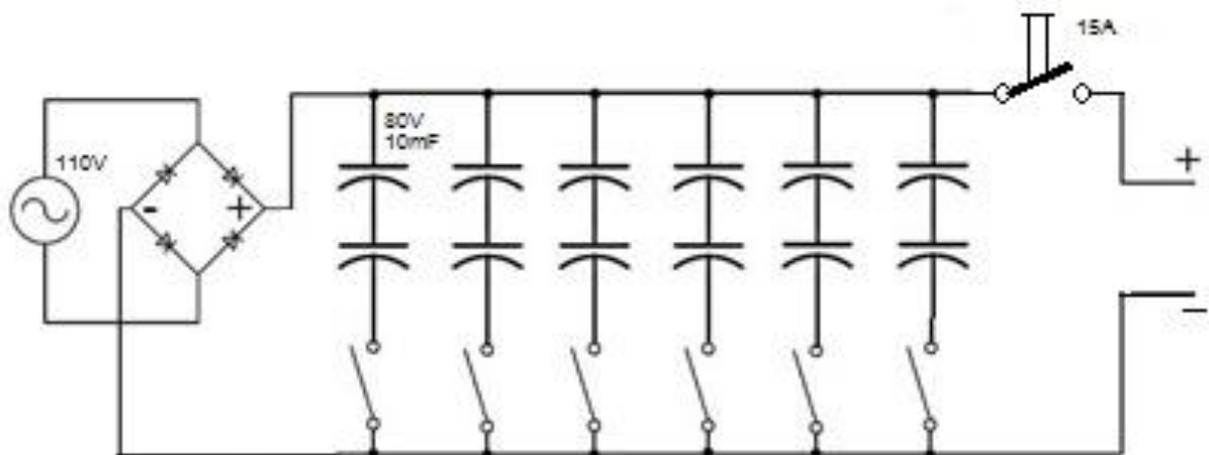
Para obter uma boa variedade de possibilidades de configuração do equipamento, possibilitando que variadas dimensões de materiais pudessem ser soldados, optou-se por fazer uso de seis ligações de capacitores em paralelo,

totalizando assim doze capacitores no equipamento. Neste caso, os capacitores são ligados em paralelo entre si, o que faz com que suas capacitâncias se somem. Com isso, o equipamento pode trabalhar com capacitâncias de 5 mF, 10 mF, 15 mF, 20 mF, 25 mF e 30 mF. A variação de capacitância é controlada através de seis chaves seletoras liga/desliga instaladas em cada uma das linhas em série.

Para alimentar o banco de capacitores, foi necessário instalar um retificador de corrente elétrica, que transforma as ondas de corrente alternada da fonte em corrente contínua. Além disso, foi instalado um disjuntor de 15A na saída do cabo positivo do banco de capacitores. Este disjuntor tem a função de desarmar o sistema após a liberação da descarga capacitiva, extinguindo assim o arco elétrico.

O circuito elétrico que representa todos os detalhes do circuito pode ser visualizado na Figura 4.

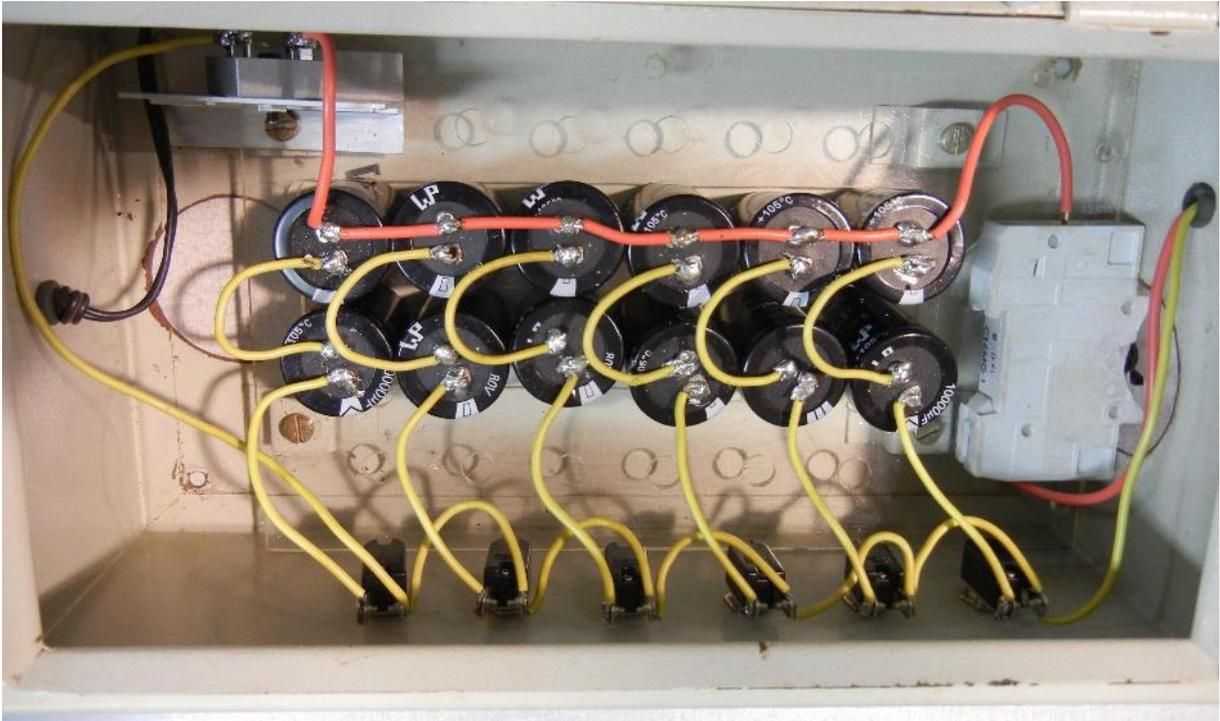
Figura 4: Circuito elétrico do banco de capacitores.



Para a montagem do banco de capacitores, fez-se uso de uma caixa de aço com dimensões aproximadas de 350 x 200 x 150 mm, a qual possui uma tampa na parte superior. Nesta caixa foi realizado um furo para passagem do fio da flecha, inserindo-se também um anel de borracha no furo para evitar que o isolamento do fio pudesse ser danificado.

Dentro da caixa foram instalados os capacitores, o retificador de onda e o disjuntor, conforme demonstrado na Figura 5. A ligação entre os capacitores foi realizada com um fio de cobre de 2 mm de diâmetro, com todos os contatos nos capacitores sendo estanhados para garantir a sua fixação.

Figura 5: Banco de capacitores após o término de sua montagem.



Cada linha em série de capacitores foi ligada em uma chave seletora liga/desliga. Os fios de saída (positivo e negativo) foram conectados ao dispositivo de forjamento, fornecendo a ligação necessária para a passagem da descarga capacitiva.

### 3.1.3 Dispositivo de forjamento

O sistema de forjamento projetado e fabricado, é composto por dois pinos-guia de aço, fixados à duas bases em suas extremidades. A base inferior e os pinos-guia são fabricados de aço SAE 1020, sendo que os pinos-guia são parafusados dentro desta base para garantir sua total estabilidade.

A base superior é fabricada de madeira, sendo os pinos encaixados nesta peça e fixados por duas porcas. A escolha da madeira deve-se ao fato de ser um material isolante, garantindo assim que a descarga capacitiva não atinja o operador que estará acionando o gatilho do dispositivo durante a soldagem.

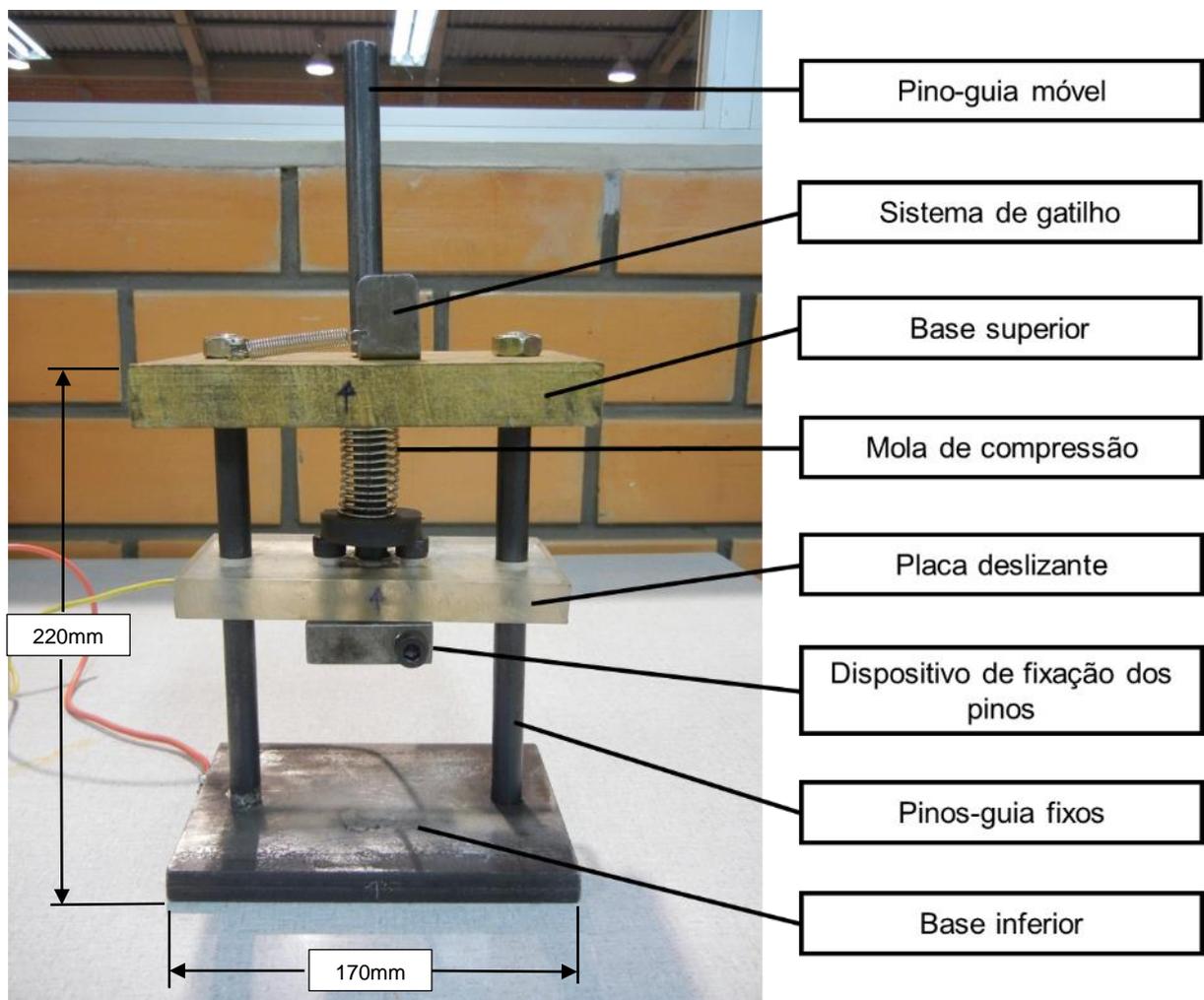
Sobre os pinos-guia, movimenta-se uma placa deslizante, a qual tem como principais funções:

- Servir de base para fixação do dispositivo onde o pino é fixado;
- Deslizar sobre os guias, num movimento linear de sobe/desce;

Por entrar em contato com os demais componentes do dispositivo durante seu movimento, esta placa foi projetada em náilon. A escolha deste material deve-se principalmente ao fato dele ser um material não-condutor, bem como apresentar boa usinabilidade. O dispositivo de forjamento fabricado é apresentado na Figura 6.

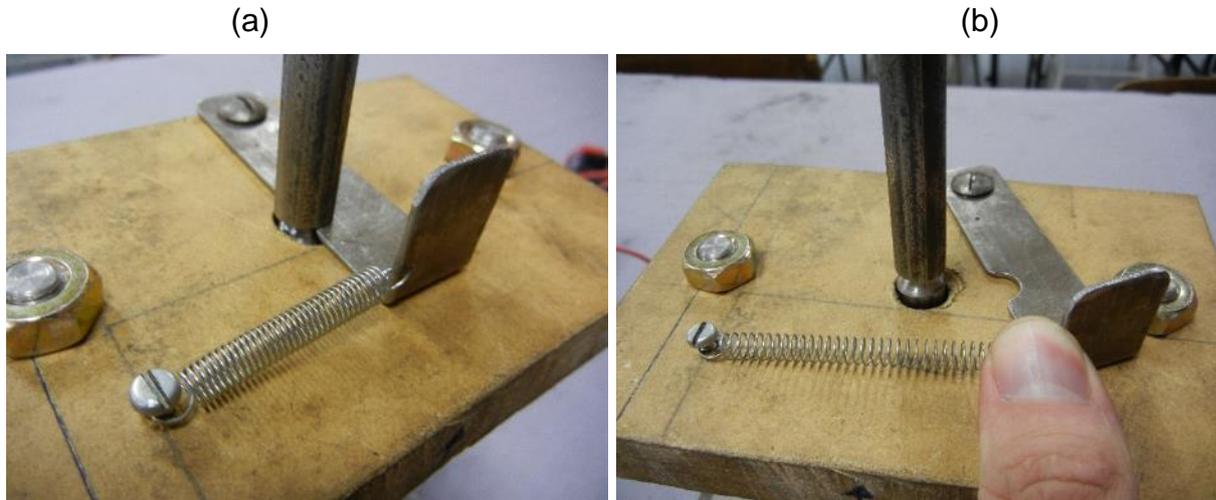
Juntamente com a placa deslizante, foi realizada a montagem de um pino-guia móvel, responsável por guiar a placa deslizante em relação à base superior, mantendo seu alinhamento. Além disso, é no pino-guia móvel que o sistema de gatinho age.

Figura 6: Dispositivo de forjamento.



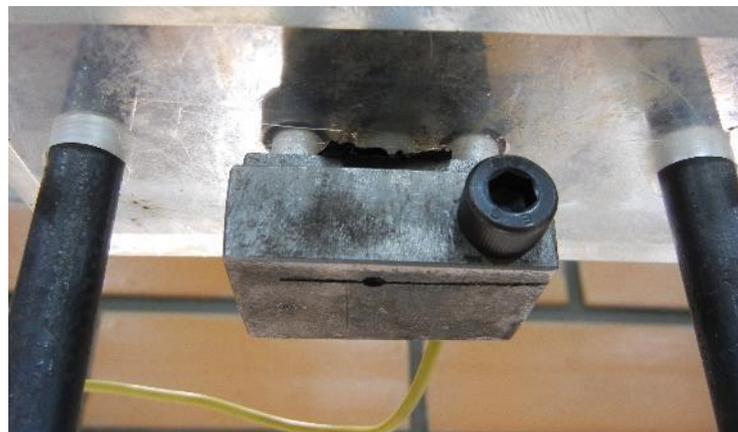
O sistema de gatinho está detalhado na Figura 7. Ele foi concebido com a utilização de uma chaveta com recorte em forma de meia-lua, fixada à base superior em apenas uma das extremidades. Quando a placa deslizante está totalmente levantada, a chaveta encaixa sobre um rasgo localizado no pino-guia móvel. Este encaixe é facilitado e mantido por uma pequena mola de tração.

Figura 7: Sistema de gatilho fechado (a) e aberto (b).



Aos pinos a serem soldados são encaixados em um furo de 3,3 mm realizado no dispositivo de fixação do pino. Este furo, bem como boa parte do bloco onde o mesmo está localizado, foram seccionados por um corte de 1 mm de largura, conforme pode ser visualizado na Figura 8. Na extremidade onde o corte foi iniciado, foi instalado um parafuso com diâmetro de rosca de 8 mm que, ao ser apertado, fecha o corte realizado pela serra e, conseqüentemente, diminui o diâmetro do furo de 3,3 mm, fixando assim o pino dentro do furo. Este componente é fixado por meio de dois parafusos M8 à placa deslizante, o que possibilita que o mesmo seja trocado por outro dispositivo, construído para outra aplicação específica.

Figura 8: Dispositivo para fixação dos pinos.



Com a realização destas etapas, a fabricação do dispositivo para soldagem por descarga capacitiva foi concluída.

## 3.2 TESTES DE FUNCIONAMENTO

### 3.2.1 Descrição da amostra

Para os testes de soldagem com o equipamento, definiu-se utilizar barras redondas de aço baixo carbono (aço SAE 1020) com diâmetro de 3,2 mm e comprimento aproximado de 30 mm. Estes pinos foram previamente usinados, criando-se uma geometria na face de soldagem com um pequeno ressalto com dimensões aproximadas de 0,5 mm de diâmetro por 0,4 mm de comprimento. Os pinos foram soldados sobre chapas retangulares, também de aço baixo carbono (SAE 1020), com dimensões aproximadas de 20 x 20 x 6 mm. A escolha do aço SAE 1020 deve-se a sua grande utilização para soldagem na indústria. As amostras podem ser visualizadas na Figura 9.

Figura 9: Imagem das amostras submetidas ao teste de soldagem: (a) pino de diâmetro de 3,2 mm e (b) chapa de aço.



### 3.2.2 Parâmetros de teste

Definiu-se por realizar os testes com todas as diferentes energias de soldagem que o equipamento fornece (5 mF, 10 mF, 15 mF, 20 mF, 25 mF e 30 mF), realizando-se a soldagem de duas amostras em cada energia de soldagem disponível. Após a soldagem, as amostras foram submetidas ao teste de arrancamento manual, podendo-se avaliar qual das energias de soldagem apresentaria a maior resistência no teste de arrancamento manual dos pinos, demonstrando assim uma melhor fusão entre os componentes.

## 4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 4.1 FUNCIONAMENTO DO DISPOSITIVO DE SOLDAGEM

Com o dispositivo de soldagem capacitiva já fabricado e em plenas condições de funcionamento, foi iniciada a realização dos testes com as amostras anteriormente descritas. O banco de capacitores foi ligado à fonte de 110V, iniciando-se o carregamento dos capacitores. A energia liberada durante a descarga capacitiva é controlada através do acionamento das chaves seletoras liga/desliga situadas na parte frontal do banco de capacitores (Figura 10). Cada chave é responsável por acionar uma das ligações em série de capacitores. Ao ligar as chaves progressivamente, fecha-se a ligação em paralelo entre os capacitores e a capacitância total do equipamento é aumentada. Ligando-se apenas uma das chaves tem-se uma capacitância de 5 mF, somando-se uma capacitância de mais 5 mF a cada chave que é ligada em conjunto.

Figura 10: Chaves seletoras liga/desliga na parte frontal do equipamento.



Inicialmente, o dispositivo foi configurado para realizar a soldagem das amostras com uma capacitância de 5 mF, ligando-se assim apenas uma das chaves seletoras. Para cada aumento de capacitância necessário, mais uma chave seletora foi ligada, adicionando 5 mF ao valor anteriormente configurado. Após a escolha da energia de soldagem, torna-se necessário fixar os componentes a serem soldados no dispositivo de forjamento.

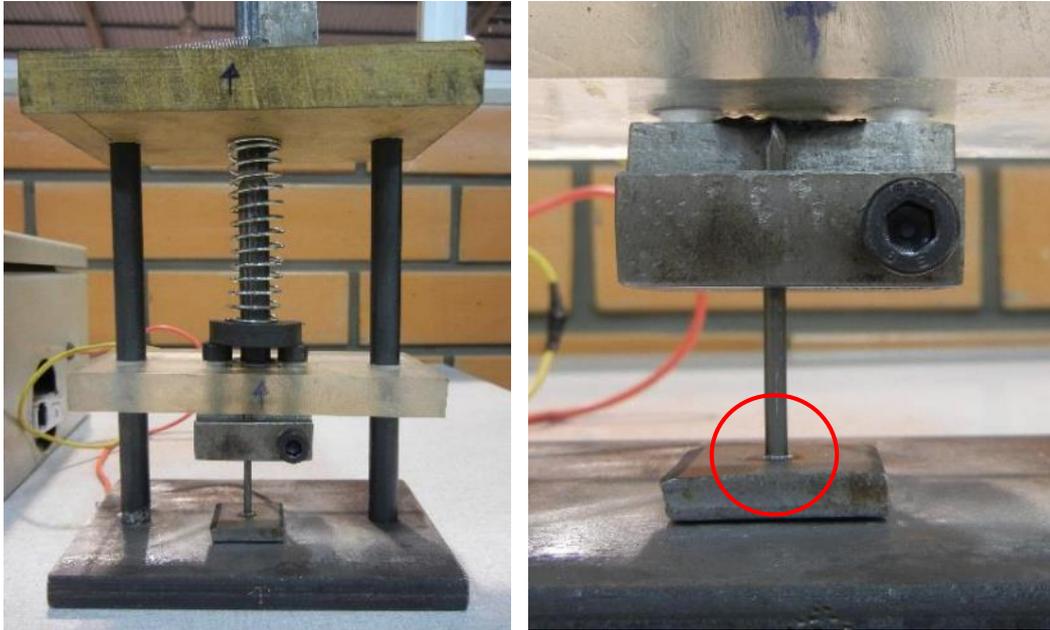
Basicamente, a finalidade do dispositivo de forjamento é proporcionar uma força de fixação adequada aos componentes a serem soldados, funcionando com um sistema de gatilho que pressiona uma peça contra a outra, gerando a descarga capacitiva e conseqüentemente a soldagem. Os pinos foram fixados no dispositivo de forjamento, tendo sua permanência nesta posição garantida pelo aperto do parafuso localizado ao lado do furo onde o pino é encaixado. A chapa sobre a qual o pino foi soldado, foi posicionada sobre a base inferior do equipamento, não necessitando nenhum sistema para a sua fixação nesta posição.

Até este ponto, a placa deslizante está em sua posição inicial, com o gatilho devidamente travado e a mola comprimida, impedindo que ambos os componentes a serem soldados entre em contato. Para a realização da soldagem, basta movimentar o gatilho para o lado, liberando o pino-guia móvel. Neste instante a placa deslizante é impulsionada para baixo devido a força exercida pela mola de compressão, gerando o contato entre os dois componentes a serem soldados e, conseqüentemente, a descarga capacitiva. Mesmo após a finalização da descarga capacitiva, a mola continua aplicando pressão sobre a placa deslizante, garantindo assim que ambos os componentes permaneçam em contato e a solda seja finalizada.

A Figura 11 nos mostra de forma detalhada o que ocorre quando a placa deslizante está em sua posição de final de curso. O pino entra em contato com a chapa e a descarga capacitiva ocorre, realizando-se assim a fusão entre os dois componentes. Após a finalização da soldagem, o parafuso é solto e o pino é liberado.

Este processo foi repetido por doze vezes, sendo realizada a soldagem de duas amostras com cada capacitância provida pelo equipamento.

Figura 11: (a) Dispositivo de forjamento na posição de final de curso e (b) contato entre os componentes.



(a)

(b)

#### 4.2 CUSTOS DO DISPOSITIVO

Os gastos em componentes e materiais para fabricação do dispositivo de soldagem capacitiva podem ser visualizados na Tabela 1. Os componentes adquiridos comercialmente, possuem seu preço de compra citado. Os demais itens estavam disponíveis para utilização nos laboratórios e almoxarifado da Faculdade Horizontina, sendo os seus custos apenas valores estimados (itens identificados com um asterisco \*).

No cálculo apresentado também não são incluídos os gastos com mão-de-obra de usinagem e montagem, pois a mesma não foi contratada e uma estimativa destes valores certamente seria complexa de ser realizada. Estima-se que em torno de 30 horas de mão-de-obra foram necessárias para usinar os componentes e realizar a montagem do equipamento.

Tabela 1: Valores gastos com aquisição de componentes e materiais.

| Componente                      | Preço unitário | Quantidade | Total            |
|---------------------------------|----------------|------------|------------------|
| Capacitor 80v/10000µF           | R\$ 15,00      | 12         | R\$180,00        |
| Chave seletora liga/desliga     | R\$ 8,00       | 6          | R\$ 48,00        |
| Disjuntor 15A                   | R\$ 20,00      | 1          | R\$ 20,00        |
| Retificador de onda             | R\$ 26,00      | 1          | R\$ 26,00        |
| Transformador 220v/110v         | R\$ 100,00     | 1          | R\$100,00        |
| Mola de compressão              | R\$ 5,00       | 1          | R\$ 5,00         |
| Mola de tração                  | R\$ 2,00       | 1          | R\$ 2,00         |
| Parafusos M8x25                 | R\$ 0,50       | 3          | R\$ 1,50         |
| Porcas M8                       | R\$ 0,30       | 2          | R\$ 0,60         |
| Barra aço 1/2" x 1m*            | R\$ 10,00      | 1          | R\$ 10,00        |
| Chapa aço 200x100x6mm*          | R\$ 15,00      | 1          | R\$ 15,00        |
| Chapa Acrílico 180x80x10*       | R\$ 20,00      | 1          | R\$ 20,00        |
| Chapa Madeira MDF 200x100x15mm* | R\$ 5,00       | 1          | R\$ 5,00         |
| <b>Total</b>                    |                |            | <b>R\$433,10</b> |

Como demonstrado no Quadro 1, o custo total para fabricação do equipamento foi de R\$ 433,10. Este custo é considerado baixo para investimento em uma indústria metalúrgica.

#### 4.3 ANÁLISE DAS AMOSTRAS SOLDADAS

O objetivo final do trabalho foi apresentar o projeto e a fabricação de um dispositivo para soldagem capacitiva. Sendo assim, as amostras soldadas para teste não foram submetidas a ensaios normatizados para validação do processo, apenas à um ensaio básico e qualitativo de arrancamento do pino soldado sobre a chapa, para identificar se realmente houve soldagem entre os dois materiais.

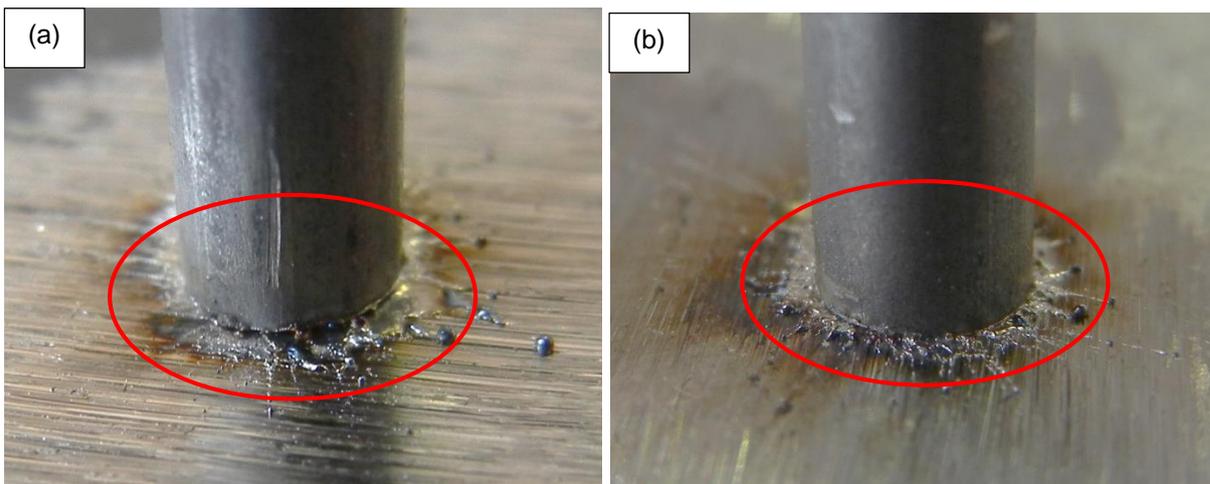
O teste realizado consistiu basicamente em fixar a chapa em uma morsa e, com a ajuda de um alicate, aplicar com a mão uma força de tração no pino, até que o rompimento da solda fosse evidenciado. As únicas variáveis avaliadas neste teste foram: força de arrancamento e análise visual da região de união após o arrancamento dos pinos.

A análise foi iniciada com as amostras soldadas com a menor capacitância, seguindo-se progressivamente para as maiores. A primeira amostra demonstrou pouca resistência ao arrancamento, soltando-se da chapa facilmente. A partir da segunda amostra, a força necessária foi aumentando progressivamente,

demonstrando uma melhor fusão entre as duas peças ao fazer-se uso de uma capacitância maior. A quinta e a sexta amostra não puderam ser arrancadas realizando-se apenas a força normal de tração com a alicate. Foi necessário aplicar também uma força lateral para que a quebra pudesse ser evidenciada.

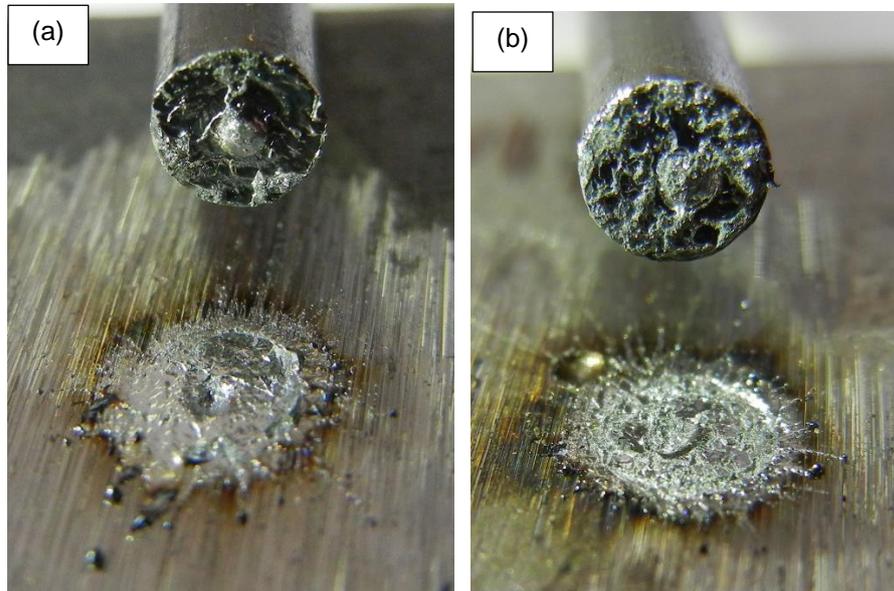
Através de uma análise visual realizada antes do teste de arrancamento, pode-se observar uma grande diferença entre a amostra soldada com energia de 5mF e a amostra soldada com 30 mF. Com a menor energia, a soldagem foi incompleta, o que é demonstrado pela folga remanescente entre o pino e a chapa, a qual também é encontrada na amostra soldada com a energia máxima provida pelo equipamento, porém em escala muito menor (Figura 12).

Figura 12: Folga encontrada: (a) amostra soldada com energia de 5 mF e (b) amostra soldada com 30 mF.



Após o ensaio de arrancamento, verificou-se a solda formada em ambas as peças, ficando nítido que, com energia menor a soldagem, houve menor fusão de material, enquanto com energia de soldagem maior, houve maior fusão de material entre as duas peças (Figura 13).

Figura 13: Local da solda - (a) amostra com energia de soldagem de 5 mF e (b) amostra com energia de soldagem de 30 mF.



O processo de validação de ajustes necessários para a realização de uma soldagem com resistência satisfatória não foi focado neste trabalho, sendo assim, foram demonstradas apenas as imagens das soldas com capacitâncias de 5 mF e 30 mF para efeitos comparativos entre o melhor e o pior resultado obtido durante os testes.

## **5. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Durante este trabalho buscou-se informações específicas relacionadas ao processo de soldagem por descarga capacitiva, com o intuito de entender o processo e os equipamentos, para possibilitar a fabricação de um dispositivo para soldagem por descarga capacitiva. Ao final do trabalho, foi apresentado o protótipo do dispositivo bem como alguns testes de soldagem, os quais demonstraram que o processo funciona perfeitamente.

Levando-se em consideração o fator: grau de dificuldade para desenvolvimento de um dispositivo de soldagem capacitiva, pode-se afirmar que o dispositivo apresenta construção simples e que seus componentes podem ser facilmente adquiridos em lojas de produtos eletrônicos ou no comércio local. Este é comprovadamente um fator positivo, que pode incentivar empresas de pequeno porte a implementarem este processo de soldagem em aplicações específicas que as mesmos possuam.

Quanto à questão de qualidade e validação da solda realizada, estudos mais aprofundados são necessários. Aconselha-se que cada dispositivo de soldagem seja projetado e construído de acordo com a aplicação específica da indústria que o pretende implementar. Assim, tem-se um equipamento com possibilidade de realização de soldas de qualidade, feitas rapidamente e com um equipamento versátil. Para a validação destas soldas, são aconselhados ensaios de tração ou arrancamento dos pinos, bem como metalografia nos locais da solda para avaliar a microestrutura gerada.

Mesmo assim, pôde-se verificar que a quantidade de energia liberada pelo banco de capacitores possui ligação direta com a qualidade da solda a ser realizada, sendo este o fator de maior importância no ajuste do equipamento. O mesmo deve ser testado a cada novo item em que o processo pode vir a ser aplicado, fazendo parte do processo de validação da solda.

### **5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Para trabalhos futuros, sugere-se a utilização do equipamento para realização de soldagem em amostras de materiais e dimensões variadas, com realização de

análise metalográfica da região de solda a fim de investigar as transformações microestruturais geradas pelo processo de soldagem por descarga capacitiva, bem como a sua influência na resistência final da união. Além disso, um trabalho nesta área poderia gerar uma tabela com os parâmetros indicados para cada material, de acordo com as suas dimensões, o que facilitaria a futura utilização do equipamento, bem como identificaria suas limitações.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARC WELD. Stud Welding. **Processo por descarga capacitiva**, 2013. Disponível em: <<http://www.arcweld.com.br/cd.htm>>. Acesso em: 3 Abr. 2013.

BURIAN JR, Y.; LYRA, A. C. C. **Circuitos elétricos**. Sao Paulo: Pearson Prentice Hall, 2006.

DATTOMA, V.; PALANO, F.; PANELLA, F. W. Mechanical and technological analysis of AISI 304 butt joints welded with capacitor discharge process. **Materials and Design**, Lecce, n. 31, p. 176-184, 2010.

ENTRON. **Resistance welding**, 1998. Disponível em: <[http://spotweldingconsultants.com/welding\\_basics\\_english.pdf](http://spotweldingconsultants.com/welding_basics_english.pdf)>. Acesso em: 17 Mar. 2013.

FUSION SOLUTIONS. **Capacitor discharge welding technical data, 2001**. Disponível em: <[http://www.cdfusion.com/doc/CDFS\\_White\\_Paper.PDF](http://www.cdfusion.com/doc/CDFS_White_Paper.PDF)>. Acesso em: 17 Mar. 2013.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; KRANE, K. S. **Física 3**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1996.

IMTEC. **Stud Welding**, 2014. Disponível em: <<http://www.studweldingbrasil.com.br/como-funciona-stud-welding/>>. Acesso em: 15 Set. 2014.

KEYSTONE. Keystone Fastening Technologies. **Capacitor Discharge Stud Welding: The Process**, 2014. Disponível em: <<http://www.keystonefastening.com/capacitor-discharge-stud-welding-process.html>>. Acesso em: 15 Set. 2014.

MACHADO, I. G. **Soldagem e Técnicas Conexas: Processos**. Porto Alegre: [s.n.], 1996.

OH, H. S.; LEE, J. H.; YOO, C. D. Simulation of capacitor discharge stud welding process and void formation. **Science and Technology of Welding and Joining**, v. 12, n. 3, p. 274-281, 2007.