

GILBERTO FELIPE FERNANDES

AVALIAÇÃO DAS POTENCIALIDADES DO
PROCESSO CMT PIN EM DIFERENTES MATERIAIS



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2016

GILBERTO FELIPE FERNANDES

**AVALIAÇÃO DAS POTENCIALIDADES DO PROCESSO CMT PIN EM
DIFERENTES MATERIAIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**.

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Ruham Pablo Reis

UBERLÂNDIA - MG

2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

F363a Fernandes, Gilberto Felipe, 1958-
2016 Avaliação das potencialidades do processo CMT PIN em diferentes
materiais / Gilberto Felipe Fernandes. - 2016.
130 f. : il.

Orientador: Ruham Pablo Reis.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.
Inclui bibliografia.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Soldagem - Teses. I. Reis,
Ruham Pablo, 1979- II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

CDU: 621

À Deus.

Aos meus pais Orlando (in memoriam) e Iria.

Ao meu irmão Reinaldo.

Ao meu filho Raphael e minha esposa Clarice.

AGRADECIMENTOS

Principalmente ao Senhor Deus por estar sempre me protegendo, iluminando e colocando-me sempre em bons caminhos;

Ao meu orientador prof. Dr. Ruham Pablo Reis pela orientação, compreensão, paciência, incentivo e pelos momentos de aprendizado, que tanto contribuíram com meu crescimento pessoal e profissional;

A todos os professores que contribuíram com a realização deste trabalho: Américo Scotti, Valtair Antônio Ferraresi e Louriel Oliveira Vilarinho do Laprosolda e as professoras Núbia dos Santos Saad e Rosenda Valdés Arencibia;

Aos meus amigos de sempre professor Leandro Aureliano da Silva e Raphael Silva Lins;

Aos meus amigos da UFU em especial à Iaroslav Skhabovshyl, Gilcimar Pereira e Walter dos Santos e aos técnicos e engenheiros do Laprosolda;

Ao programa de Pós-graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia pela oportunidade e ao Laprosolda/UFU pelo suporte técnico;

À minha família pelo apoio;

Ao CNPq pelo apoio financeiro.

FERNANDES, G. F. **Avaliação das Potencialidades do Processo CMT Pin em Diferentes Materiais**. 2016. 130 f. Dissertação, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia/MG, Brasil.

RESUMO

A busca por melhoria de processos de fabricação é contínua na indústria de construção mecânica em geral. Neste sentido, processos já existentes são aprimorados e outros criados ou derivados. Este é o caso do processo denominado CMT PIN, concebido a partir do processo de soldagem MIG/MAG CMT (Cold Metal Transfer), que é capaz de depositar pinos metálicos de pequeno diâmetro e altura em materiais de base também metálicos. Por se tratar de desenvolvimento relativamente recente, o CMT PIN não parece ter muitas aplicações industriais, tão pouco se conhece a fundo sua capacidade de depositar pinos em diferentes materiais e sobre possíveis efeitos desta deposição em fatores como propriedades mecânicas do metal de base. Assim, este trabalho tem como objetivo entender e verificar a aplicação do processo CMT PIN em chapas finas de aço carbono, de aço galvanizado e de alumínio, especificamente avaliando os efeitos dos parâmetros do processo sobre a formação dos pinos e sobre a distorção e resistência mecânica do material de base. Foram avaliadas diferentes combinações de altura e quantidade de pinos e espessura do material de base, sempre com pinos de cabeça cilíndrica. O estudo do processo de deposição dos pinos foi baseado nos sinais de corrente e tensão e potência resultante do processo e em imagens do mesmo obtidas por filmagem de alta velocidade. A avaliação da distorção das chapas foi feita por medições de planicidade antes e depois da deposição dos pinos. O efeito da deposição dos pinos na resistência mecânica das chapas foi verificado por meio de valores de limite de resistência à tração à tração e alongamento obtidos de ensaio de tração e complementados por avaliação metalográfica da zona de união entre pino e chapa. O processo CMT PIN se mostrou bastante repetitivo para todas as combinações avaliadas. Mudanças na altura dos pinos depositados e na espessura das chapas em geral não causou elevadas distorções ou comprometimento das propriedades mecânicas dos metais de base avaliados, com exceção do alumínio que se mostrou mais sensível à presença dos pinos.

Palavras-Chave: CMT PIN, Pinos, Propriedades Mecânicas, Distorção.

FERNANDES, G. F. **Evaluation of the Potentialities of CMT Pin Process to Different Materials**. 2016. 130 p. Dissertation, Federal University of Uberlândia, Uberlândia/MG, Brazil.

ABSTRACT

The search for manufacturing processes improvement is continuous in the mechanical construction general industry. In this sense, existing processes are improved and others created or derived. This is the case of the CMT PIN process, devised from the MIG/MAG CMT (Cold Metal Transfer) welding, which is capable of depositing short and thin metallic pins also in metallic base materials. Because it is a relatively recent development, the CMT PIN process does not appear to have many industrial applications, and there is no consistent information on its capability to deposit pins in different materials and possible effects of such deposition on base metal mechanical properties. Thus, this work aims to improve the understanding of the CMT PIN process and verify its application in thin sheets of carbon steel, galvanized steel and aluminum, specifically assessing the effects of process parameters on the pin formation stages, and on the distortion and mechanical strength of the base material. Different combinations of height and number of pins and thickness of the base material were evaluated, always with cylindrical-headed pins. The study of the pin deposition stages was based on the voltage and current signals and resultant power of the process and considering images obtained by high-speed filming. The evaluation of the distortion of the sheets was carried out by measurement of flatness before and after the deposition of pins. The effect of the deposition of the pins on the mechanical strength of the sheets was verified by ultimate tensile strength and elongation values obtained from tensile tests and complemented by metallographic evaluation of the joint area between pin and base material. The CMT PIN process proved to be quite repetitive for all evaluated combinations. Changes in the height of the deposited pins and thickness of the sheets in general did not cause high distortion or compromise the mechanical properties of the assessed base materials, except the aluminum that was more sensitive to the presence of pins.

Keywords: CMT PIN, Pins, Mechanical Properties, Distortion.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| <i>Figura 1.1 – Sequência geral de execução do trabalho</i> | 2 |
| <i>Figura 2.1 - Representação esquemática dos principais modos de transferência metálica (BARRA, 1998)</i> | 6 |
| <i>Figura 2.2 - Comportamento tensão e corrente de soldagem na transferência por curto-circuito e sequencia correspondente de imagens do processo (SCOTTI et al. , 2008)</i> | 7 |
| <i>Figura 2.3 - Variação dureza na ZTA de ligas de alumínio 6061-T4 eT6 nas condições como soldada e após tratamento térmico de envelhecimento após soldagem(MODENESI, 2011)</i> 8 | |
| <i>Figura 2.4 - Tocha especial do processo CMT (à esquerda) e sequência de imagens do ciclo de curto-circuito (à direita) (FRONIUS, 2007)</i> | 10 |
| <i>Figura 2.5 - Movimento de avanço e recuo do arame no processo CMT (FRONIUS, 2007)</i> 10 | |
| <i>Figura 2.6 – Sinais de corrente e tensão típicos da soldagem CMT (a), CMT Pulse (b), CMT Advanced (c) and CMT Pulse Advanced (d) (CONG et al., 2015)</i> | 11 |
| <i>Figura 2.7 - Ilustração do equipamento para soldagem CMT (FRONIUS, 2007)</i> | 13 |
| <i>Figura 2.8 - Formação sequencial do pino com cabeça no formato de abaulada no processo CMT Pin (FRONIUS, 2007)</i> | 13 |
| <i>Figura 2.9 - Diferentes geometrias de pinos possíveis com o processo CMT PIN (da esquerda para a direita: pino com cabeça abaulada, cabeça cilíndrica e cabeça apontada) e CMT Print (imagem mais à direita) (FRONIUS, 2007)</i> | 14 |
| <i>Figura 2.10 - Características geométricas de pinos de aço carbono depositados pelo processo CMT PIN, onde: esquerda - relação entre a altura média do pino e a regulagem do “Altitude Adaptation”, com “Ball/Cyl. Adaptation” fixado em 0; direita – relação entre a altura média e o diâmetro médio de cabeça do pino e a regulagem do “Ball/Cyl Adaptation”, com “Altitude Adaptation” fixado em 0 (SKHABOVSKYI et al., 2015).</i> | 15 |
| <i>Figura 2.11 - Ondas de corrente e tensão durante a deposição de pinos por CMT PIN com referências às etapas de formação de pinos, onde: 1ª região = soldagem do pino na chapa; 2ª região = tempo de resfriamento/solidificação; 3ª região = tempo de aquecimento; 4ª região = fase de ruptura do pino (GARTNER, 2015)</i> | 15 |
| <i>Figura 2.12 - Configuração de deposição dos pinos (WITTWER et al.,2012)</i> | 16 |
| <i>Figura 2.13 - Limite de resistencia à tração (a) e deformação correspondente (b) para diferentes configurações de deposição de pinos por CMT PIN em chapas de alumínio de 2 mm de espessura (1R – 3R) e para o material de base sem pinos (BM) (WITTWER et al., 2012)</i> | 16 |

| | |
|---|-----------|
| <i>Figura 2.14 - Sequência de deposição de pinos com o processo de soldagem por arco. (RIVET & WELDSTUD MANUFACTURING CC, 2015).....</i> | <i>18</i> |
| <i>Figura 2.15 - Seqüência de deposição de pinos com o Processo de Soldagem do Pino de Descarga do Condensador (RIVET & WELDSTUD MANUFACTURING CC, 2015).....</i> | <i>19</i> |
| <i>Figura 3.1 - Equipamento de soldagem CMT.....</i> | <i>22</i> |
| <i>Figura 3.2 - Controle remoto Fronius RCU 5000i.....</i> | <i>23</i> |
| <i>Figura 3.3 - Misturador de gás utilizado.....</i> | <i>23</i> |
| <i>Figura 3.4 - Analisador de gás.....</i> | <i>24</i> |
| <i>Figura 3.5 - Sistema de lixamento e Polimento: (a) Lixadeira manual e (b) Politriz.....</i> | <i>24</i> |
| <i>Figura 3.6 - Máquina de medir por coordenada Mitutoyo M443.....</i> | <i>25</i> |
| <i>Figura 3.7 - Projetor de perfil PJ-A3000.....</i> | <i>26</i> |
| <i>Figura 3.8 - Equipamento utilizado para teste de tração: (a) Máquina de tração e (b) Garra de fixação do corpo de prova.....</i> | <i>27</i> |
| <i>Figura 3.9 - Microscópio ótico.....</i> | <i>27</i> |
| <i>Figura 3.10 - Câmera de filmagem de alta velocidade.....</i> | <i>28</i> |
| <i>Figura 3.11 - Placa para aquisição de dados.....</i> | <i>28</i> |
| <i>Figura 4.1. - Corpo de prova de 100 x 10 mm.....</i> | <i>30</i> |
| <i>Figura 4.2. - Dimensão do corpo de Prova (Fonte: ASTM E8/E8M, 2013).....</i> | <i>31</i> |
| <i>Figura 4.3. - Chapa de alumínio com os corpos de prova cortados.....</i> | <i>31</i> |
| <i>Figura 4.4. - Marcação da posição de deposição dos 3 pinos.....</i> | <i>32</i> |
| <i>Figura 4.5 - Fixação do corpo de prova.....</i> | <i>33</i> |
| <i>Figura 4.6 - Três pinos depositados em CP de aço carbono.....</i> | <i>33</i> |
| <i>Figura 4.7 - Controle remoto RCU5000i com os parâmetros do CMT PIN.....</i> | <i>34</i> |
| <i>Figura 4.8 - Esquema mostrando o posicionamento da mesa, dispositivo de fixação com CP, câmara de alta velocidade e as lâmpadas para iluminação.....</i> | <i>36</i> |
| <i>Figura 4.9 - Ondas de corrente e tensão da deposição de pinos de aço carbono, espessura de chapa de 1,0 mm e altura de pino de 3,0 mm.....</i> | <i>37</i> |
| <i>Figura 4.10 - Ondas de corrente e tensão da deposição de pinos de aço carbono, espessura de chapa de 1,0 mm e altura de pino de 5,0 mm.....</i> | <i>38</i> |
| <i>Figura 4.11 - Visualização de fases da deposição de pinos em chapa de aço carbono com espessura 1,0 mm e pino 3,0 mm de altura.....</i> | <i>39</i> |
| <i>Figura 4.12 - Visualização de fases da deposição de pinos em chapa de aço galvanizado com espessura 1,0 mm e pino de 3,0 mm de altura.....</i> | <i>39</i> |
| <i>Figura 4.13 - Visualização de fases da deposição de pinos em chapa de aço galvanizado com espessura 1,0 mm e pino de 5,0 mm de altura.....</i> | <i>40</i> |
| <i>Figura 4.14 - Visualização de fases de deposição de pinos em chapa de alumínio com</i> | |

| | |
|--|-----|
| <i>espessura 1,0 mm e pino de 3,0 mm de altura.</i> | 40 |
| <i>Figura 4.15 - Inclinação e não uniformidade dos pinos de alumínio (detalhe dos pinos à direita)</i> | 41 |
| <i>Figura 4.16 - Uniformidade dos pinos de aço carbono</i> | 41 |
| <i>Figura 4.17 - Tempo de solidificação e aquecimento para pinos em chapa de aço carbono.</i> | 43 |
| <i>Figura 4.18 - Tempo de solidificação e aquecimento para pinos em chapa de aço galvanizado.</i> | 43 |
| <i>Figura 4.19 - Tempo de solidificação e aquecimento para pinos em chapa de alumínio</i> | 44 |
| <i>Figura 4.20 - Altura dos pinos para as combinações testadas</i> | 45 |
| <i>Figura 4.21.- Oscilogramas de corrente, tensão e potência elétrica para chapa de aço carbono com espessura de 1,0 mm e altura dos pinos de 5,0 mm.</i> | 46 |
| <i>Figura 4.22 - Oscilogramas de corrente, tensão e potência elétrica para chapa de aço carbono com espessura de 1,0 mm e altura dos pinos de 3,0 mm.</i> | 477 |
| <i>Figura 4.23 - Oscilogramas de corrente, tensão e potência elétrica para chapa de aço carbono com espessura de 0,5 mm e altura dos pinos de 5,0 mm.</i> | 48 |
| <i>Figura 4.24 -Oscilogramas de corrente, tensão e potência elétrica para chapa de aço carbono com espessura de 0,5 mm e altura dos pinos de 3,0 mm.</i> | 49 |
| <i>Figura 4.25 - Oscilogramas de corrente, tensão e potência elétrica para chapa de aço galvanizado com espessura de 1,0 mm e altura dos pinos de 5,0 mm</i> | 50 |
| <i>Figura 4.26 - Oscilogramas de corrente, tensão e potência elétrica para chapa de aço galvanizado com espessura de 1,0 mm e altura dos pinos de 3,0 mm</i> | 51 |
| <i>Figura 4.27 - Oscilogramas de corrente, tensão e potência elétrica para chapa de aço galvanizado com espessura de 0,5 mm e altura dos pinos de 5,0 mm</i> | 52 |
| <i>Figura 4.28 - Oscilogramas de corrente, tensão e potência elétrica para chapa de aço galvanizado com espessura de 0,5 mm e altura dos pinos de 3,0 mm</i> | 53 |
| <i>Figura 4.29 - Oscilogramas de corrente, tensão e potência elétrica para chapa de alumínio com espessura de 1,0 mm e altura dos pinos de 5,0 mm</i> | 54 |
| <i>Figura 4.30 - Oscilogramas de corrente, tensão e potência elétrica para chapa de alumínio com espessura de 1,0 mm e altura dos pinos de 3,0 mm</i> | 55 |
| <i>Figura 4.31 - Oscilogramas de corrente, tensão e potência elétrica para chapa de alumínio com espessura de 0,5 mm e altura dos pinos de 5,0 mm</i> | 56 |
| <i>Figura 4.32 - Oscilogramas de corrente, tensão e potência elétrica para chapa de alumínio com espessura de 0,5 mm e altura dos pinos de 3,0 mm</i> | 57 |
| <i>Figura 4.33 - Potência média instantânea nos tempos de arco aberto e de aquecimento dos pinos depositados em aço galvanizado</i> | 59 |
| <i>Figura 4.34 - Potência média instantânea nos tempos de arco aberto e de aquecimento dos</i> | |

| | |
|--|----|
| <i>pinos depositados em aço carbono</i> | 59 |
| <i>Figura 4.35 - Potência média instantânea nos tempos de arco aberto e de aquecimento dos pinos depositados em alumínio</i> | 60 |
| <i>Figura 5.1 - Desenho da malha de referência traçada nos CP (dimensões em mm)</i> | 63 |
| <i>Figura 5.2 - Indicação dos 49 pontos medição de distorção dos CPs (dimensões em mm)</i> . | 63 |
| <i>Figura 5.3 - Indicação dos 60 pontos para deposição dos pinos nos CPs (dimensões em mm) e sequência de deposição</i> | 64 |
| <i>Figura 5.4 - Indicação dos 120 pontos para deposição de pinos nos CPs (dimensões em mm)</i> | 65 |
| <i>Figura 5.5 - Dispositivo para fixação dos corpos de prova</i> | 66 |
| <i>Figura 5.6 - Indicação da linha longitudinal central (LLC), (linha de medição) considerada para representação da deformação dos CPs (dimensões em mm)</i> | 69 |
| <i>Figura 5.7 - Representação gráfica da deformação ao longo da linha longitudinal central dos CPs de alumínio com espessura de 1,0 mm</i> | 70 |
| <i>Figura 5.8 - Representação gráfica da deformação ao longo da linha longitudinal central dos CPs de alumínio com espessura de 0,5 mm</i> | 71 |
| <i>Figura 5.9 - Representação gráfica da deformação ao longo da linha longitudinal central dos CPs de aço carbono com espessura de 1,0 mm</i> | 72 |
| <i>Figura 5.10 - Representação gráfica da deformação ao longo da linha longitudinal central dos CPs de aço carbono com espessura de 0,5 mm</i> | 73 |
| <i>Figura 5.11 - Representação gráfica da deformação ao longo da linha longitudinal central dos CPs de aço galvanizado com espessura de 1,0 mm</i> | 74 |
| <i>Figura 5.12 - Representação gráfica da deformação ao longo da linha longitudinal central dos CPs de aço galvanizado com espessura de 0,5 mm</i> | 75 |
| <i>Figura 5.13 - Deformações máximas em função do material, espessura de chapa, altura e quantidade de pinos depositados</i> | 76 |
| <i>Figura 5.14 - Esquema de proposta de bocal de proteção modificado para servir também de fixador (evitar deformação) das chapas para deposição de pinos pelo processo CMT PIN</i> . | 78 |
| <i>Figura 6.1 - Amostras de chapas com pinos no procedimento de embutimento</i> | 80 |
| <i>Figura 6.2 - Curvas de tensão versus deformação para chapas de alumínio com pinos de 3,0 mm de altura e de espessura de 1,0 mm (acima à esquerda) e de 0,5 mm (acima à direita) e com pinos de 5,0 mm de altura e de espessura de 1,0 mm (no centro à esquerda) e 0,5 mm (no centro à direita) e sem pinos e de espessura de 1,0 mm (abaixo à esquerda) e 0,5 mm (abaixo à direita)</i> | 82 |
| <i>Figura 6.3 - Curvas de tensão versus deformação para chapas de aço carbono com pinos de 3,0 mm de altura e espessura de 1,0 mm (acima à esquerda) e de 0,5 mm (acima à direita)</i> | |

| | |
|---|----|
| e com pinos de 5,0 mm de altura e de espessura de 1,0 mm (no centro à esquerda) e 0,5 mm (acima no centro à direita) e sem pinos e de espessura de 1,0 mm (abaixo à esquerda) e 0,5 mm (abaixo à direita) | 83 |
| Figura 6.4 - Curvas de tensão versus deformação para chapas de aço galvanizado com pinos de 3,0 mm de altura e espessura de 1,0 mm (acima à esquerda) e de 0,5 mm (acima à direita) e com pinos de 5,0 mm de altura e de espessura de 1,0 mm (no centro à esquerda) e 0,5 mm (acima no centro à direita) e sem pinos e de espessura de 1,0 mm (abaixo à esquerda) e 0,5 mm (abaixo à direita) | 84 |
| Figura 6.5 - Limite de resistência à tração para chapas de aço carbono com espessuras de 1,0 e 0,5 mm..... | 87 |
| Figura 6.6 - CPs de aço carbono depois de fraturados | 87 |
| Figura 6.7 - Alongamento para chapa de aço carbono c/ espessura de 1,0 mm e 0,5 mm . | 88 |
| Figura 6.8 - Limite de resistência à tração para chapa de aço galvanizado com espessura de 1,0 mm e 0,5 mm..... | 89 |
| Figura 6.9 - CPs de aço galvanizado depois de fraturados | 89 |
| Figura 6.10 - Alongamento p/ chapas de aço galvanizado com espessura de 1,0 e 0,5 mm | 90 |
| Figura 6.11 - Limite de resistência à tração para chapas de alumínio com espessuras de 1,0 e 0,5 mm..... | 91 |
| Figura 6.12 - CPs de alumínio depois de fraturados | 91 |
| Figura 6.13 - Alongamento para chapas de alumínio com espessura de 1,0 e 0,5 mm..... | 91 |
| Figura 6.14 - Imagens metalográficas da junção dos pinos de 3 e 5 mm de altura com chapas de aço carbono com espessura de 0,5 e 1,0 mm | 93 |
| Figura 6.15 - Imagens metalográficas da junção dos pinos de 3 e 5 mm de altura com chapas de aço galvanizado com espessura de 0,5 e 1,0 mm | 94 |
| Figura 6.16 - Imagens metalográficas da junção dos pinos de 3 e 5 mm de altura com chapas de alumínio com espessura de 0,5 e 1,0 mm. | 95 |
| Figura 6.17 - Pino depositado em chapa de alumínio com detalhe da fusão parcial do metal de base (chapa)(à esquerda), da inclinação do pino (ao centro) e da estrição do pino (à direita) | 96 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|-----------|
| Tabela 2.1 - Classificação de transferência metálica pelo IIW segundo SÁBIO (2007,p.35, apud IIW Doc.n° X11-1888-06,2006 p.10)..... | 5 |
| Tabela 2.2 - Destaques da aplicação dos processos ASW e CDSW (baseados em (CUTLASS STUD WELDING , 2015)..... | 19 |
| Tabela 3.1 - Dados tabelados da composição química do arame ER70-S6 AWS A5.18 (Fonte: MATWEB, 2015)..... | 20 |
| Tabela 3.2 - Dados tabelados da composição química do qrame ER 4043-O AWS A5.10 (Fonte: MATWEB, 2015)..... | 21 |
| Tabela 3.3 - Dados tabelados da composição química do aço SAE 1020 (Fonte: MATWEB, 2015)..... | 21 |
| Tabela 3.4 - Dados tabelados da composição química do alumínio 5052 (Fonte: MATWEB, 2015)..... | 22 |
| Tabela 3.5 - Dados tabelados das propriedades mecânicas do aço carbono (SAE 1020) e alumínio ABNT 5052 (Fonte: MATWEB, 2015)..... | 22 |
| <i>Tabela 4.1 - Combinação das condições e parâmetros utilizados no estudo da deposição dos pinos.</i> | <i>30</i> |
| <i>Tabela 4.2 - Parâmetros de deposição adotados.....</i> | <i>34</i> |
| <i>Tabela 4.3 - Valores de resistência e indutância dos materiais utilizados.</i> | <i>35</i> |
| <i>Tabela 4.4 - Parâmetros de deposição dos pinos adotados e tempos de solidificação (tsolpp) e aquecimento (taq) resultantes.....</i> | <i>42</i> |
| <i>Tabela 4.5 - Resultados das medidas geométricas dos pinos.....</i> | <i>44</i> |
| <i>Tabela 4.6 Valores médios de potência média instantânea para as combinações avaliadas</i> | <i>58</i> |
| <i>Tabela 5.1 - Combinações das condições e parâmetros utilizados na avaliação do efeito da deposição de pinos na distorção das chapas.....</i> | <i>62</i> |
| <i>Tabela 5.2 - Número de identificação dos CPs para avaliação da distorção.....</i> | <i>67</i> |
| <i>Tabela 5.3 - Codificação dos corpos de prova da Tabela 5.2.....</i> | <i>68</i> |
| <i>Tabela 5.4 - Valores de deformação na linha longitudinal central dos CPs de alumínio com espessura de 1,0 mm.....</i> | <i>70</i> |
| <i>Tabela 5.5 - Valores de deformação na linha longitudinal central dos CPs de alumínio com espessura de 0,5 mm.....</i> | <i>71</i> |
| <i>Tabela 5.6 - Valores de deformação na linha longitudinal central dos CPs de aço carbono com espessura de 1,0 mm.....</i> | <i>72</i> |
| <i>Tabela 5.7 - Valores de deformação na linha longitudinal central dos CPs de aço carbono</i> | |

| | |
|---|------------|
| <i>com espessura de 0,5 mm.....</i> | <i>73</i> |
| <i>Tabela 5.8 - Valores de deformação na linha longitudinal central dos CPs de aço galvanizado com espessura de 1,0 mm.....</i> | <i>74</i> |
| <i>Tabela 5.9 - Valores de deformação na linha longitudinal central dos CPs de aço galvanizado com espessura de 0,5 mm.....</i> | <i>75</i> |
| <i>Tabela 5.10 - Valores máximo de deformação encontrados</i> | <i>76</i> |
| <i>Tabelas 6.1 - Valores de limite de resistência à tração (LRT) e de alongamento (A)</i> | <i>85</i> |
| <i>Tabela 10.1 - Material: Aço Galvanizado de 0,5 mm de espessura.....</i> | <i>112</i> |
| <i>Tabela 10.2 - Material: Aço Galvanizado de 1,0 mm de espessura.....</i> | <i>112</i> |
| <i>Tabela 10.3 - Material: Aço Carbono de 0,5 mm de espessura.....</i> | <i>110</i> |
| <i>Tabela 10.4 - Material: Aço Carbono de 1,0 mm de espessura.....</i> | <i>112</i> |
| <i>Tabela 10.5 - Material: Alumínio de 0,5 mm de espessura</i> | <i>112</i> |
| <i>Tabela 10.6 - Material: Alumínio de 0,5 mm de espessura</i> | <i>112</i> |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|-----------------|---|
| A | <i>Amper</i> |
| Ar | <i>Argônio</i> |
| AWS | <i>American Welding Society</i> |
| ASW | <i>Arc Stud Welding</i> |
| AWS | <i>American Welding Society</i> |
| CDSW | <i>Capacitor Discharge Stud Welding</i> |
| CMT | <i>Cold Metal Transfer</i> |
| CMT PIN | <i>Cold Metal Transfer PIN</i> |
| CNC | <i>Controle Numérico Computadorizado</i> |
| CO ₂ | <i>Dioxido de Carbono</i> |
| CPs | <i>Corpos de Prova</i> |
| DBCP | <i>Distância de Contato Bico Peça</i> |
| ER | <i>Eletrodo Revestido</i> |
| GMAW | <i>Gas Metal Arc Welding</i> |
| HV | <i>Dureza Vickers</i> |
| IIW - | <i>International Institute of Welding</i> |
| MIG/MAG | <i>Metal Inert Gas / Metal Active Gas</i> |
| Mn | <i>Manganês</i> |
| P | <i>Fósforo</i> |
| S | <i>Enxofre</i> |
| RCU | <i>Remote Control Unit</i> |
| SW | <i>Stud Welding</i> |
| TIG | <i>Tungsten Inert Gas</i> |
| V | <i>Volts</i> |
| ZTA | <i>Zona Termicamente Afetada</i> |
| W | <i>Watts</i> |
| °C | <i>Graus Celsius</i> |
| % | <i>Porcentagem</i> |
| %C | <i>Porcentagem de Carbono</i> |
| µm | <i>micrometro</i> |
| µH | <i>microHenry</i> |

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| <i>CAPÍTULO I</i> | 1 |
| INTRODUÇÃO | 1 |
| <i>CAPÍTULO II</i> | 3 |
| REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 3 |
| 2.1 Evolução dos processos de soldagem a arco..... | 3 |
| 2.2 Modos de transferência metálica..... | 4 |
| 2.3 Transferência metálica por curto-circuito..... | 6 |
| 2.4 Particularidades da soldagem do alumínio..... | 7 |
| 2.5 Particularidades da soldagem do aço comuns ao carbono..... | 8 |
| 2.6 Processos para deposição de pinos..... | 9 |
| 2.7 O processo CMT..... | 9 |
| 2.8 Equipamento CMT | 12 |
| 2.9 O processo CMT PIN..... | 13 |
| 2.10 O Processo Stud Welding (SW)..... | 17 |
| 2.10 1 Processo Arc Stud Welding (ASW)..... | 17 |
| 2.10 2 Processo Capacitor Discharge (CDSW)..... | 17 |
| <i>CAPÍTULO III</i> | 20 |
| MATERIAIS E EQUIPAMENTOS | 20 |
| 3.1 Materiais utilizados..... | 20 |
| 3.1.1 Eletrodos consumíveis..... | 20 |
| 3.1.2 Gás de proteção..... | 21 |
| 3.1.3 Metal de base..... | 21 |
| 3.2. Equipamentos utilizados..... | 22 |
| 3.2.1 Equipamento de soldagem..... | 22 |
| 3.2.2 Misturador de gás..... | 23 |
| 3.2.3 Analisador de gás..... | 24 |
| 3.2.4 Lixadeira manual / Politriz..... | 24 |
| 3.2.5 Máquina de medir por coordenadas..... | 25 |
| 3.2.6 Projetor de perfil..... | 25 |
| 3.2.7 Micrômetro..... | 26 |

| | |
|---|----|
| 3.2.8 Máquina de ensaio de tração..... | 26 |
| 3.2.9 Microscópio ótico..... | 27 |
| 3.2.10 Câmara de filmagem..... | 27 |
| 3.2.11 Sistema de aquisição de dados..... | 28 |
| CAPÍTULO IV..... | 29 |
| Estudo da deposição dos pinos..... | 29 |
| 4.1. Metodologia..... | 29 |
| Fase I - Definição das variações..... | 29 |
| Fase II - Preparação dos corpos de prova..... | 30 |
| Fase III - Deposição dos pinos..... | 32 |
| Fase IV - Definição dos parâmetros do processo de soldagem..... | 33 |
| Fase V - Filmagem da deposição dos pinos..... | 35 |
| 4.2. Resultados..... | 36 |
| 4.3. Comentários gerais..... | 60 |
| CAPÍTULO V..... | 62 |
| Efeito da deposição dos pinos na distorção das chapas..... | 62 |
| 5.1. Metodologia..... | 62 |
| Fase I - Definição das variações..... | 62 |
| Fase II - Preparação dos corpos de prova..... | 63 |
| Fase III - Medição da distorção dos CPs antes da deposição dos pinos..... | 64 |
| Fase IV – Deposição dos pinos..... | 64 |
| Fase V - Medição da distorção dos CPs após a deposição dos pinos..... | 66 |
| 5.2. Resultados..... | 67 |
| 5.3. Comentários gerais..... | 78 |
| CAPÍTULO VI..... | 79 |
| Efeito da deposição dos pinos nas propriedades mecânicas das chapas..... | 79 |
| 6.1. Metodologia..... | 79 |
| Fase I - Definição das variáveis do processo de soldagem..... | 79 |
| Fase II - Preparação dos corpos de prova..... | 79 |
| Fase III – Deposição dos pinos..... | 79 |
| Fase IV – Embutimento..... | 80 |
| Fase V – Teste de tração e macrografia..... | 80 |
| 6.2. Resultados..... | 81 |
| 6.3. Comentários gerais..... | 96 |
| CAPÍTULO VII..... | 97 |
| CONCLUSÕES..... | 97 |

| | |
|---|-----|
| <i>CAPÍTULO VIII</i> | 100 |
| TRABALHOS FUTUROS..... | 100 |
| <i>CAPÍTULO IX</i> | 101 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 101 |
| <i>CAPÍTULO X</i> | 107 |
| APÊNDICE | 107 |
| MEDIDAS DE ESPESSURA E DE LARGURA DA SEÇÃO REDUZIDA DOS CPs | 107 |

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

A crescente competitividade nas indústrias tem sido responsável para que as mesmas procurem por alternativas tecnológicas que lhes propiciem obter a margem de lucro planejada, com uma maior qualidade, segurança e sem afetar o meio ambiente. Isso tem feito com que os fabricantes procurem melhorar seu parque fabril, através de novos equipamentos, técnicas ou novas metodologias de trabalho e processo, onde se destaca as melhorias no processo de montagem, com influência direta na redução do tempo de processo e conseqüentemente no custo.

Dessa maneira, a busca por melhorias de processos e técnicas de soldagem mecanizados/automatizados tem sido pauta no meio industrial já algum tempo, mas de forma ainda mais recorrente e intensa com a escassez de mão de obra qualificada (MELLO 2015; SMITH, 2015). Ou seja, a procura pela melhoria contínua é constante, buscando novas técnicas e processos que atendam alcançar os objetivos, fazendo com que se desenvolvam novas tecnologias como alternativas.

Nesta linha, pode-se citar o processo CMT (Cold Metal Transfer), desenvolvido pela empresa Fronius, que é derivado do processo MIG/MAG (GMAW) com transferência metálica com curto-circuito controlado, onde a principal inovação é o controle da movimentação do arame durante a transferência metálica, permitindo uma solda com menor nível de respingo e menor nível de calor imposto, o que possibilita a aplicação em chapas finas e em materiais dissimilares e tendo como característica principal a transferência de metal “à frio”.

Dentre as variantes do CMT, destaca-se o chamado CMT PIN, capaz de depositar pinos metálicos em chapas metálicas pelo controle combinado do ciclo de corrente e de avanço/reversão do arame de soldagem. Por se tratar de um processo ainda recente, possui um campo vasto para o desenvolvimento de inovações com uma grande gama de aplicações e seu entendimento ainda não está claro na literatura. Como exemplo principal de aplicação aparece o uso do processo CMT PIN para fabricação de pinos para a função

de travamento mecânico, geralmente na união de peças metálicas com não metálicas Somoskoi e Torok (2013). Entre outras aplicações, acredita-se que os pinos possam entre outras aplicações, ser aplicado também como trocadores de calor, servindo como aletas depositadas em peças que sofrem com aquecimento ou resfriamento excessivos.

Assim, este trabalho tem como objetivo geral entender e verificar a aplicação do processo CMT PIN em chapas de aço carbono, aço galvanizado e alumínio e avaliar o potencial em chapas finas. De forma mais específica objetiva-se avaliar os efeitos dos parâmetros do processo sobre:

- A formação dos pinos em chapas finas de aço carbono, de aço galvanizado e de alumínio;
- A distorção das chapas dos diferentes materiais causada pela deposição dos pinos;
- A resistência mecânica das chapas dos diferentes materiais com a presença dos pinos.

A Figura 1.1 resume a sequência geral do trabalho realizado.

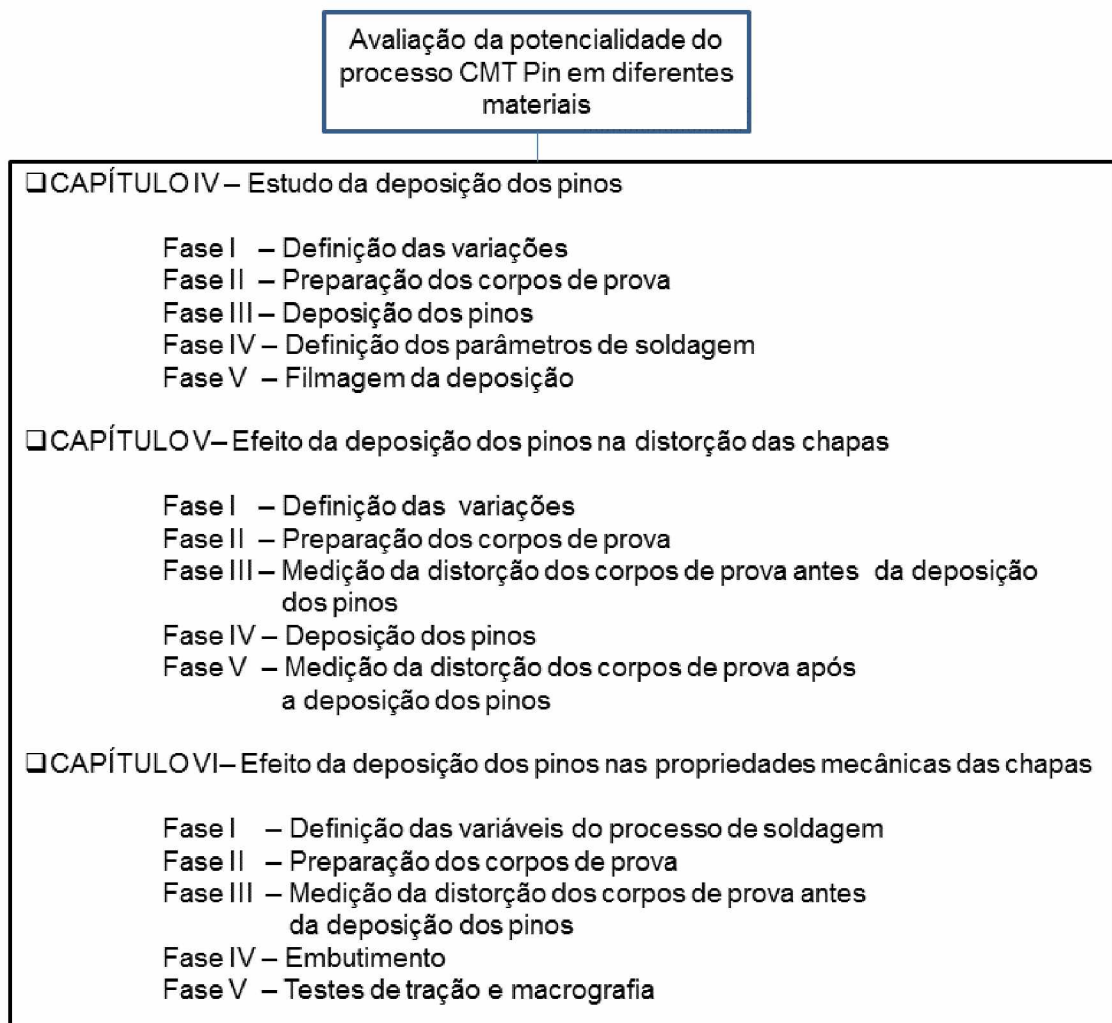


Figura 1.1 - Sequência geral de execução do trabalho

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Evolução dos processos de soldagem a arco

Soldagem é o “processo de união de materiais utilizado para obter a coalescência (união) localizada de metais e não-metais, produzida por aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem a utilização de pressão e/ou material de adição (AWS 2010).

A soldagem pode ser considerada como um processo antigo, pois a 3000 anos o homem com o intuito de soldar inventou o processo de forjar a quente, concentrando o calor na zona da peça a ser ligada, seguido do processo de martelar (ZIEDAS e TATINI, 1997).

Porém, só mais recentemente os processos de soldagem a arco elétrico surgiram a partir da descoberta de novas tecnologias originadas das experiências de Sir Humphrey Davy (1801-1806) com o arco elétrico (SILVA, 2015).

N. Benardos e S. Olszewsk, registraram em 1885, a patente do processo de soldagem por fusão por meio do calor gerado pelo arco entre o eletrodo de carvão e a peça. Mais tarde substituiu-se o eletrodo de carvão pela vareta metálica e o aquecimento passou a ser acompanhado da deposição de metal fundido proveniente desta vareta.(BERNARDOS; OLSZEWSK, 1887).

Nos anos 20, com o intuito de proteger-se o arco elétrico da contaminação atmosférica, originou-se a pesquisa através de experiências com processos de soldagem onde o arco elétrico e a poça de fusão encontravam-se envoltos por uma proteção gasosa inerte, protegendo-se dessa maneira o arco elétrico da contaminação atmosférica, constatando-se melhores propriedades do cordão de solda (WAINER, 1978).

Em 1942, patenteado por Russell Meredith, surgiu então o processo chamado Tungsten Inert Gas (TIG), que utilizava um eletrodo não consumível de tungstênio e um gás inerte para proteção.(SACKS e BOHNART, 2004).

Conforme Silva (2015), na década de 50, para suprir uma necessidade no aumento de produtividade do processo de soldagem TIG, surgiu a possibilidade da alimentação

automática do material de adição. Várias tentativas de melhorias foram realizadas até que se chegou ao eletrodo consumível ao invés do eletrodo não consumível de tungstênio utilizado, obtendo-se dessa maneira o processo de soldagem Metal Inert Gas / Metal Active Gas (MIG/MAG), agora com possibilidade de usar gases inertes e ativos.

O MIG/MAG é um dos processos de união de metais mais utilizados nos países industrializados (BOHME *et al.*, 1996), podendo ser semi-automático, onde a tocha é manuseada por um operador, ou automatizado, quando manuseada por um robô, por exemplo. O princípio de funcionamento do processo baseia-se na tocha onde o eletrodo consumível é alimentado continuamente estabelecendo o arco entre o próprio eletrodo e a peça. O gás de proteção que flui pela tocha tem a função de formar e proteger o arco elétrico e de proteger a poça fundida do meio externo. Com o passar dos anos inúmeras variantes do MIG/MAG surgiram, como mudanças nos níveis de corrente utilizados, controle mais refinado da corrente elétrica aplicada ao processo, inversão de polaridade e outros recursos, originando vários tipos de transferência metálica (SILVA, 2015).

2.2 Modos de transferência metálica

Para se obter um melhor controle do processo de soldagem é imprescindível que se conheça a maneira como ocorre a transferência metálica e seus fenômenos envolvidos. Ao se estudar a transferência metálica, analisa-se a maneira como ocorre a transferência da gota metálica formada na extremidade do arame eletrodo até a poça de fusão. A forma como a transferência ocorre depende de fatores operacionais da soldagem a arco que afetam consideravelmente a sua estabilidade e funcionamento.

Segundo Abreu (2003); Machado (1996); Modenesi e Nixon (1994), o modo pelo qual a gota metálica irá se transferir, em determinada condição de soldagem, dependerá, entre outros, da combinação dos seguintes fatores:

- Tipo de corrente (CC, CA ou pulsada);
- Tipo de gás de proteção e nível de vazão;
- Diâmetro e composição química do eletrodo;
- Tensão de soldagem;
- Comprimento energizado do arame-eletrodo.

Conforme Wang, Liu e Jones (1995) define-se diferentes modos de transferência metálica em MIG/MAG: curto-circuito, globular e spray. Essa diferenciação se dá de acordo com o tamanho e característica da transferência da gota fundida. Estes modos de transferência metálica apresentam diferenças na estabilidade de arco, poça de fusão,

penetração, produção de respingos, porosidade e nível de gás aprisionado (KIM *et al.*, 1993).

Vilarinho (2000) cita que o estudo da transferência metálica necessita de uma técnica de filmagem em alta velocidade onde a técnica de perfilografia é uma das mais adequadas. Por este método, considera-se como transferência no modo spray quando o diâmetro da gota for menor do que o diâmetro do arame eletrodo, na transferência globular o diâmetro da gota é maior do que o diâmetro do arame e na transferência por curto-circuito a gota entra em contato com a poça de fusão antes de se desprender do eletrodo.

A transferência metálica é o resultado da ação simultânea e da interação de um conjunto de forças de natureza diferentes, tais como eletromagnéticas, gravitacional e tensão superficial, sobre a extremidade do eletrodo fundido, poça de fusão e arco elétrico, onde a resultante é determinante para o destacamento da gota (GOHR, 2002). A amplitude destas forças sofre a influência direta da tensão e corrente, do ambiente do arco com atmosfera inerte ou ativa e da composição química do eletrodo/peça (SABIO, 2007).

Na Tabela 2.1 apresenta a classificação dos tipos de transferência metálica adotada pelo IIV juntamente com algumas inserções (VILARINHO, 2000; STENBACKA e PERSSON, 1989; MACHADO, 1996) em geral ilustrada através da Figura 2.1.

Tabela 2.1 - Classificação de transferência metálica pelo IIV segundo SÁBIO (2007, p.35, apud IIV Doc. n° X11-1888-06, 2006 p.10)

| <i>Tipo de Transferência</i> | <i>Processos de Soldagem</i> |
|---|---------------------------------------|
| <i>I Transferência por vôo livre</i> | |
| 1. Globular | MIG/MAG em baixas correntes |
| 1.1 Globular repelida | MIG/MAG protegido por CO ₂ |
| 2. Goticular ("Spray") | |
| 2.1 Goticular axial | MIG/MAG com corrente intermediária |
| 2.2 Goticular com alongamento | MIG/MAG com corrente média |
| 2.3 Goticular rotacional | MIG/MAG com corrente alta |
| 3. Gotas explosivas | Eletrodos revestidos e arame tubular |
| <i>II Transferência por contato</i> | |
| 2.1 Curto-circuito | MIG/MAG com baixas correntes e |
| 2.2 Contato sem interrupção | TIG com alimentação |
| <i>III Transferência guiada por escória</i> | |
| 3.1 Fluxo guiado por parede | Arco Submerso |
| 3.2 Outros modos | Eletrodo revestido, arame tubular |

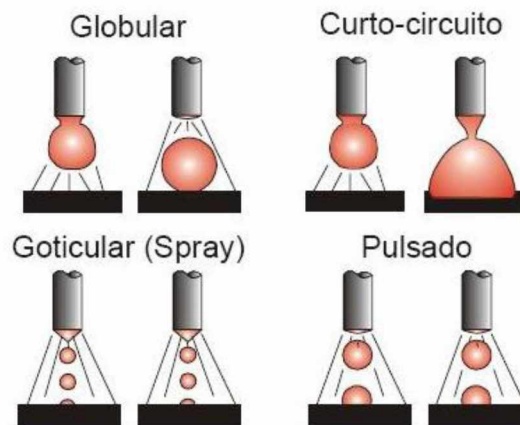


Figura 2.1 - Representação esquemática dos principais modos de transferência metálica (BARRA, 2003)

2.3 Transferência metálica por curto-circuito

A transferência por curto-circuito ocorre quando uma gota metálica, formada na ponta do arame eletrodo, aumenta de tamanho até atingir a poça de fusão, ocasionando o curto-circuito e a eliminação do arco. Ocorre normalmente para baixos valores de tensão e corrente. Um valor baixo de corrente gera uma força eletromagnética de pequena intensidade, permitindo que a gota tenha grandes diâmetros com arcos pequenos e permitindo que a gota toque na poça antes de se destacar do arame eletrodo.

Na Figura 2.2 pode-se observar os sinais de corrente e tensão típicos de uma condição de soldagem MIG/MAG em curto-circuito, onde percebe-se uma queda acentuada na tensão, o que significa que a gota formada na ponta do eletrodo toca a poça de soldagem e uma rápida elevação da corrente para cair logo em seguida, onde a queda da corrente é devido ao desprendimento da gota da ponta do arame. Até o fim de curto-circuito existe um equilíbrio entre a taxa de fusão e a velocidade de alimentação do arame, e após o fim do curto-circuito a taxa de fusão torna-se maior que a taxa de alimentação, este fato deve-se a elevada corrente pós curto-circuito, fazendo com que logo após o rompimento da gota, o comprimento do arco cresça rapidamente enquanto uma nova gota se forma (SCOTTI e PONOMAREV, 2008).

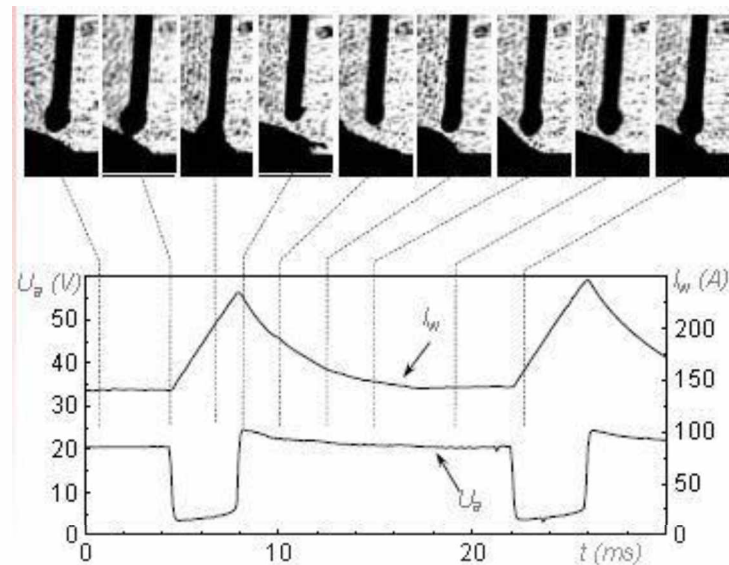


Figura 2.2 - Comportamento tensão e corrente de soldagem na transferência por curto-circuito e sequencia correspondente de imagens do processo (SCOTTI e PONOMAREV 2008)

A transferência em curto-circuito ocorre quando a gota metálica atinge a poça de fusão após atingir determinado tamanho e a força de tensão superficial rompe a união entre a gota e a ponta do arame absorvendo-a, iniciando novamente o arco elétrico

2.4 Particularidades da soldagem do alumínio

Segundo Modenesi (2011), o alumínio é um metal de baixa densidade, baixa resistência mecânica, boa resistência à corrosão e elevadas condutividades térmica e elétrica. O alumínio reage prontamente com o oxigênio do ar formando uma camada superficial de óxido cujo ponto de fusão ($\approx 2000^{\circ}\text{C}$) é muito superior ao do alumínio e que, durante a soldagem, pode formar uma barreira física impedindo o contato e mistura do metal de base fundido e do metal de adição e formando inclusões na solda. Adicionalmente, à medida que se torna mais expressa, a camada de óxido absorve umidade do ar. Na soldagem, esta umidade, juntamente com outras contaminações superficiais, é uma fonte de hidrogênio capaz de gerar porosidade na zona fundida de alumínio.

Conforme Modenesi (2011) devido ao seu baixo ponto de fusão, este material não apresenta uma mudança de cor quando se aproxima de sua temperatura de fusão. Isto pode dificultar o controle da temperatura na soldagem a arco de chapas finas e exige um cuidado maior do soldador para se evitar que ocorra um excesso de fusão e, assim, a perfuração da junta.

De acordo com Modenesi (2011) a resistência mecânica de diversas ligas de alumínio

é baseada no seu encruamento ou em endurecimento por precipitação quando possível. Estes dois mecanismos são sensíveis a uma elevação da temperatura e, portanto, na soldagem, a zona termicamente afetada destas ligas pode ser amaciada. A Figura 2.3 por exemplo, mostra a variação da dureza da ZTA nas condições como soldado e tratado termicamente após soldagem de uma liga de alumínio endurecível por precipitação submetida, antes da soldagem, a duas condições diferentes de envelhecimento.

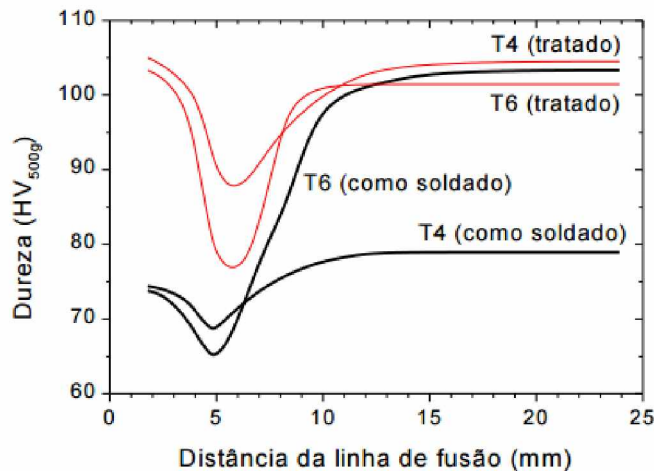


Figura 2.3 - Variação dureza na ZTA de ligas de alumínio 6061-T4 e T6 nas condições como soldada e após tratamento térmico de envelhecimento após a soldagem. (MODENESI, 2011)

2.5 Particularidades da soldagem do aço comuns ao carbono

Para Modenesi, (2011) aços carbono são ligas de ferro e carbono (até 2% C) contendo ainda, como residuais (de materiais primas ou do processo de fabricação), outros elementos como Mn, Si, S e P. Aços de baixo carbono têm um teor de carbono inferior a 0,15%. Aços doces (“mild steels”) contêm de 0,15 a 0,3% C. Em geral os problemas relacionados à soldagem destes aços incluem a perda de tenacidade na ZTA, ou na zona fundida (associada com a formação de estruturas de granulação grosseira, durante a soldagem com elevado aporte térmico) e a formação de trincas de solidificação (em peças contaminadas ou na soldagem com aporte térmico elevado). Ainda, em função de uma seleção inadequada de consumíveis ou de um projeto ou execução incorretos, podem ocorrer problemas de porosidade, mordeduras, falta de fusão, corrosão, etc.

2.6 Processos para deposição de pinos

Serão abordados dois diferentes tipos de processos de deposição de pinos: o Cold Metal Transfer (CMT) ou transferência de metal a frio o qual será o foco do estudo e o Stud Welding (SW) ou soldagem de pinos.

2.7 O processo CMT

Em 2005, através da empresa austríaca Fronius, o processo Cold Metal Transfer (CMT) foi desenvolvido por Manfred Schorghuber (Silva, 2015). O CMT é uma derivação do processo MIG/MAG (GMAW) e opera com transferência metálica com curto-circuito controlado, onde a principal inovação é o controle da movimentação do arame durante a transferência metálica, permitindo uma solda com menor nível de respingos e com menor nível de calor imposto, possibilitando a soldagem de chapas finas e que segundo Zhang *et al.* (2009) o processo é adequado para materiais dissimilares como ligas de alumínio e aço galvanizado, resultando em juntas com boa resistência à tração ocasionado pelas juntas soldadas com camadas de intermetálicos com espessura inferior a 5 μm .

No CMT um arame é alimentado continuamente e um arco elétrico (protegido por um gás inerte ou ativo) é aberto entre a ponta do arame e o material a ser soldado, semelhantemente ao processo MIG/MAG. A diferença principal entre o MIG/MAG convencional e o CMT está numa tocha especial, que permite a reversão do avanço do arame-eletrodo durante a transferência metálica. Percebe-se na Figura 2.4 (à direita de cima para baixo) a ilustração das 4 fases do processo CMT: arco aceso; arame tocando a poça, já com corrente reduzida; arame com direção revertida e ainda com corrente reduzida; novo acendimento do arco. Como ilustra a Figura 2.5, a reversão do arame se dá sempre que o arame toca a poça de fusão, permitindo uma transferência suave da gota para a poça (neste instante, a corrente é também reduzida drasticamente, não havendo os picos de correntes de curtos-circuitos) e sem respingos (perda de material). A retração do arame facilita o destacamento da gota durante o curto-circuito, possibilitando que a mesma seja transferida para a poça de fusão sem que haja necessidade de forças eletromagnéticas elevadas, podendo assim reduzir a corrente, a quantidade de respingos e o aporte térmico. Como o arco consegue ficar sempre curto, a energia calorífica transferida para a peça é muito baixa, justificando o nome Cold Metal Transfer e causando poucas alterações metalúrgicas no metal de base.

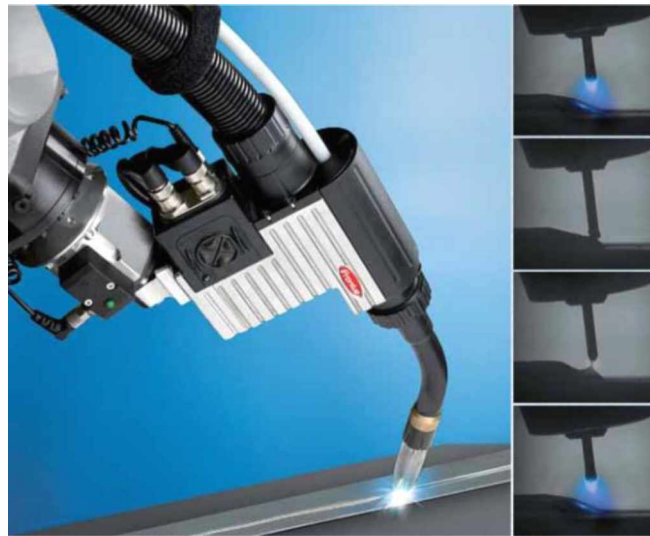


Figura 2.4 - Tocha especial do processo CMT (à esquerda) e sequência de imagens do ciclo de curto-circuito (à direita) (FRONIUS, 2007)

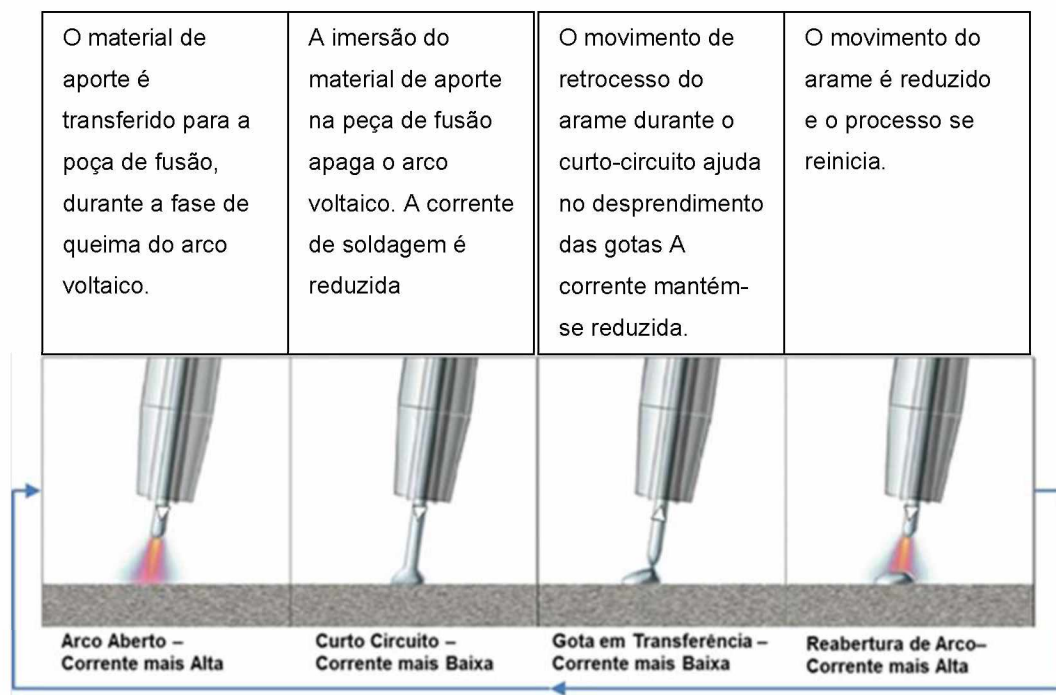


Figura 2.5 - Movimento de avanço e recuo do arame no processo CMT (FRONIUS, 2007)

A partir do desenvolvimento do CMT, surgiram derivações do processo pela combinação do modo de transferência metálica e/ou mudança na polaridade do arame-eletrodo, abrindo mais possibilidades para aplicações. Cong *et al.* (2015), por exemplo, mostram como as versões CMT *Pulse*, CMT *Advanced* e CMT *Pulse Advanced*, com destaque para esta última, podem diminuir o nível de porosidade de depósitos de liga de Al em relação ao obtido com a técnica CMT “original”. A Figura 2.6 mostra os sinais de corrente e tensão de soldagem típicos do CMT e de suas variantes.

A técnica CMT *Pulse* intercala uma sequência de pulsos de corrente (transferência de uma gota por pulso - por voo livre) com curto-circuito controlado (transferência de uma gota por tensão superficial) sempre com o arame-eletrodo na polaridade positiva; é possível modular o calor aportado e a quantidade de material depositado variando o número de pulsos e as variáveis de pulsação. A técnica CMT *Advanced* consiste em sequências de curtos-circuitos controlados com alternância periódica de corrente: hora os curtos-circuitos ocorrem com o arame-eletrodo operando na polaridade positiva da fonte (como no CMT “original”) hora os curtos-circuitos se dão com o arame-eletrodo operando na polaridade negativa, esta última ajudando a reduzir ainda mais o calor aportado. Já a técnica CMT *Pulse Advanced* intercala uma sequência de pulsos de corrente com o arame-eletrodo na polaridade positiva (como no CMT *Pulse*) com uma sequência de curtos-circuitos com o arame-eletrodo na polaridade negativa (como no CMT *Advanced*), assim com outra possibilidade de atuar na modulação do calor aportado e da quantidade de material depositado pelo processo de soldagem. (CONG *et al.*, 2015)

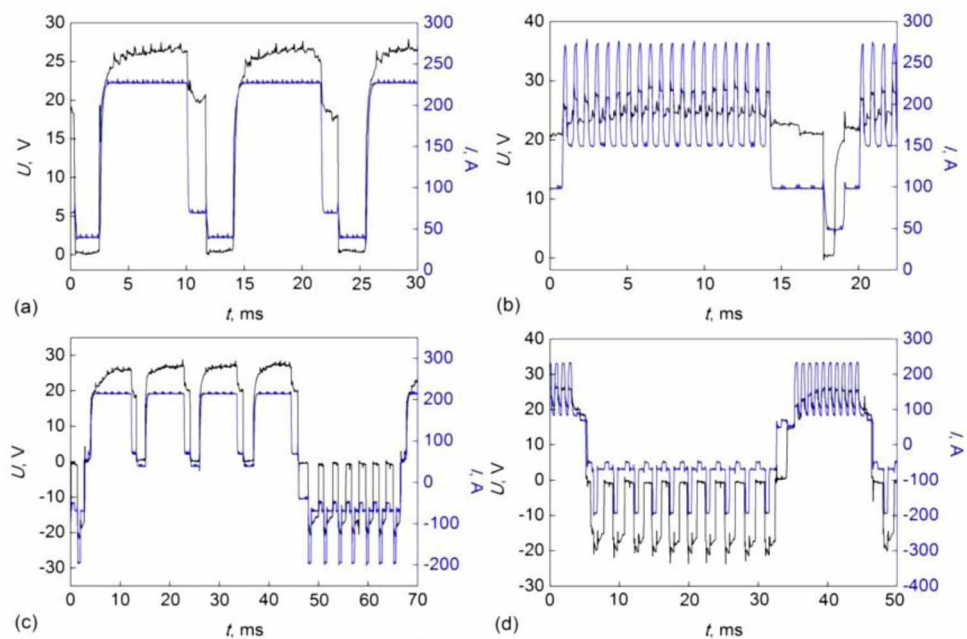


Figura 2.6 - Sinais de corrente e tensão típicos da soldagem CMT (a), CMT *Pulse* (b), CMT *Advanced* (c) and CMT *Pulse Advanced* (d) (CONG *et al.*, 2015)

O processo CMT tem se mostrado cada vez mais versátil com vastas possibilidades de aplicação, como por exemplo na união de chapas finas (FENG; ZHANG; HE, 2009), passando por revestimentos (PICKIN; WILLIAMS; LUNT, 2011 ; EGERLAND, 2009), passes de raiz (MARQUES, 2013; FOKENS, 2009; KIM, 2010) e união de materiais dissimilares, como por exemplo de alumínio com aço (BRUCKNER, 2005; ZHANG; FENG; HE, 2008; ZHANG *et al.*, 2009) e aplicação em manufatura aditiva (CONG *et al.*, 2015).

2.8 Equipamento CMT

A Figura 2.7 ilustra o equipamento típico para soldagem CMT, com destaque para o buffer (espécie de pulmão), que permite a “flambagem” do arame durante as reversões. O equipamento pode *operar de maneira automática ou semi-automática, sendo composto pelas seguintes partes:*

1. Fonte de soldagem Fronius CMT;

Consiste de uma fonte de solda inversora totalmente digitalizada com comando micro processado e digitalmente regulável, com a corrente na faixa de 320/400/500 A.

2. Controle remoto;

Unidade de controle remoto com *display*, monitoramento de dados de soldagem com função, interface de usuário, estrutura de menu sistemático, gerenciamento de acesso;

3. Aparelho de refrigeração;

Propicia a refrigeração da tocha de soldagem com água;

4. Interface para robô;

Pode ser por comando digital, analógico ou através de barramento de campo (Fieldbus);

5. Alimentador de arame;

Alimentador de arame regulado digitalmente;

6. Tocha CMT

Tocha de soldagem robotizada, compacta, com servo motor CA com regulagem digital altamente dinâmica e isenta de engrenagem, para alimentação de arame precisa com pressão constante de roletes;

7. *Buffer* ou pulmão do arame

Instalado entre os dois tracionadores de arame, desacopla um tracionador do outro, criando assim uma folga para o arame, devendo ser montado preferencialmente com balancim ou em um dos braços do robô;

8. Suporte para armazenamento do arame.

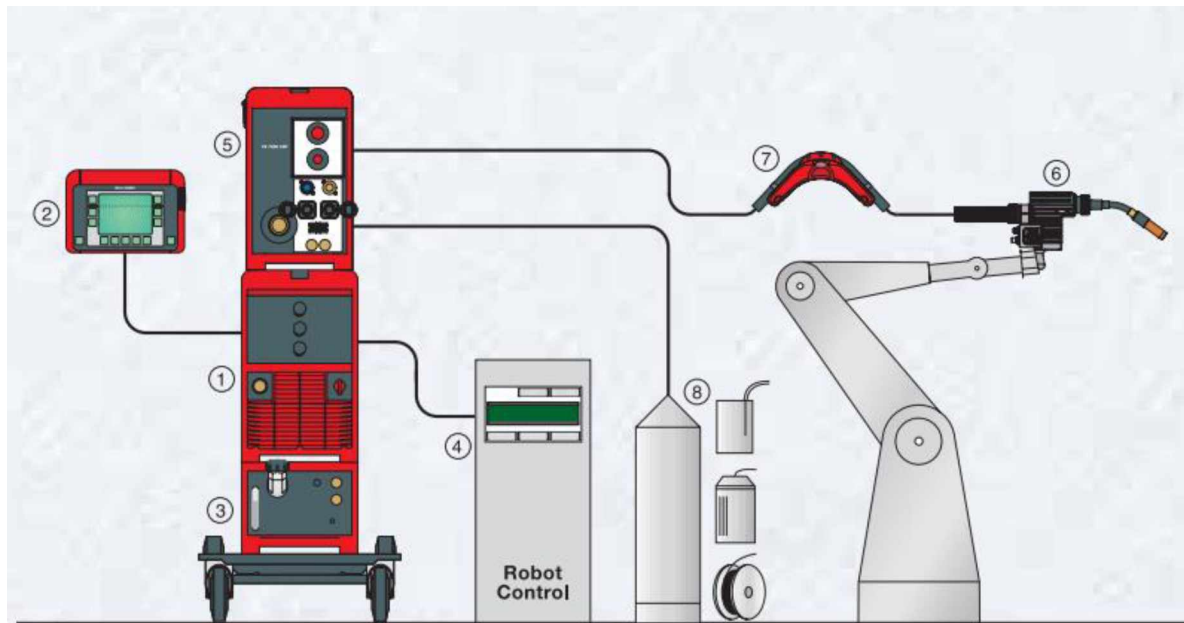


Figura 2.7 - Ilustração do equipamento para soldagem CMT (FRONIUS, 2007)

2.9 O processo CMT PIN

A diferença do CMT convencional para o CMT PIN reside no fato que este último baseia-se em um programa de controle que, antes de haver a reversão, faz com que o arame fique um tempo mais longo encostado na poça, mas com o arco apagado, permitindo um esfriamento/solidificação e uma conseqüente soldagem da ponta do arame no metal de base. Logo em seguida, uma corrente baixa é imposta, de tal forma a aquecer e amolecer o arame soldado, mas não o suficiente por si só para romper o arame e abrir o arco. Com o arame quente e amolecido, o movimento de reversão é iniciado e o arame fica sujeito a uma força trativa, sendo rompido, como num ensaio de tração, formando pinos sobre a chapa, com ilustrado pela Figura 2.8. Modificações de alguns parâmetros permitem formar pinos de diferentes tamanhos e geometrias, como ilustrados pela Figura 2.9 O processo CMT tem ainda a variante chamada CMT Print, que deposita pequenas gotas sobre o metal de base (Figura 2.11), como que fazendo uma impressão (FRONIUS, 2004).



Figura 2.8 - Formação sequencial do pino com cabeça no formato de abaulada no processo CMT Pin (FRONIUS, 2007)

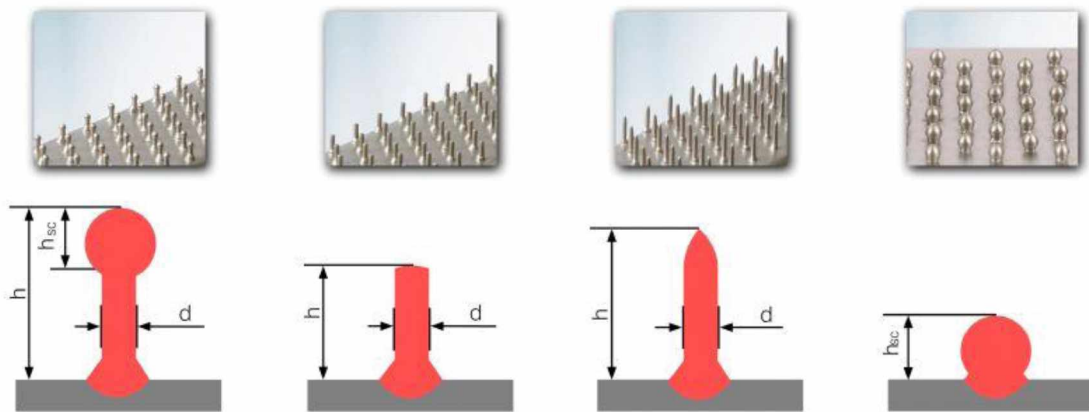


Figura 2.9 - Diferentes geometrias de pinos possíveis com o processo CMT PIN (da esquerda para a direita: pino com cabeça abaulada, cabeça cilíndrica e cabeça apontada) e CMT Print (imagem mais à direita) (FRONIUS, 2007)

Em termos de operação do equipamento CMT PIN, a seleção de parâmetros realizou-se por meio de um controle remoto. No caso no controle remoto RCU 5000i, seleciona-se o programa sinérgico DB0875 (CMT PIN), no qual a seleção do material do arame é feita por sub programas, como por exemplo o sub programa G3Si1 para pinos de aço carbono e o sub programa AISi5 para pinos de alumínio. A mudança da geometria da cabeça do pino também é feita pelo controle remoto. Para mudar de cabeça cilíndrica para cabeça abaulada, por exemplo, a seleção é efetuada através do parâmetro “Ball/Cyl. Adaptation”, onde a regulação permitida deste parâmetro vai de -5,0 até +5,0, sendo que valor -5,0 corresponde a cabeça cilíndrica e a medida que o valor aumenta, se aproximando de + 5,0, a geometria vai se aproximando da abaulada. Outro parâmetro possível de regulação é a altura do pino através do parâmetro “Altitude Adaptation” que permite a regulação de -30 até +30, que corresponde a altura do pino “h” na Figura 2.8.

Skhabovskiy *et al.* (2015) mostram o efeito básico dos parâmetros do CMT PIN para pinos de aço carbono (Figura 2.10). Neste trabalho também é explorada a possibilidade de utilizar o processo CMT Pin para fabricação de trocadores de calor. Em relatório interno, Gartner (2015) mostra o formato das ondas de corrente e tensão durante a deposição de pinos por CMT PIN com referências às etapas de formação dos pinos (Figura 2.11).

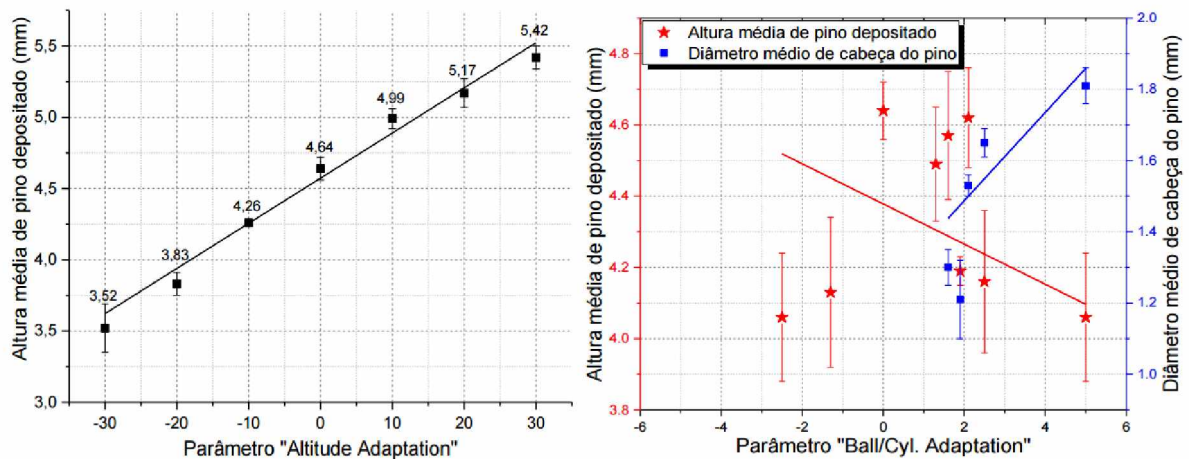


Figura 2.10 - Características geométricas de pinos de aço carbono depositados pelo processo CMT PIN, onde: esquerda - relação entre a altura média do pino e a regulagem do “Altitude Adaptation”, com “Ball/Cyl. Adaptation” fixado em 0; direita – relação entre a altura média e o diâmetro médio de cabeça do pino e a regulagem do “Ball/Cyl Adaptation”, com “Altitude Adaptation” fixado em 0 (SKHABOVSKIY *et al.*, 2015)

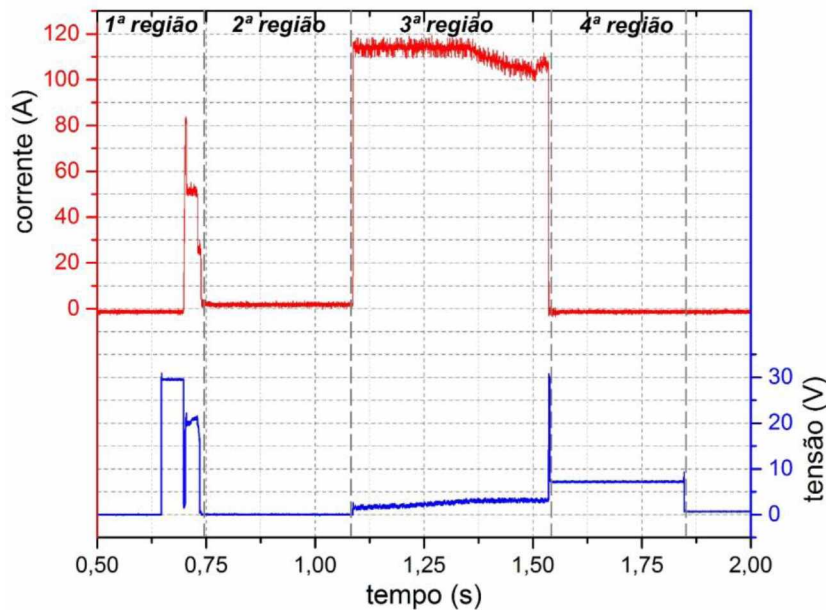


Figura 2.11 - Ondas de corrente e tensão durante a deposição de pinos por CMT PIN com referências às etapas de formação de pinos, onde: 1ª região = soldagem do pino na chapa; 2ª região = tempo de resfriamento/solidificação; 3ª região = tempo de aquecimento; 4ª região = fase de ruptura do pino (GARTNER, 2015)

Sobre a influência da deposição de pinos por CMT PIN nas propriedades mecânicas de chapas, o único estudo encontrado, limitado a alumínio de 2 mm de espessura, foi feito por Wittwer *et al.* (2012). Como mostrado na Figura 2.12 a configuração dos pinos e na Figura 2.13, que a presença dos pinos não alterou a resistência mecânica das chapas,

independentemente da configuração de deposição dos pinos. Já a ductilidade (deformação) das chapas diminuiu pela presença dos pinos, apesar de não ser influenciada pela configuração de deposição. Entretanto, fatores como mudança da altura dos pinos e mesmo da espessura das chapas utilizadas não foram avaliados pelos autores. Outro fator que poderia ser avaliado seria o comportamento em outros materiais de pinos e de chapas.

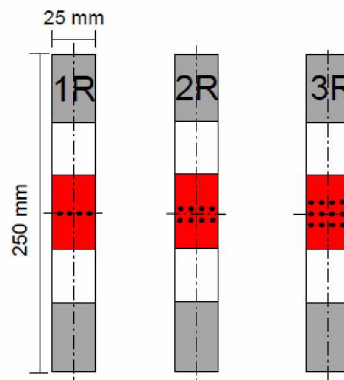


Figura 2.12 - Configuração de deposição dos pinos (WITTWER *et al.*, 2012)

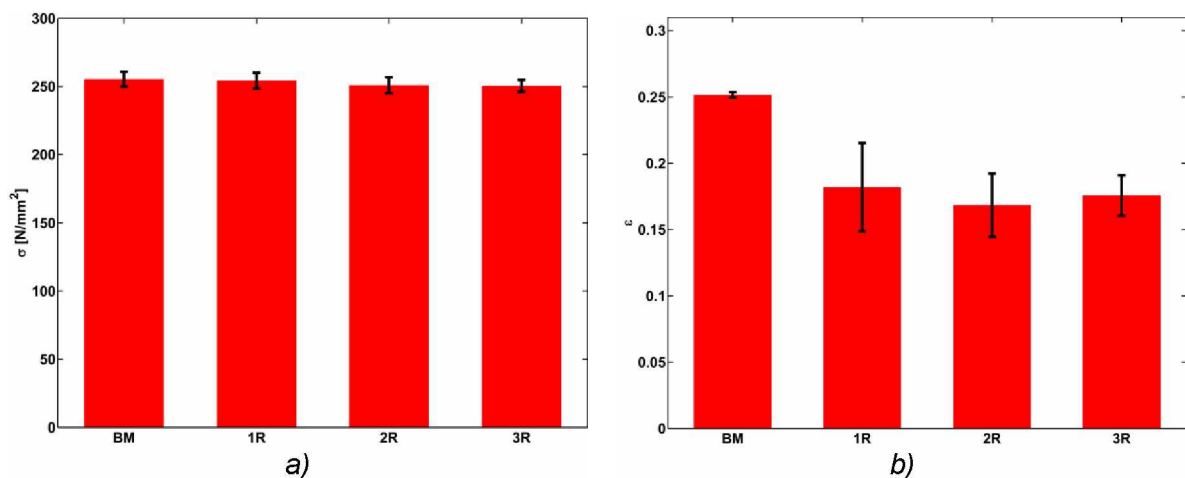


Figura 2.13 - Limite de resistência à tração (a) e deformação correspondente (b) para diferentes configurações de deposição de pinos por CMT PIN em chapas de alumínio de 2 mm de espessura (1R – 3R) e para o material de base sem pinos (BM) (WITTWER *et al.*, 2012)

O processo CMT Pin parece ter importantes possibilidades de aplicação, com destaque para a fabricação de ancoradores mecânicos (pinos) para união de metal com compósito de matriz polimérica (GRAHAM *et al.*, 2014; UCSNIK *et al.*, 2010). Entretanto, por tratar-se de uma tecnologia recente, existem poucas informações sobre seu funcionamento, sobre parametrizações, sobre os possíveis efeitos sobre o metal de base, etc. Assim, para explorar melhor as potencialidades do processo CMT Pin e mesmo propor novas aplicações,

é importante entender e dominar melhor fatores como o funcionamento do processo e o efeito dos parâmetros de deposição dos pinos sobre o metal de base, inclusive em diferentes materiais e espessuras.

2.10 O processo Stud Welding (SW)

O processo conhecido por Stud Welding (SW) é a soldagem de pinos. É um processo clássico usado para a deposição de pinos metálicos, normalmente chamado de weld studs, em um metal de base. Neste processo de soldagem um pino é unido por extremidade, normalmente num ângulo reto, a uma peça de trabalho de metal instantaneamente por uma ligação permanente de alta qualidade, de alta resistência (fundida). Geralmente, em comparação com o processo CMT-PIN, SW é mais barato e mais portátil. No processo stud welding os pinos podem ser depositados manualmente, por sistemas CNC ou mesmo por robôs, normalmente em menos de um segundo. Os pinos podem até ser alimentados automaticamente conferindo um alto grau de automação. O processo de deposição também pode ser feito com ou sem escudo de gás. Existem dois tipos principais de processos de stud welding, conforme apresentado abaixo.

2.10.1 Processo Arc Stud Welding (ASW)

O processo *Arc Stud Welding* (ASW) ou processo de soldagem de pinos a arco elétrico é geralmente usada para soldar pinos do grande-diâmetro aos metais. Os pinos ASW são fornecidos em centenas de formatos e uma variedade de formas, no entanto, devem ser projetados para equipamentos ASW. O processo para a deposição de pinos com ASW é ilustrado pela sequência mostrada na Figura 2.14, consistindo em: a) Um pino/stud e um anel de cerâmica são firmemente colocadas contra a superfície da peça de trabalho sob pressão de uma mola; b) Ao disparar, a pistola de soldagem levanta automaticamente o pino/stud do metal de base e inicia um arco elétrico controlado que funde a extremidade do pino/stud e uma porção do metal de base; c) Um escudo/anel de cerâmica concentra o calor e retém o material fundido na área de soldagem para a máxima resistência e confiabilidade da solda; e d) No momento preciso em que o pino/stud é automaticamente mergulhado na superfície do metal de base, o metal solidifica e uma solda de fusão é completada.

2.10.2 Processo Capacitor Discharge Stud Welding (CDSW)

O processo *Capacitor Discharge Stud Welding* (CDSW) ou Soldagem de Pinos por Descarga de Capacitor é geralmente usado para soldar pinos de pequeno-diâmetro em chapas finas. Uma vez que todo o ciclo de soldagem é completado em milissegundos, as

soldas podem ser feitas sem distorção acentuada ou descoloração (oxidação) no lado reverso do metal de base. Enquanto uma extremidade do pino é projetada para equipamentos CDSW, os pinos CDSW podem ser fabricados em quase qualquer forma. O processo de deposição de pinos com CDSW é ilustrado sequencialmente na Figura 2.15, consistindo em: a) O pino/stud é colocado contra o metal de base (a maioria dos pinos/studs CDSW tem uma ponta especial, o que permite um controle preciso do tempo de soldagem, permitindo soldas consistentes e automáticas); b) Ao acionar a pistola de soldagem, a energia capacitiva armazenada é descarregada através do pino/stud, fundindo o diâmetro total da sua base e uma porção do metal base; c) Uma mola força o pino/stud no metal fundido; e d) O pino/stud é mantido no lugar à medida que o metal fundido se solidifica e cria instantaneamente uma solda de fusão.

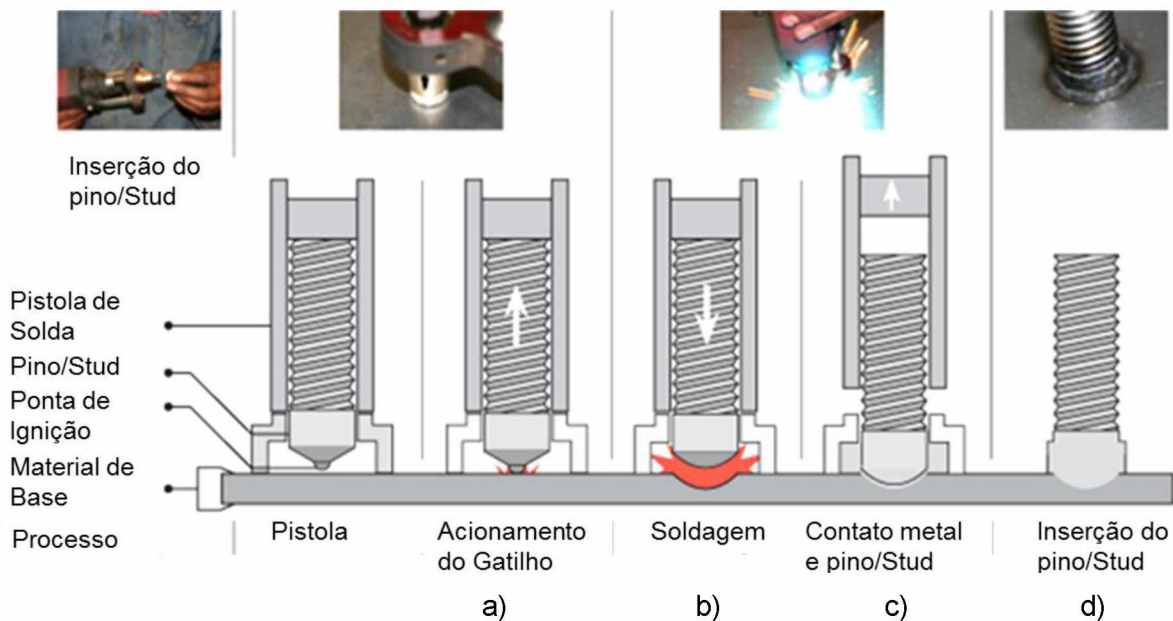


Figura 2.14 - Sequência de deposição de pinos com o processo de soldagem por arco. (RIVET & WELDSTUD MANUFACTURING CC, 2015)

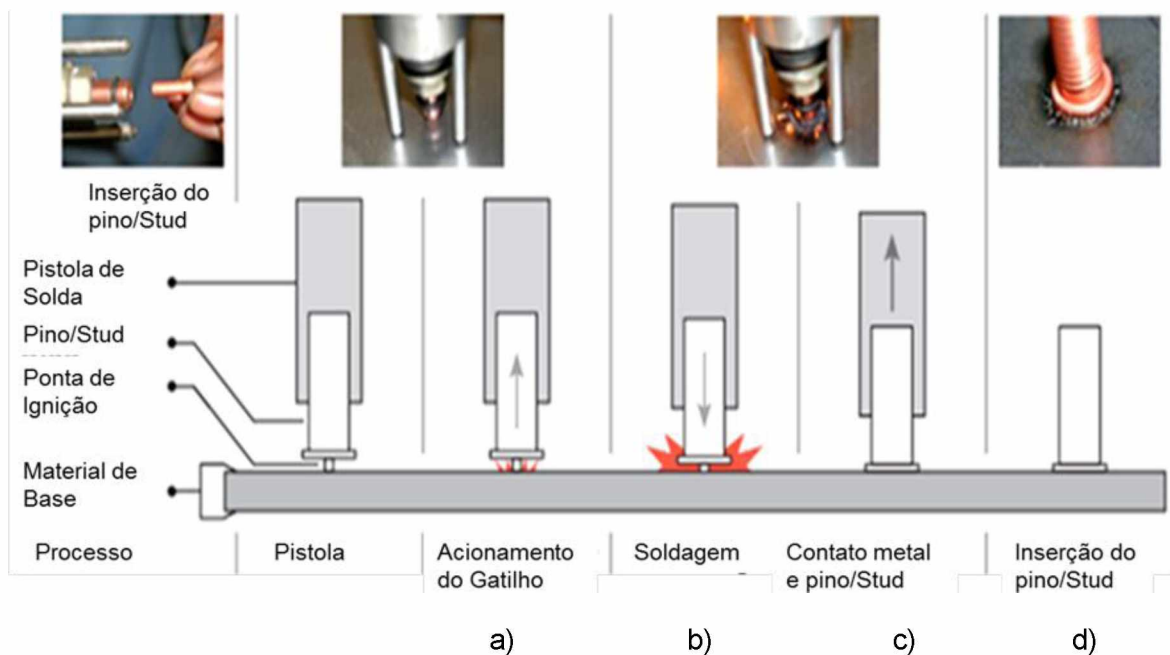


Figura 2.15 – Seqüência de deposição de pinos com o Processo de Soldagem do Pino de Descarga do Condensador (RIVET & WELDSTUD MANUFACTURING CC, 2015)

Segundo Graham *et al.* (2014), o processo CDSW foi avaliado como um método eficiente para um processo de fixação de pino para um método híbrido de combinação de metal-compósito de baixo custo. O curto tempo de processo da técnica CDSW resultou em uma pequena zona afetada pelo calor, tornando-o ideal para soldar pequenos pinos em placas finas. Verificou-se que com este processo de alta energia e excepcionalmente de curta duração (alguns milissegundos) produziu resultados consistentes para pinos soldados de 1 e 1,5 mm de diâmetro e cerca de 2 mm de altura. A Tabela 2.2 resume os destaques dos processos ASW e CDSW

Tabela 2.2 - Destaques da aplicação dos processos ASW e CDSW (baseados em (CUTLASS STUD WELDING, 2015))

| ASW | CDSW |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • Material de base sujo escamoso ou oleoso • Material de base grosso • Pinos de diâmetros grandes • Aço Carbono | <ul style="list-style-type: none"> • Material de base limpa • Material de base fina • Pinos de pequenos diâmetros • Alumínio, aço inoxidável e ligas de titânio • Elevadas taxas de produção • Mais precisão da posição do pino • Menos marcação do lado reverso • Menor distorção de calor • Menos respingos de solda |

CAPÍTULO III

MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

Este capítulo apresenta os materiais e equipamentos principais utilizados nos experimentos conduzidos neste trabalho.

3.1 Materiais utilizados

3.1.1 Eletrodos Consumíveis

Foram utilizados os seguintes arames-eletrodos:

- ER70-S6 com 1 mm de diâmetro para pinos depositados em chapas de aço carbono e de aço galvanizado; e
- ER4043 com 1 mm de diâmetro para pinos depositados em chapas de alumínio.

A Tabela 3.1 apresenta os dados tabelados da composição química do arame-eletrodo ER70-S6. Na Tabela 3.2 tem-se os dados tabelados da composição química do arame-eletrodo ER4043.

Apesar dos eletrodos ER5356 e ER5183 serem mais indicados para soldar a classe 5XXX de alumínios, foi utilizado o ER4043 por este se aproximar mais da composição indicada na linha sinérgica do fonte de soldagem CMT.

Tabela 3.1 - Dados tabelados da composição química do arame ER70-S6 AWS A5.18 (Fonte: MATWEB, 2015)

| Norma | | Elementos na composição do arame (%) | | | | | |
|-----------|---------|--------------------------------------|-----|-------|------|-------|-------|
| Classe | Tipo | Fe | Mn | C | Si | S | P |
| AWS A5.18 | ER70S-6 | 97,3 | 1,6 | 0,090 | 0,95 | 0,020 | 0,015 |

Tabela 3.2 - Dados tabelados da composição química do grame ER 4043-O AWS A5.10
(Fonte: MATWEB, 2015)

| Norma | | Elementos na composição do arame (%) | | | | | |
|-----------|---------|--------------------------------------|--------------|------|------|------|------|
| Classe | Tipo | Al | Si | Fe | Cu | Mg | Mn |
| AWS A5.10 | ER 4043 | 92,3 - 95,5 | 4,5 - 6,0 | 0,80 | 0,30 | 0,05 | 0,05 |

3.1.2 Gás de proteção

Nos experimentos com os corpos de prova de aço carbono e aço galvanizado, tomando-se como base o trabalho de Gartner (2015), utilizou-se a mistura Ar+10,7%CO₂, obtida por meio de misturador, a uma vazão de 7,0 l/min. Já para os corpos de prova de alumínio utilizou-se o Ar puro, também a uma vazão de 7,0 l/min. Todas as vazões foram aferidas por bibímetro na saída da tocha. As composições químicas das misturas foram verificadas três vezes, antes de iniciar o processo, através do analisador de gás (Oxybaby®).

3.1.3 Metal de base

Para confecção dos corpos de prova foram utilizados três diferentes tipos de materiais, todos com 0,5 e 1,0 mm de espessura: aço carbono SAE 1020, aço galvanizado SAE 1020 e alumínio 5052.

Nas Tabelas 3.3 e 3.4 encontram-se os dados tabelados da composição química do aço carbono e do alumínio utilizados e na Tabela 3.5 os dados tabelados das respectivas propriedades mecânicas. Para este trabalho considera-se que o aço galvanizado tem as mesmas propriedades mecânicas do aço carbono.

Tabela 3.3 - Dados tabelados da composição química do aço SAE 1020

(Fonte: MATWEB, 2015)

| Norma | | Elementos na composição da chapa de aço SAE 1020 | | | | |
|----------|----------------|--|----------------|----------------|--------------|-----------|
| Material | Espessura (mm) | Fe | Mn | C | P | S |
| SAE 1020 | 0,5 e 1,0 | 99,08 - 99,53 | 0,30 - 0,60 | 0,17 - 0,23 | < = 0,040 | < = 0,050 |

Tabela 3.4 - Dados tabelados da composição química do alumínio 5052

(Fonte: MATWEB, 2015)

| Norma | | Elementos na composição da chapa de alumínio 5052 | | | | | |
|----------|----------------|---|------------|-------------|----------|----------|----------|
| Material | Espessura (mm) | Al | Mg | C | Fe | Cu | Mn |
| Al 5052 | 0,5 e 1,0 | 95,70 - 97,70 | 2,2 - 2,85 | 0,15 - 0,35 | < = 0,40 | < = 0,10 | < = 0,10 |

Tabela 3.5 - Dados tabelados das propriedades mecânicas do aço carbono (SAE 1020) e alumínio 5052 (Fonte: MATWEB, 2015)

| Propriedades mecânicas | Aço 1020 | Alumínio 5052 |
|----------------------------|----------|---------------|
| Tensão de ruptura (MPa) | 420 | 228 |
| Tensão de escoamento (Mpa) | 350 | 193 |
| Alongamento (%) | 35,8 | 12 |

3.2. Equipamentos utilizados

3.2.1 Equipamento de soldagem

Para deposição dos pinos pelo processo MIG/MAG CMT utilizou-se o equipamento na Figura 3.1. O controle remoto Fronius RCU5000i, exibido na Figura 3.2, foi utilizado para entrada dos parâmetros que definem a altura e a geometria da cabeça do pino.

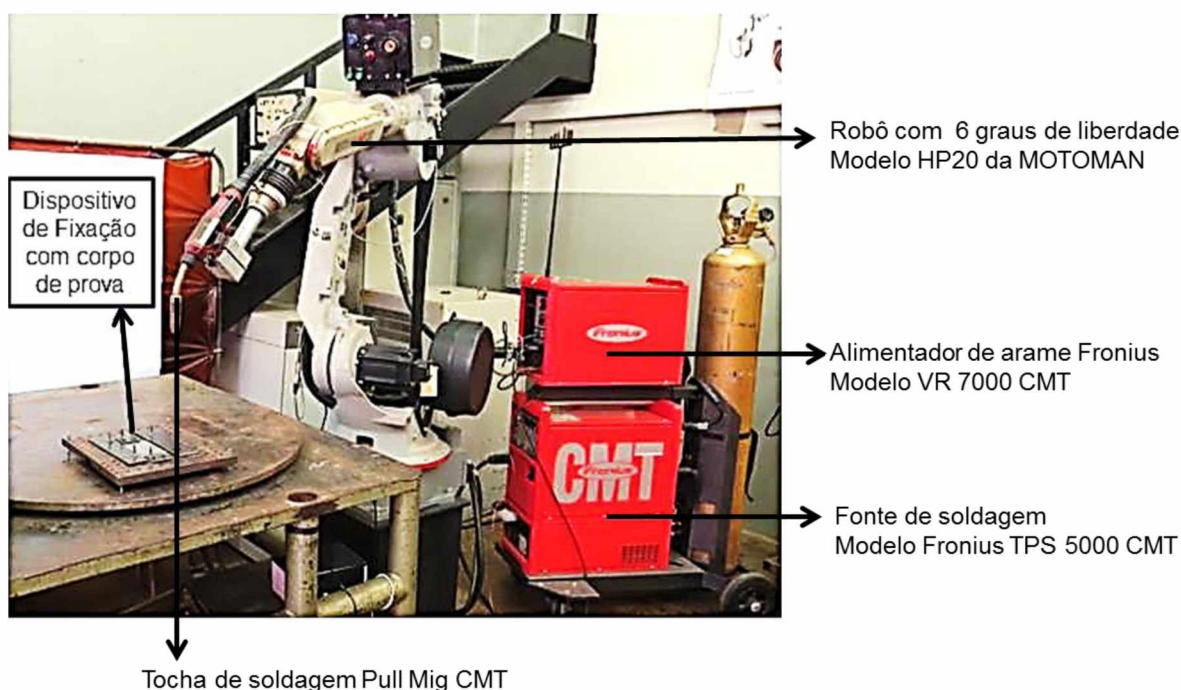


Figura 3.1 - Equipamento de soldagem CMT



Figura 3.2 - Controle remoto Fronius RCU 5000i

3.2.2 Misturador de gás

O misturador de gás utilizado (Figura 3.3) é composto por 4 rotômetros, onde as faixas de vazão são sequenciais, sendo possível pela vazão ajustar a mistura desejada de até quatro gases. Os gases passam por duas câmaras de mistura, sendo uma na saída dos rotômetros e uma logo em seguida que garante a homogeneização da mistura gasosa devido a turbulência ocasionado pelo fluxo gasoso vindo da primeira câmara com paredes defletoras internas à esta segunda câmara.

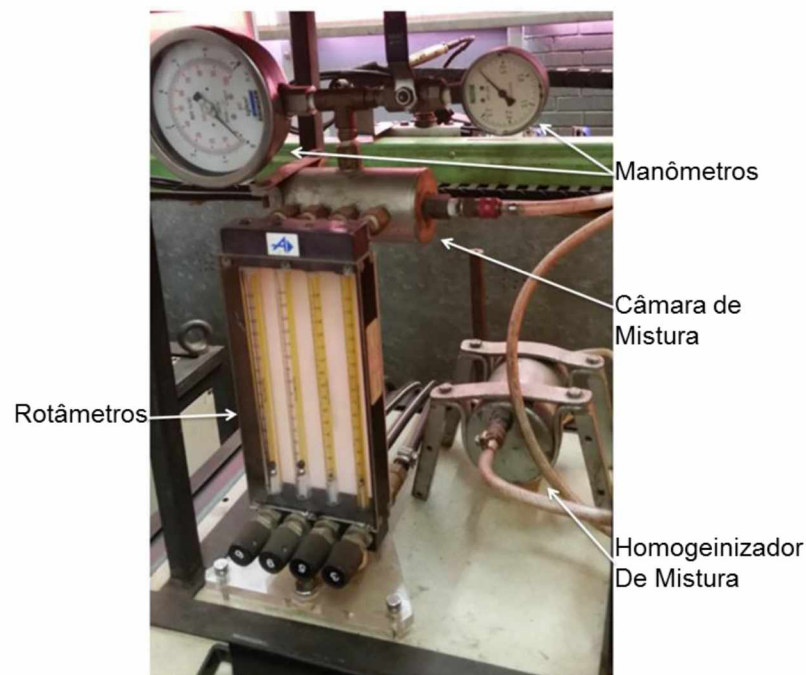


Figura 3.3 - Misturador de gás utilizado

3.2.3 Analisador de gás

Um analisador de gás OXYBABY O₂ ou CO₂ (Figura 3.4) foi utilizado para conferência da mistura de gases, garantindo que a mistura teve a composição planejada.



Figura 3.4 - Analisador de gás

3.2.4 Lixadeira manual / Politriz

O processo de lixamento inicial de amostras de chapas com pinos depositados para metalografia foi manual (Figura 3.5 a), indo de lixas 100 até 2000 mesh. A seguir realizou-se um processo de polimento em uma politriz DP-7 da Struers (Figura 3.5 b), com óxido de cromo de 5 micrometros. Ao final fez-se um polimento, também no dispositivo DAP-7 Struers, com sílica coloidal de 0,06 micrometros.



(a)



(b)

Figura 3.5 - Sistema de Lixamento e Polimento : (a) Lixadeira Manual e (b) Politriz

3.2.5 Máquina de medir por coordenadas

Para medir a planicidade (distorção) dos corpos de prova antes e depois do processo de deposição dos pinos pelo processo MIG/MAG CMT, foi utilizada uma mesa de medição de coordenadas 3D (Figura 3.6). Foi utilizada uma máquina de medição tridimensional Mitutoyo modelo BR-443 com resolução de 0,5 micrometros, curso de medição no eixo X e no eixo Y de 400 mm cada e no eixo Z de 300 mm. O programa MCOSMOS V3.0 foi utilizado para adquirir/processar as medidas.

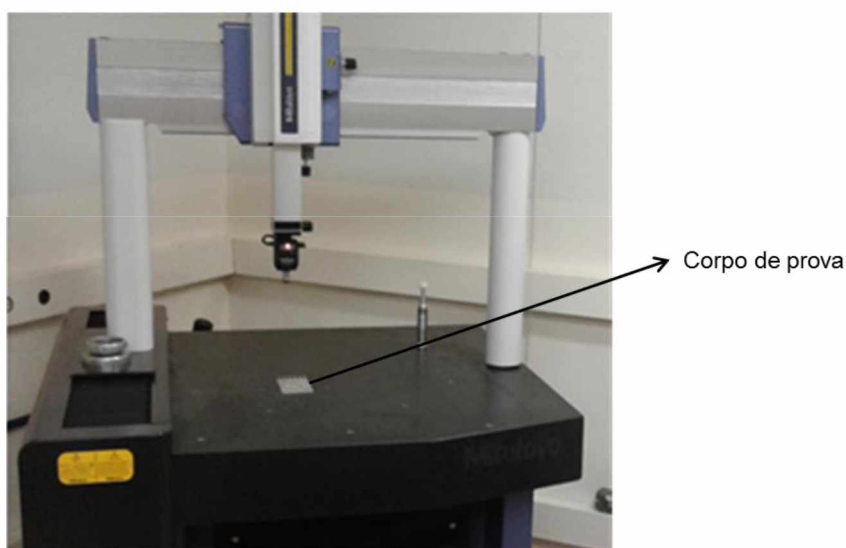


Figura 3.6 - Máquina de medir por coordenadas Mitutoyo M443

3.2.6 Projetor de perfil

Para medir a largura do corpos de prova preparados para ensaio de tração, foi utilizado um projetor de perfil Mitutoyo modelo PJ- A3000 (Figura 3.7) com resolução de 1 micrometro com curso de medição no eixo X e no eixo Y de 50 mm cada. O projetor de perfil foi utilizado em virtude da baixa espessura das chapas a serem testadas, o que dificultaria a utilização de um micrômetro, por exemplo.



Figura 3.7 - Projetor de perfil PJ-A3000

3.2.7 *Micrômetro*

Para medir a espessura dos corpos de prova a serem testados em tração, utilizou-se um micrômetro Pontec com resolução de 1 micrometro e faixa nominal de 0-25 mm.

3.2.8 *Máquina de ensaio de tração*

O equipamento utilizado para o ensaio de tração foi uma máquina universal de ensaios mecânicos MTS modelo 810 com cabeçote 647 Hydraulic Grips (Figura 3.8 a). Como os corpos de prova são de chapas finas, a pressão hidráulica ajustável das garras de fixação (Figura 3.8.b) impediu que as mesmas sofressem danos e/ou escorregassem durante os testes.

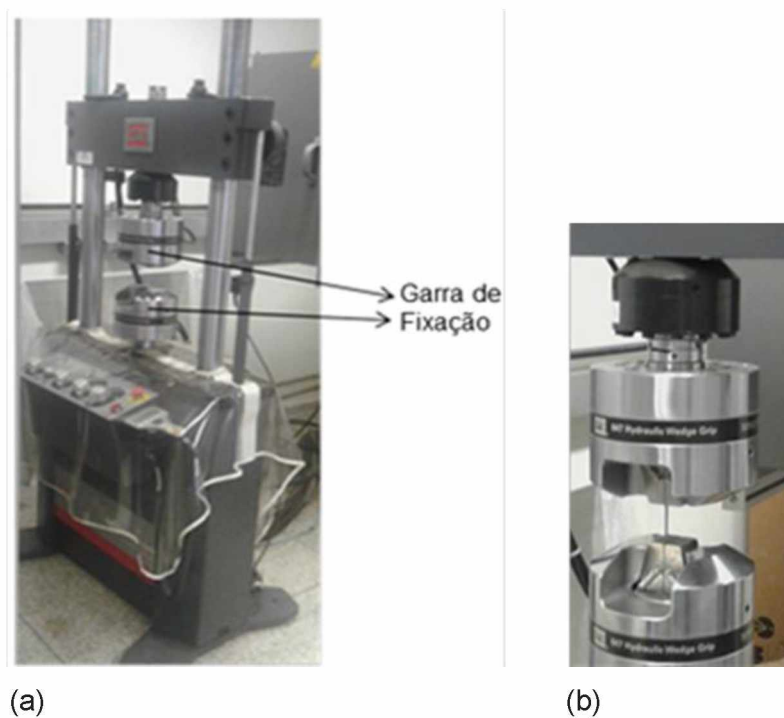


Figura 3.8 - Equipamento utilizado para teste de tração: (a) Máquina de tração e (b) Garra de fixação do corpo de prova

3.2.9 Microscópio ótico

Para análise das macroestruturas nas junções pino-chapa, utilizou-se um microscópio Olympus modelo BX 51M (Figura 3.9).



Figura 3.9 - Microscópio ótico

3.2.10 Câmara de filmagem

Uma câmara de filmagem de alta velocidade modelo Hispec 5 (Figura 3.10) foi utilizada para filmar o processo de deposição dos pinos a 4000 quadros/segundo.



Figura 3.10 - Câmera de filmagem de alta velocidade

3.2.11 Sistema de aquisição de dados

No processo de deposição dos pinos utilizou-se um sistema de aquisição de dados instalado em um computador para aquisição dos sinais elétricos de corrente e tensão de soldagem. A aquisição foi feita a uma taxa de amostragem de 5 kHz utilizando uma placa NI USB-6009 (Figura 3.18) e um programa desenvolvido em linguagem *LabView*®. Este programa captura os dados durante a soldagem apresentando-os em forma gráfica no final da aquisição e permite exportá-la em diferentes extensões para análise posterior.



Figura 3.11 - Placa para aquisição de dados

Utilizou-se na aquisição do sinal de corrente um sensor *Hall* da marca LEM *Transducers* modelo LT 500-T cuja faixa de medição é de 0 a 500 A e para a tensão utilizou-se um divisor de tensão com faixa de medição de 0 a 60 V. Os dados adquiridos foram trabalhados no software *OriginPro* 8.0, onde é possível abrir, manusear, sincronizar e tratar os dados gravados pelo programa de aquisição.

CAPÍTULO IV

Estudo da deposição dos pinos

Este capítulo teve como objetivo avaliar o efeito dos dois parâmetros de regulação do CMT PIN acessíveis ao usuário através da interface remota RCU 5000i e do programa DB0875. A altura do pino ou “Altitude Adaptation” pode ser regulada de -30 (altura mínima) até +30 (altura máxima) e o parâmetro “Ball/Cyl Adaptation” que define o tipo de geometria da cabeça do pino variada de -5,0 até +5,0, originando uma alteração no tipo de geometria de cabeça do pino de cilíndrica até abaulada. Tomando-se como base o trabalho de Gartner (2015), que variou a DBCP (Distância Bico de Contato Peça) em 10, 15 e 20 mm, utilizou-se neste presente trabalho um valor constante de DBCP de 10 mm por apresentar a menor altura de pino. Cada condição de deposição foi filmada com uma câmera de alta velocidade para visualização do processo de deposição dos pinos em três materiais e em duas espessuras e com o sistema de aquisição de dados obteve-se os valores de tensão e corrente elétrica, para então calcular a potência média instantânea de cada experimento.

4.1. Metodologia

A avaliação do efeito dos dois parâmetros de deposição por CMT PIN (“Altitude Adaptation” e “Ball/Cyl Adaptation”) ocorreu em 5 fases, como descrito a seguir.

Fase I - Definição das variações

No processo de deposição de pinos metálicos variou-se a altura do pino em 3,0 e 5,0 mm, para os três materiais utilizados nas duas espessuras Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Combinação das condições e parâmetros utilizados no estudo da deposição dos pinos

| Variáveis | Variações | Número de variações |
|-----------------------------|--|---------------------|
| Material | Alumínio 5052, Aço carbono 1020, e Aço galvanizado 1020. | 3 |
| Espessura do material (mm) | 0,5 e 1,0 | 2 |
| Altura dos pinos (mm) | 3,0 e 5,0 | 2 |
| Tipo de geometria dos pinos | Cabeça Cilíndrica | 1 |

Fase II - Preparação dos corpos de prova.

Foram confeccionados no total 72 corpos de prova, nas dimensões de 100 x 10 mm, no perfil indicado na Figura 4.1. Combinando as quatro variáveis apresentadas na Tabela 4.1, teve-se como resultado 12 combinações (3x2x2x1 variáveis), com 6 repetições, sendo 3 corpos de prova para ensaio de tração, 1 corpo de prova para metalografia, 1 corpo de prova sem deposição para ensaio de tração e 1 corpo de prova de reserva. Por questões de economia a amostra com a qual realizou-se a filmagem foi utilizada no ensaio de tração. Como os corpos de prova (CPs) serão também utilizados no teste de tração mais adiante no Capítulo VI, suas dimensões foram especificadas pela “Sheet Type Specimens da Norma ASTM E8/e8m-13a, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials” como mostrado na Figura 4.2.

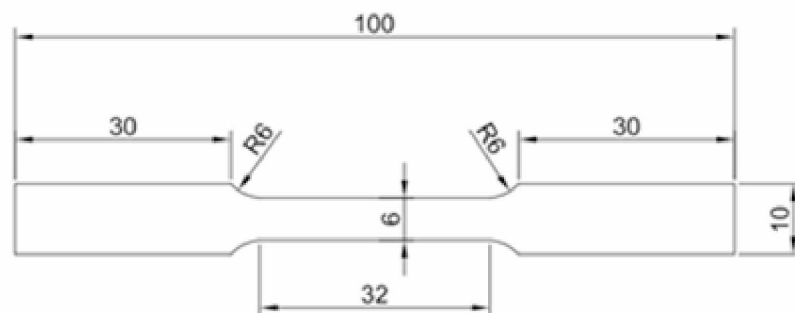


Figura 4.1 - Corpo de prova de 100 x 10 mm

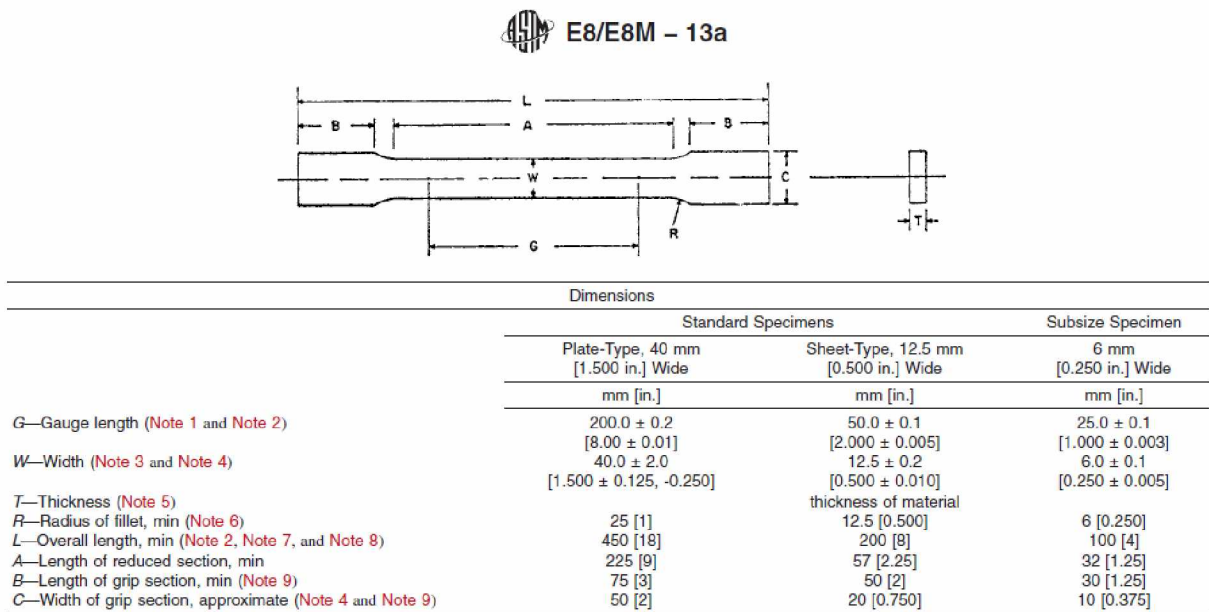


Figura 4.2 - Dimensão do corpo de Prova (Fonte: ASTM E8/E8M, 2013)

Devido à dificuldade de usinar o perfil dos CPs em chapas finas, ao invés da usinagem convencional, optou-se pelo corte por jato d'água abrasivo, obtendo-se 8 corpos de prova em cada chapa de 200 x 120 mm (levando em conta alguns reservas), conforme Figura 4.3.

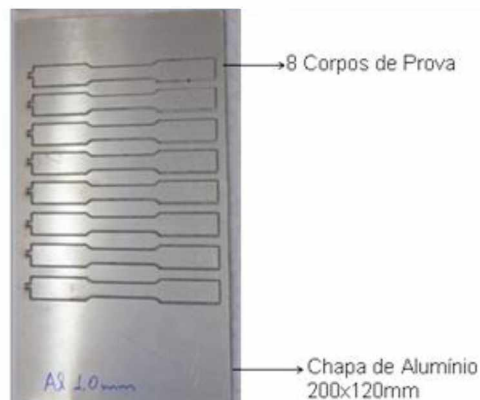


Figura 4.3 - Chapa de alumínio com os corpos de prova cortados

Em cada um dos 24 CPs foram depositados 3 pinos adotando-se para cada pino os mesmos parâmetros. A região de deposição foi marcada nos CPs, sendo o primeiro pino no centro e os outros dois equidistantes 10 mm do pino central, como indicado na Figura 4.4

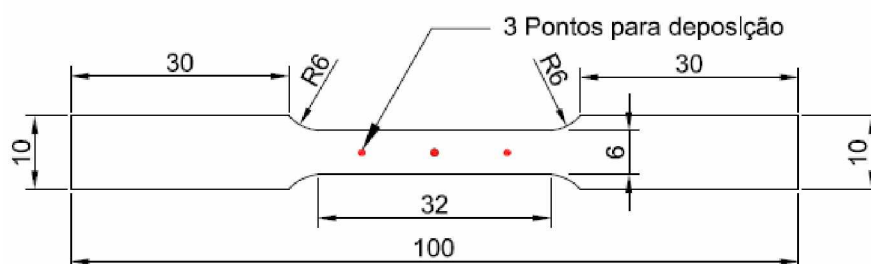


Figura 4.4 - Marcação da posição de deposição dos 3 pinos

Fase III - Deposição dos pinos

Usou-se um robô e uma fonte de soldagem CMT conforme Figura 3.1.

Como utilizou-se dois tipos de gás de proteção (descritos abaixo), os experimentos foram realizados em duas etapas, sendo a primeira com o aço (carbono e galvanizado) e a segunda com o alumínio.

a) Chapas de aço carbono e aço galvanizado

Nos dois tipos de chapas de aço, utilizou-se o arame de aço classe AWS ER70S-6 com diâmetro nominal de 1,0 mm para fabricação dos pinos. Para gás de proteção utilizou-se de Ar+10,7%CO₂ na vazão de 7 l/min; sendo a mesma aferida por meio de um fluxômetro/bibímetro calibrado. A composição química da mistura foi verificada através de um analisador de gás (Oxybaby®). Também utilizou-se o controle remoto Fronius RCU 5000i que tem como base o programa-sinérgico DB0875 e o sub programa G3Si1, próprio para o arame de aço. Segundo Scotti (2008), o fluxo adequado para praticamente todas as condições de soldagem deve ser de 10 a 16 l/min. Nos experimentos, optou-se por uma vazão menor por questões econômicas.

Apenas os corpos de prova de aço carbono sofreram processo de limpeza, retirando-se apenas superficialmente os pontos de oxidação, utilizando-se uma lixa # 600 mesh nos CPs com pontos superficiais de oxidação e uma lixa # 220 mesh nos CPs com pontos com oxidações mais profundas. Em seguida os CPs foram limpos com um pano com álcool para desengraxe antes da fixação no dispositivo. Os CPs de aço galvanizado foram limpos com um pano com álcool para desengraxe antes da fixação no dispositivo. Para evitar a movimentação dos CPs durante os testes, estes foram fixados num dispositivo composto por 1 base furada e 4 suportes, conforme Figura 4.5. Na Figura 4.6, pode-se verificar os 3 pinos cilíndricos depositados no CP de aço carbono.



Figura 4.5 - Fixação do corpo de prova



Figura 4.6 - Três pinos depositados em CP de aço carbono

b) Chapas de alumínio

No processo de deposição dos pinos de alumínio, utilizou-se o mesmo equipamento de soldagem, porém o arquivo do programa-sinérgico DB0875 foi o AISi5Pin e foi feita a troca do conduíte, conectores e roletes relacionados específicos para arame de alumínio do alimentador até a tocha.

Utilizou-se o arame de alumínio da classe AWS ER4043 de diâmetro nominal de 1 mm. O gás de proteção foi o Argônio na vazão de 7 l/min. Como na deposição do arame de aço, a vazão e composição química também foram aferidas. Os corpos de prova sofreram um processo de limpeza com um pano molhado em álcool para desengraxe antes da fixação no dispositivo.

Fase IV - Definição dos parâmetros do processo de soldagem

Em trabalho recente, Skhabovskyi *et al.* (2015), na deposição de pinos de aço demonstraram que com a regulagem do “Ball/Cyl. Adaptation” em zero obtém-se pinos de cabeça cilíndrica e o aumento do valor do “Altitude Adaption” faz crescer a altura do pino quase linearmente com altura mínima de 3,0 mm e altura máxima de 5,0 mm. Assim, nos experimentos aqui realizados, optou-se em testar os parâmetros “Ball/Cyl. Adaptation” em zero (pinos com cabeça cilíndrica) e o “Altitude Adaption” com o máximo (+30) e mínimo (-

30) para obter-se alturas de pino próximas de 5,0 e 3,0 mm respectivamente. Na Figura 4.7 pode-se verificar a regulação no controle remoto RCU5000i dos parâmetros para pino cilíndrico com 3,0 mm de altura e do arquivo do programa G3Si1Pin para pino de aço.



Figura 4.7 - Controle remoto RCU5000i com os parâmetros do CMT PIN

Na Tabela 4.2 encontram-se os parâmetros utilizados em cada uma das 12 combinações avaliadas. Para cada tipo de material e espessura, obteve-se diferentes valores de resistência em miliohms ($m\Omega$) e indutância em microhenry (μH), conforme mostrado na Tabela 4.3. Esses valores são calculados pelo próprio equipamento CMT Pin em procedimento padrão (Fronius, 2012) antes da deposição em cada condição, ou seja, antes do início do experimento em cada mudança de variável de material e/ou espessura, que são utilizados na "equilibração".

Tabela 4.2 - Parâmetros de deposição adotados

| Teste | Material | Espessura (mm) | Quantidade de Pinos | Programa | Parâmetro "Altitude Adaptation" | Parâmetro "Ball/Cyl. Adaptation" |
|-------|-----------------|----------------|---------------------|----------|---------------------------------|----------------------------------|
| 1 | Aço Carbono | 0,50 | 3 | 180 | -30 | 0 |
| 2 | Aço Carbono | 0,50 | 3 | 181 | 30 | 0 |
| 3 | Aço Carbono | 1,00 | 3 | 180 | -30 | 0 |
| 4 | Aço Carbono | 1,00 | 3 | 181 | 30 | 0 |
| 5 | Aço Galvanizado | 0,50 | 3 | 180 | -30 | 0 |
| 6 | Aço Galvanizado | 0,50 | 3 | 181 | 30 | 0 |

| Teste | Material | Espessura (mm) | Quantidade de Pinos | Programa | Parâmetro "Altitude Adaptation" | Parâmetro "Ball/Cyl. Adaptation" |
|-------|-----------------|----------------|---------------------|----------|---------------------------------|----------------------------------|
| 7 | Aço Galvanizado | 1,00 | 3 | 180 | -30 | 0 |
| 8 | Aço Galvanizado | 1,00 | 3 | 181 | 30 | 0 |
| 9 | Alumínio | 0,50 | 3 | 190 | -30 | 0 |
| 10 | Alumínio | 0,50 | 3 | 191 | 30 | 0 |
| 11 | Alumínio | 1,00 | 3 | 190 | -30 | 0 |
| 12 | Alumínio | 1,00 | 3 | 191 | 30 | 0 |

Tabela 4.3 - Valores de resistência e indutância dos materiais utilizados

| Valores de Resistência e Indutância | | | |
|-------------------------------------|----------------|------------------|-----------------|
| Material | Espessura (mm) | Resistência (mΩ) | Indutância (μH) |
| Aço Galvanizado | 0,50 | 28,5 | 10,0 |
| Aço Galvanizado | 1,00 | 24,9 | 10,0 |
| Aço Carbono | 0,50 | 32,0 | 10,0 |
| Aço Carbono | 1,00 | 29,7 | 10,0 |
| Alumínio | 0,50 | 28,0 | 10,0 |
| Alumínio | 1,00 | 24,0 | 10,0 |

Fase V - Filmagem da deposição dos pinos

Utilizou-se uma câmera de alta velocidade para gravar a deposição dos pinos. A taxa utilizada na filmagem foi de 4000 quadros de imagem por segundo. As lentes da câmera ficaram com as aberturas bem reduzidas para capturar somente a quantidade de luz suficiente para observar o que acontece durante o tempo em que o arco elétrico está aberto. Para uma melhor visualização do ciclo da deposição do pino, foram colocados 2 pontos de iluminação com 2 lâmpadas em cada ponto de 1000 W cada. Como o calor irradiado pelas lâmpadas foi muito intenso, para reduzi-lo colocou-se um ventilador que era acionado somente quando a não estava se soldando. Foram registrados 12 filmes, um para cada situação avaliada. A Figura 4.8 mostra o esquema do sistema de montagem para deposição dos pinos com a posição da câmera de alta velocidade.

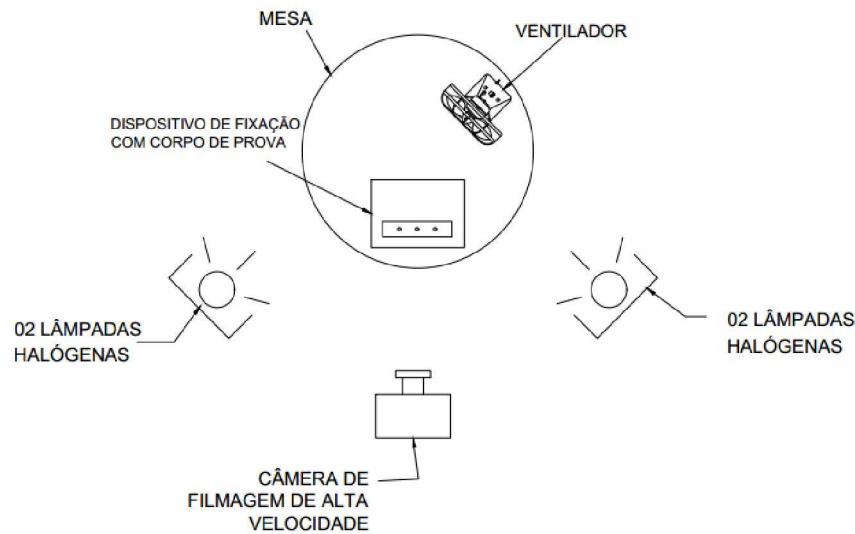


Figura 4.8 - Esquema mostrando o posicionamento da mesa, dispositivo de fixação com CP, câmera de alta velocidade e as lâmpadas para iluminação

Além da filmagem, os sinais elétricos de corrente e tensão de todos os experimentos foram adquiridos por um sistema de aquisição a uma taxa de amostragem de 4 kHz, sendo utilizada uma placa *National Instruments* modelo NI USB-6009 junto com um programa desenvolvido em linguagem *LabView* que captura os dados durante a soldagem apresentando-os em forma gráfica ao término da aquisição.

4.2. Resultados

Segundo o trabalho de Gartner (2015) para o aço carbono, os parâmetros “Altitude adaptation” e o “Ball/cyl adaptation” levam a mudanças no formato de onda da corrente (e consequentemente da tensão), mas apenas no que foi chamado pelos autores de t_{aq} (tempo de solidificação) e t_{solpp} (tempo de aquecimento).

Assim, a deposição (formato de onda da corrente e tensão) dos pinos foi dividida como no trabalho de Gartner (2015), basicamente em 4 fases, conforme exibido nas Figuras 4.9 e 4.10, sendo:

Fase 1 - ocorre abertura do arco e a fusão da ponta do arame e de parte da chapa;

Fase 2 - ocorre a solidificação do pé do pino na chapa;

Fase 3 - há o aquecimento lento do pino, aumentando-se a temperatura até ocorrer seu rompimento pela tração aplicada pelo motor da tocha.

Fase 4 - a tensão é apenas para garantir que o pino se rompa.

O tempo de solidificação (t_{solpp}) ocorre na Fase 2, onde ambas a corrente e a tensão são zero, e é o tempo em que o pé do pino se solidifica no corpo de prova. O tempo de aquecimento (t_{aq}), ocorre na Fase 3 e é quando ocorre o aquecimento lento do pino

aumentando-se a temperatura até que o mesmo se rompa pela tração.

Observa-se dois diferentes tipos de gráficos nas Figuras 4.9 e 4.10, onde a diferença reside no tempo de solidificação e no tempo de aquecimento dos experimentos aqui realizados. Percebe-se que para o pino de menor altura, o tempo de solidificação é bem menor e o tempo de aquecimento é maior.

Percebeu-se através dos experimentos de Gartner (2015), que o tempo de solidificação é influenciado pelo parâmetro “Altitude Adaptation” e o tempo de aquecimento do tipo de geometria da cabeça do pino (“Ball/cyl adaptation”).

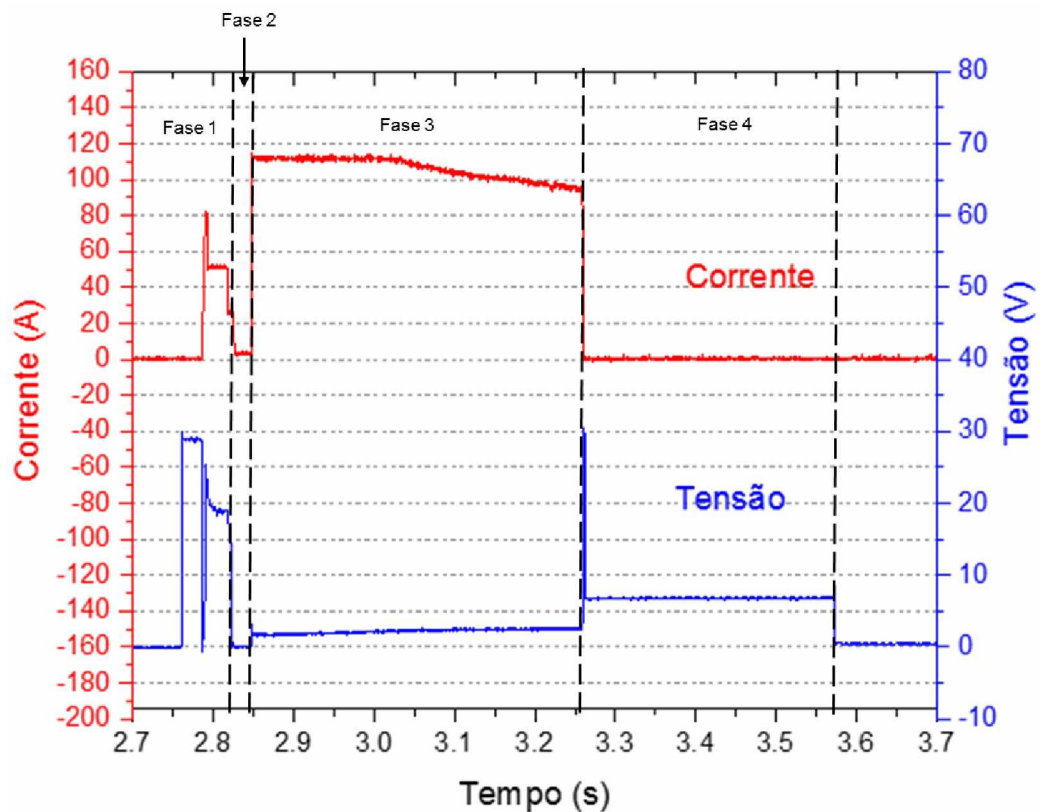


Figura 4.9 - Ondas de corrente e tensão da deposição de pinos de aço carbono, espessura de chapa de 1,0 mm e altura de pino de 3,0 mm (GARTNER, 2015)

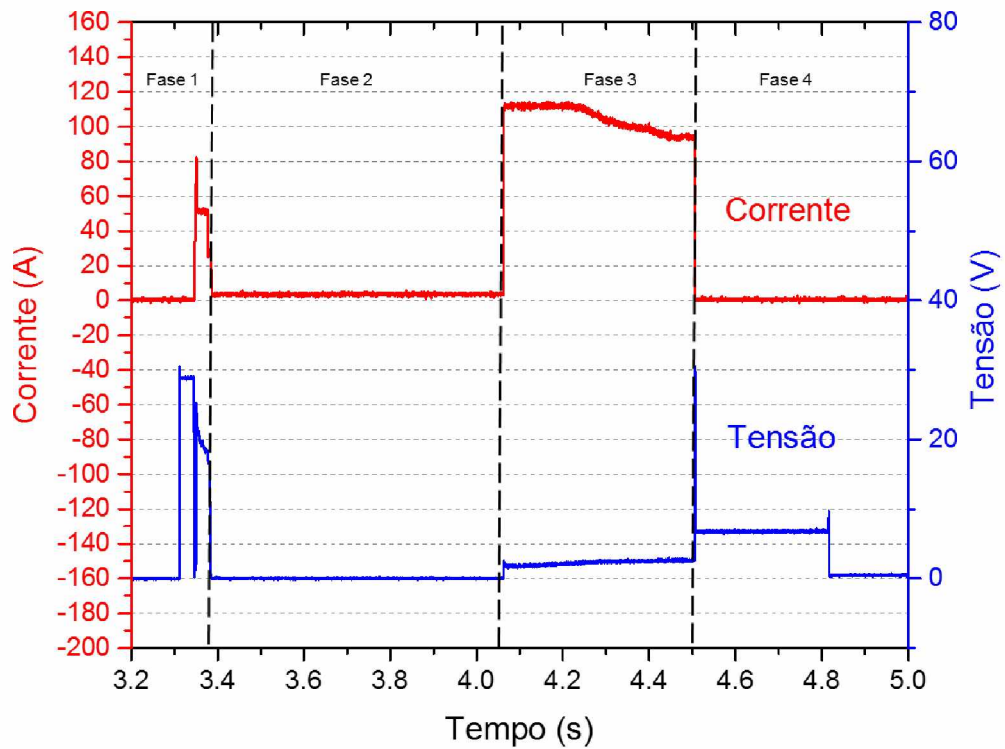


Figura 4.10 - Ondas de corrente e tensão da deposição de pinos de aço carbono, espessura de chapa de 1,0 mm e altura de pino de 5,0 mm (GARTNER, 2015)

Para uma melhor representação da deposição dos três pinos tem-se nas Figuras 4.11, 4.12, 4.13 e 4.14 a montagem obtida através da filmagem, mostrando estágios da deposição dos pinos em cada uma das quatro fases.

Como visto nessas figuras, na primeira fase, ocorre o contato do pino com a chapa, onde pode-se visualizar a ação do arco através do clarão, iniciando-se o processo de soldagem. Na próxima fase ocorre a solidificação do pino, depois ocorre o aquecimento quando o pino aquece lentamente aumentando a temperatura até que ele fique com menor resistência mecânica e rompa na última fase.

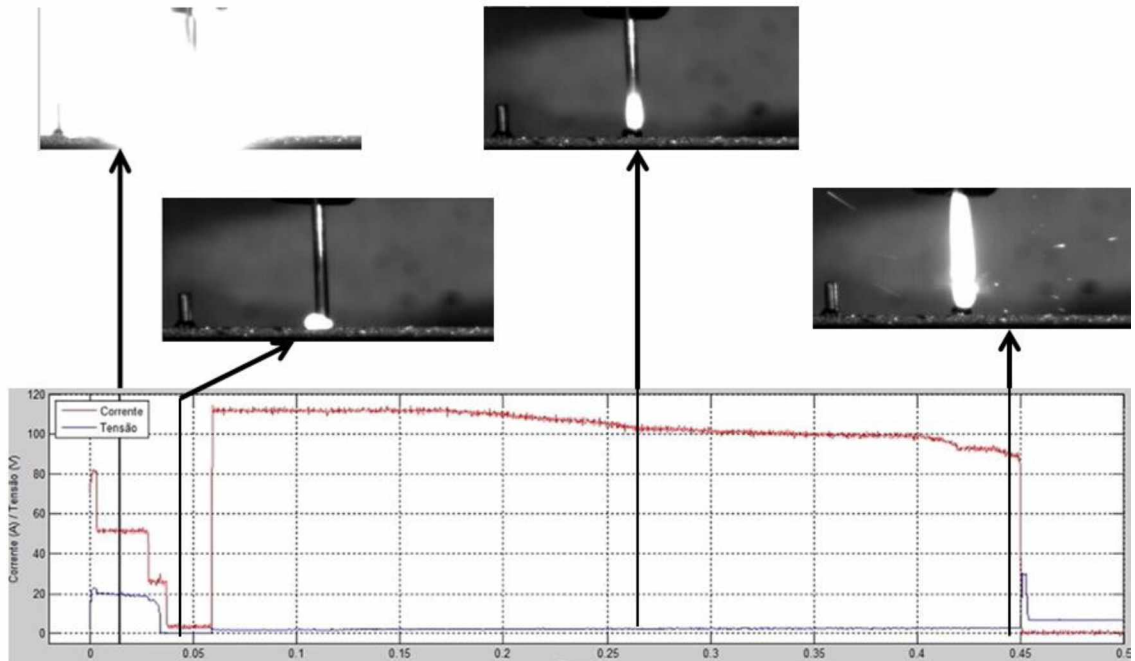


Figura 4.11 - Visualização de fases da deposição de pinos em chapa de aço carbono com espessura 1,0 mm e pino 3,0 mm de altura

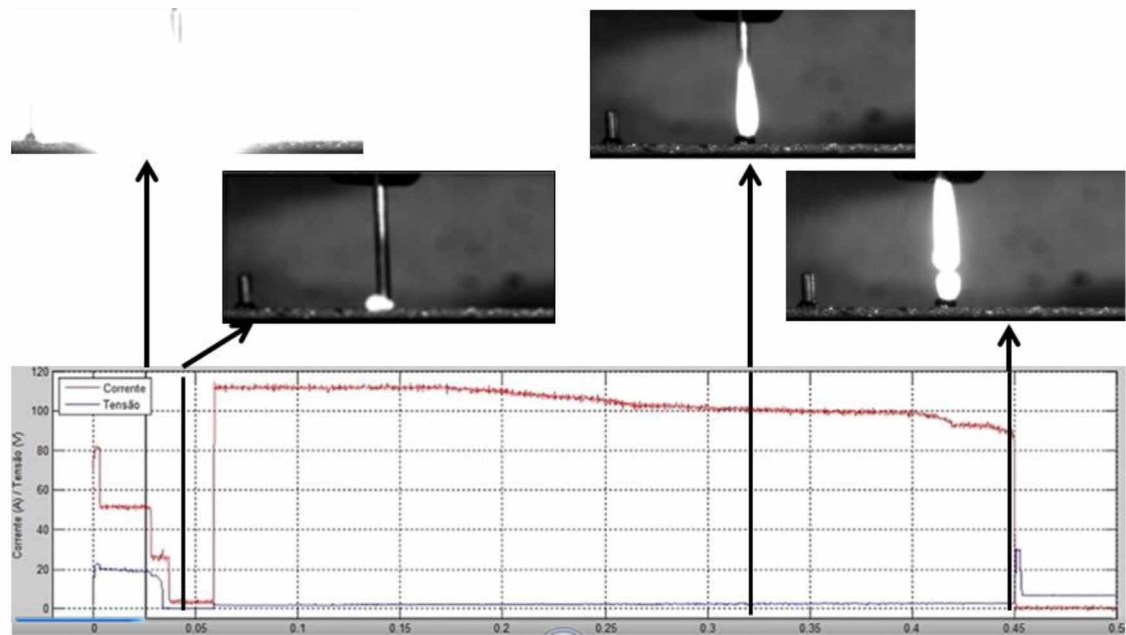


Figura 4.12 - Visualização de fases da deposição de pinos em chapa de aço galvanizado com espessura 1,0 mm e pino de 3,0 mm de altura

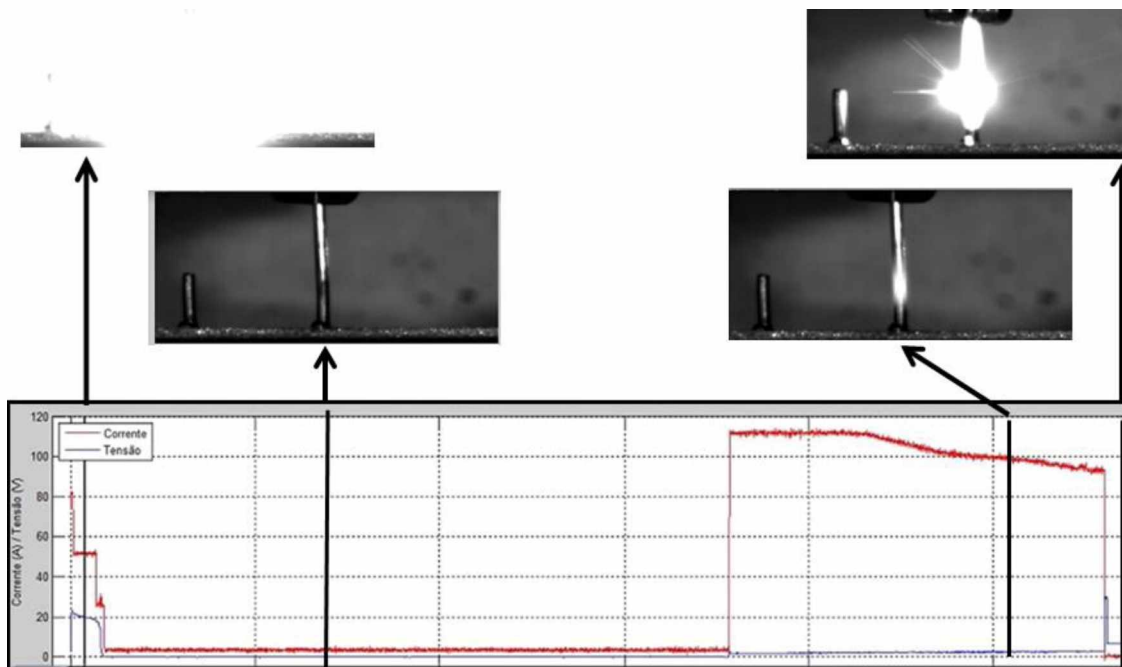


Figura 4.13 - Visualização de fases da deposição de pinos em chapa de aço galvanizado com espessura 1,0 mm e pino de 5,0 mm de altura

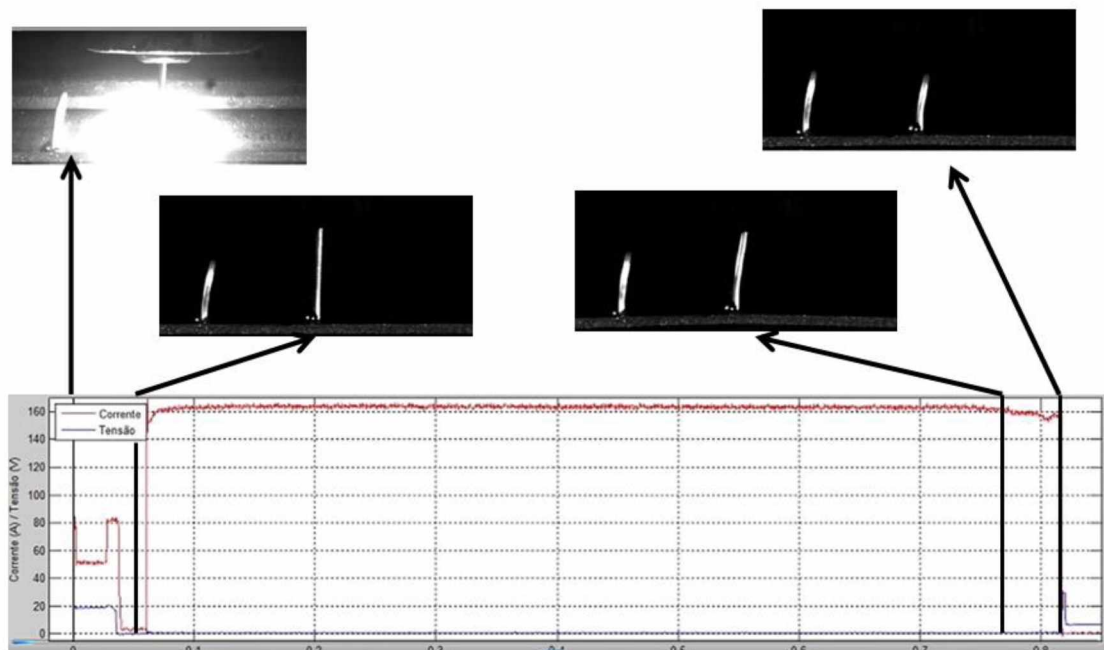


Figura 4.14 - Visualização de fases de deposição de pinos em chapa de alumínio com espessura 1,0 mm e pino de 3,0 mm de altura

Um aspecto importante que se pode se observar através da Figura 4.15 para o alumínio, é que na deposição do pino, em relação aos de aço, ocorreu uma deformação ou seja uma inclinação devido ao fato de ser o alumínio um material mais dúctil. Além disso, os pinos de alumínio não apresentaram uma boa repetitividade, diferente dos pinos de aço,

conforme pode ser visto na Figura 4.16). Outro ponto a destacar é que o arame de alumínio não fica brilhante (incandescente) como o de aço no momento de aquecimento.

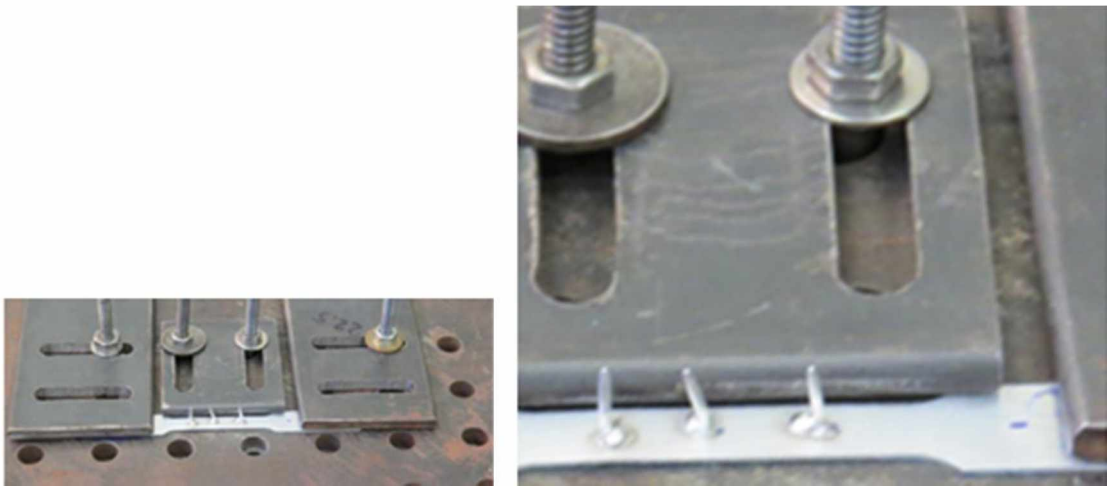


Figura 4.15 - Inclinação e não uniformidade dos pinos de alumínio (detalhe dos pinos à direita)

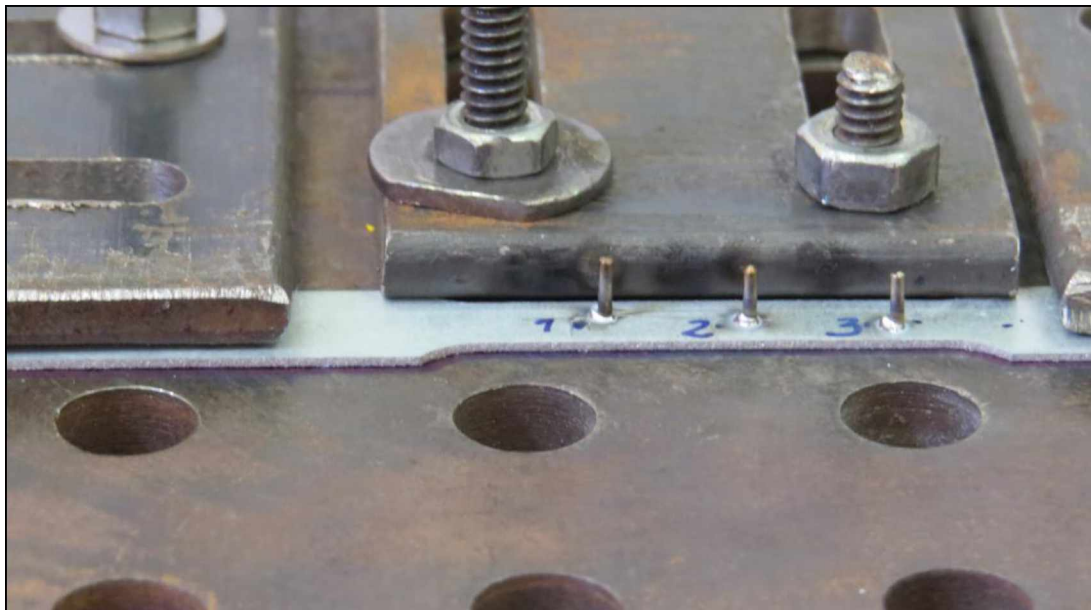


Figura 4.16 - Uniformidade dos pinos de aço carbono

A Tabela 4.4 apresenta os parâmetros utilizados na deposição dos pinos e os respectivos tempos de solidificação e aquecimento resultantes. Estes tempos foram medidos para os três pinos depositados em cada material através dos oscilogramas de corrente e tensão obtidos.

Tabela 4.4 - Parâmetros de deposição dos pinos adotados e tempos de solidificação (t_{solpp}) e aquecimento (t_{aq}) resultantes

| Teste | Material | Parâmetros Gráficos | | | |
|-------|-----------------|---------------------|-----------|------------------|---------------|
| | | A. Adaptation | Ball/Cyl. | t_{solpp} (ms) | t_{aq} (ms) |
| 1 | Aço Carbono | -30 | -2,4 | 25±12 | 398±24 |
| 2 | Aço Carbono | 30 | -1,8 | 681± 38 | 416±25 |
| 3 | Aço Carbono | -30 | -1,9 | 25±16 | 413±25 |
| 4 | Aço Carbono | 30 | -0,9 | 734± 39 | 441±28 |
| 5 | Aço Galvanizado | -30 | -2,7 | 25±10 | 390±20 |
| 6 | Aço Galvanizado | 30 | -2,7 | 680± 35 | 388±18 |
| 7 | Aço Galvanizado | -30 | -2,9 | 25±14 | 385±18 |
| 8 | Aço Galvanizado | 30 | -2,2 | 680± 35 | 404±22 |
| 9 | Alumínio | -30 | 9,3 | 25±15 | 740±26 |
| 10 | Alumínio | 30 | 9,6 | 680±34 | 740±32 |
| 11 | Alumínio | -30 | 9,9 | 25±11 | 750±35 |
| 12 | Alumínio | 30 | 9,7 | 681±38 | 445±25 |

Nos gráficos das Figuras 4.17, 4.18 e 4.19 pode-se observar a variação do tempo de solidificação do pino para os três materiais. Percebe-se, tanto para os pinos em chapa de aço ao carbono quanto para os feitos em chapa de aço galvanizado, que para o pino menor o tempo de solidificação foi de aproximadamente 25 ms e para o pino maior de 680 ms, portanto para a faixa estudada pode-se afirmar que tem relação com a altura do pino. Os pinos de alumínio não mostraram variação nestes tempos em função da regulagem para pinos curtos e longos. Nota-se também que o fato de mudar a espessura da chapa de 0,5 para 1,0 mm, não altera os valores dos tempos de solidificação. Provavelmente, ao se fazer o procedimento de “equilíbrio” antes da deposição dos pinos em diferentes condições, a fonte deve se autorregular para formar pinos adequados independentemente da espessura da chapa.

Pode-se dizer que o tempo de aquecimento dos pinos no geral não sofre variação pelo aumento da espessura de chapa de 0,5 para 1,0 mm e pela altura dos pinos. Comparando as condições com chapas de aço carbono e galvanizado não houve variação significativa deste tempo, indicando, pelo menos para a faixa de parâmetros testadas, que a ruptura dos pinos de aço durante o teste de tração realizado no Capítulo VI, não foi influenciada pelo material da chapa superficialmente diferente. Para os pinos de alumínio houve um aumento geral do tempo de aquecimento em relação aos pinos de aço, indicando que os pinos e

chapas de alumínio precisam de mais tempo para poderem ficar mais dúcteis e depois rompidos por tração, indicando um comportamento diferenciado para este material, talvez pela condutividade térmica (perda de calor) mais elevada.

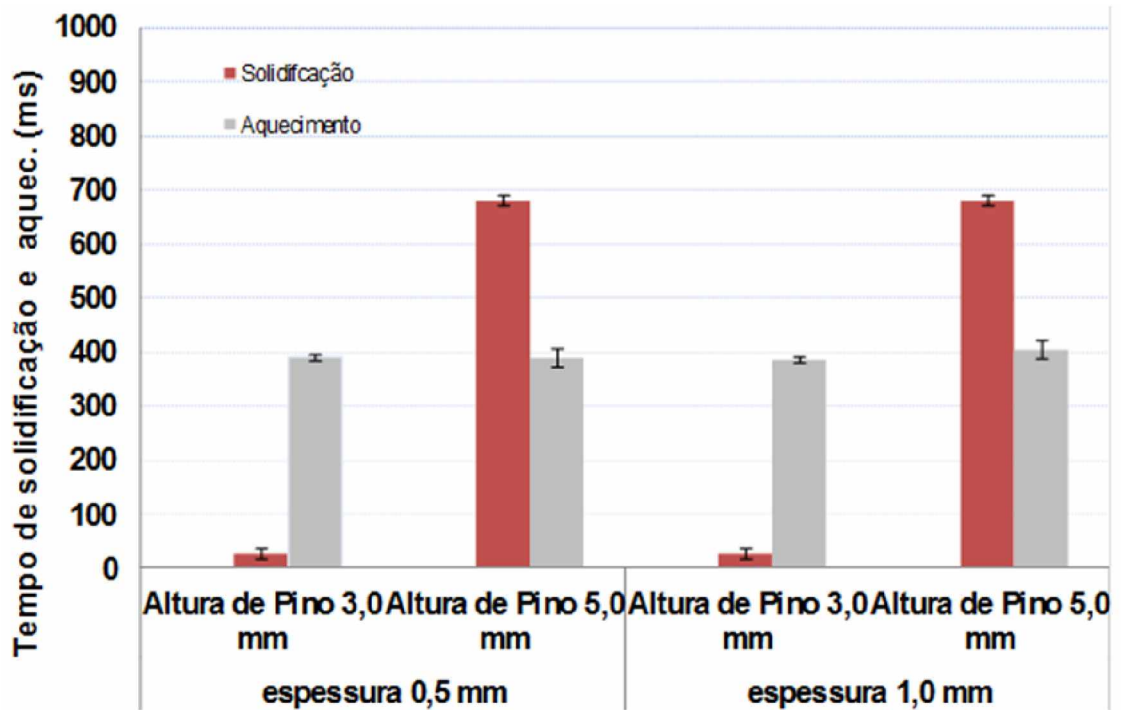


Figura 4.17 - Tempo de solidificação e aquecimento para pinos em chapa de aço carbono

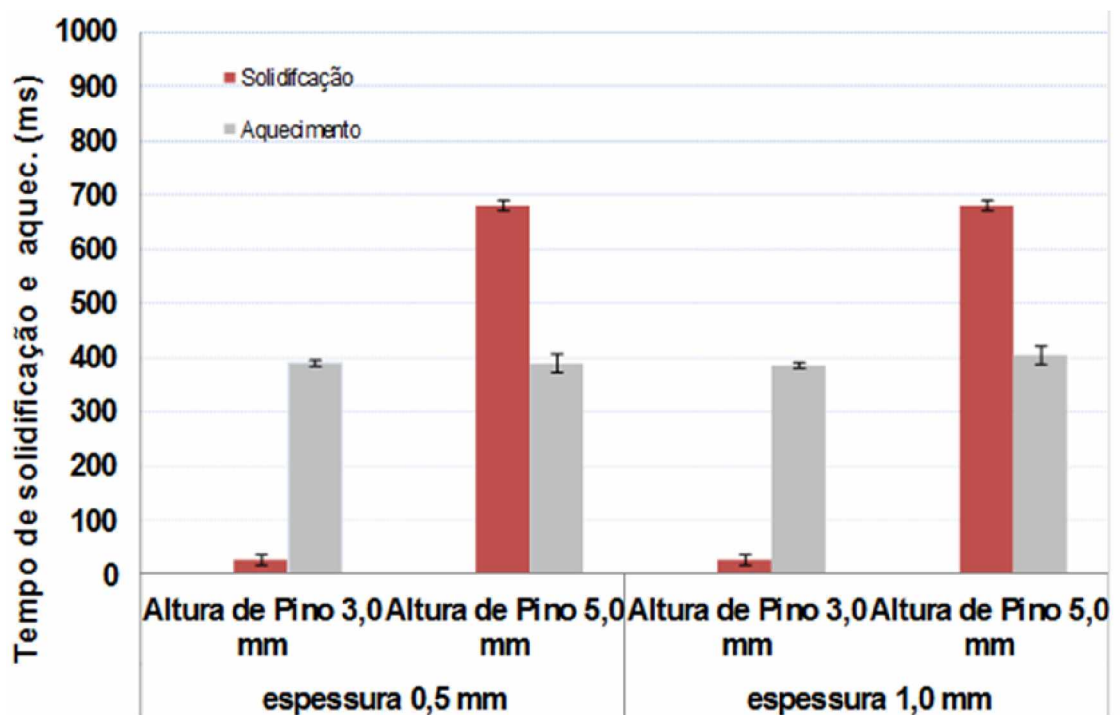


Figura 4.18 - Tempo de solidificação e aquecimento para pinos em chapa de aço galvanizado

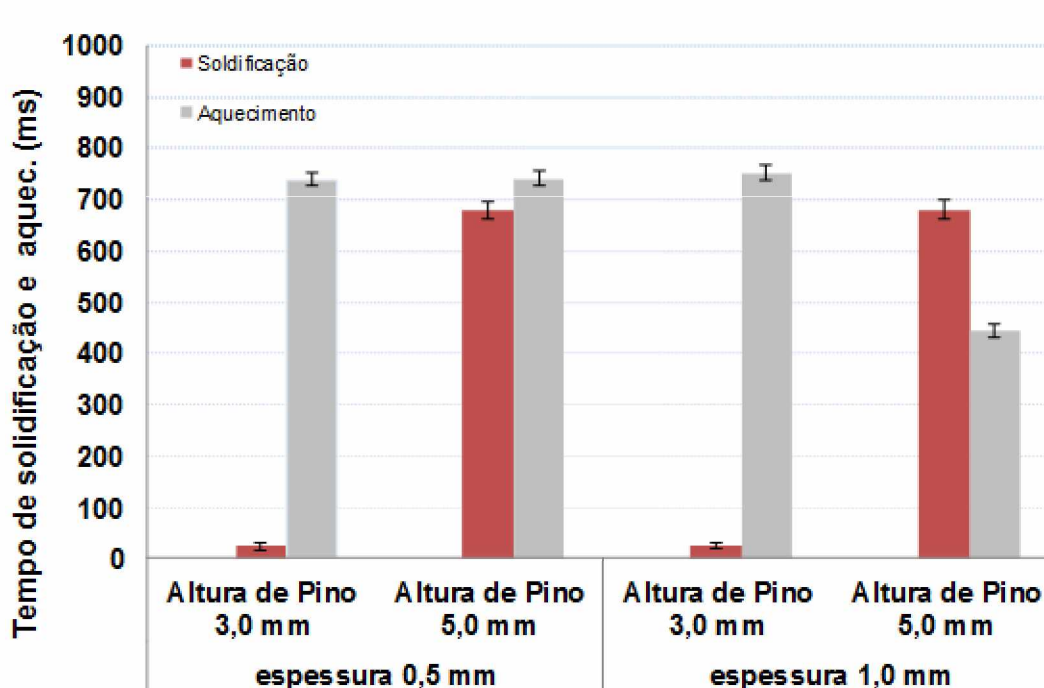


Figura 4.19 - Tempo de solidificação e aquecimento para pinos em chapa de alumínio

Para cada combinação de parâmetros mediu-se a altura dos pinos (desprezando-se a inclinação quando presente) com um paquímetro calibrado com faixa nominal de 150 mm e resolução 0,05 mm. Os resultados de tais medições encontram-se na Tabela 4.5. A Figura 4.20 compila os resultados em forma de gráfico. Nota-se que altura dos pinos se aproximou dos 3 e 5 mm almeçados, com exceção dos pinos de alumínio que ficaram com cerca de 7 mm em todas as condições. Ao que parece o arame de alumínio é muito dúctil e acaba sendo alongado antes da ruptura, formado então pinos mais longos. Esta ocorrência deve ser alvo de melhor investigação no futuro.

Tabela 4.5 - Resultados das medidas geométricas dos pinos

| Teste | Material | Espessura da chapa (mm) | Altura do pino resultante (mm) |
|-------|-----------------|-------------------------|--------------------------------|
| 1 | Aço Carbono | 0,50 | 2,81± 0,24 |
| 2 | Aço Carbono | 0,50 | 4,26± 0,38 |
| | | | |
| 3 | Aço Carbono | 1,00 | 2,86 ± 0,23 |
| 4 | Aço Carbono | 1,00 | 4,22 ± 0,32 |
| | | | |
| 5 | Aço Galvanizado | 0,50 | 2,60 ± 0,21 |
| 6 | Aço Galvanizado | 0,50 | 4,11± 0,34 |

| Teste | Material | Espessura da chapa (mm) | Altura do pino resultante (mm) |
|-------|-----------------|-------------------------|--------------------------------|
| 7 | Aço Galvanizado | 1,00 | 2,92 ± 0,25 |
| 8 | Aço Galvanizado | 1,00 | 4,48 ± 0,38 |
| 9 | Alumínio | 0,50 | 7,08 ± 0,45 |
| 10 | Alumínio | 0,50 | 7,42 ± 0,47 |
| 11 | Alumínio | 1,00 | 7,28 ± 0,40 |
| 12 | Alumínio | 1,00 | 7,48 ± 0,44 |

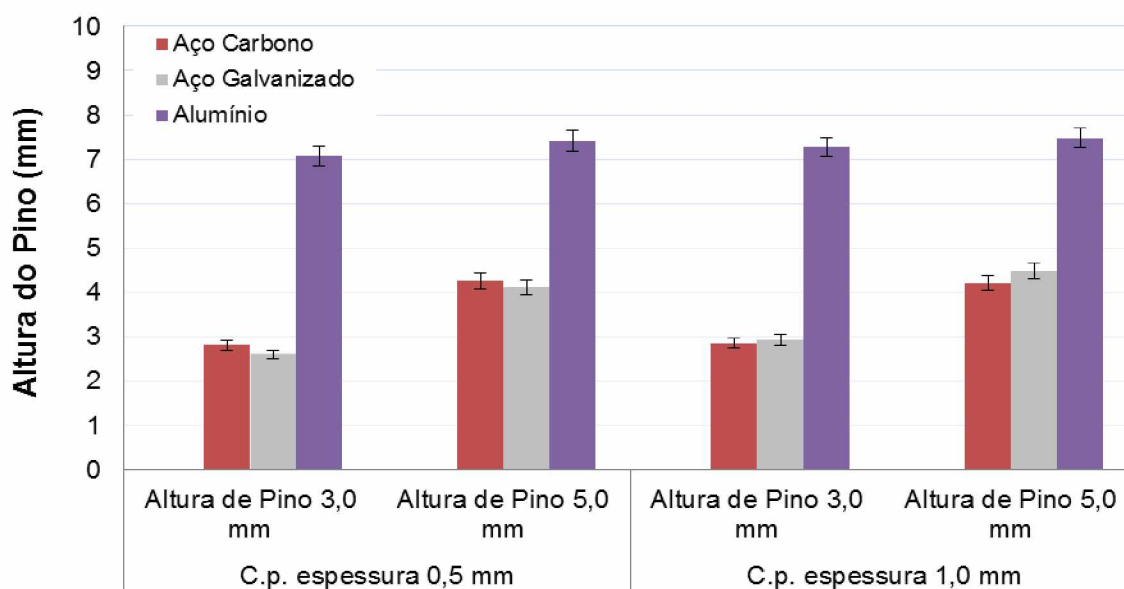


Figura 4.20 - Altura dos pinos para as combinações testadas

De maneira a verificar se existem diferenças de energia (calor) imposta sobre as chapas em cada uma das combinações, pelos dados de corrente e tensão adquiridos fez-se o cálculo do que se chamou de potência de deposição. Segundo Nascimento *et al.* (2007), existe divergência entre diversos autores na literatura especializada sobre o método a ser utilizado para o cálculo da potência do arco. Os métodos mais comuns são o de potência média aritmética, que é calculado através do produto dos valores médios de tensão e corrente, o da potência eficaz que é o produto dos valores eficazes da corrente e tensão e o método da potência instantânea que é a média aritmética da multiplicação da tensão pela corrente feita pontualmente. Adotando-se esse último método, considerado mais adequado quando os sinais de corrente e tensão variam muito, confeccionou-se os gráficos de potência (sinal de corrente multiplicado pelo sinal de tensão).

As Figuras 4.21 e 4.22 exibem os sinais de tensão, corrente e potência do ciclo de

deposição de três pinos na chapa de aço carbono de espessura 1,0 mm e respectivamente de alturas aproximadas de 5,0 e 3,0 mm. Pode-se considerar que para as duas alturas de pinos testadas na chapa de 1,0 mm não houve diferença no valor da potência de pico. Nota-se que o tempo de solidificação foi claramente diferente ao se mudar a altura dos pinos (em média 734 ms para o pino maior e 25 ms para o menor). Como pode-se observar a potência parece ser significativa nas regiões de arco aberto (parte da fase 1) e de aquecimento do pino (fase 3).

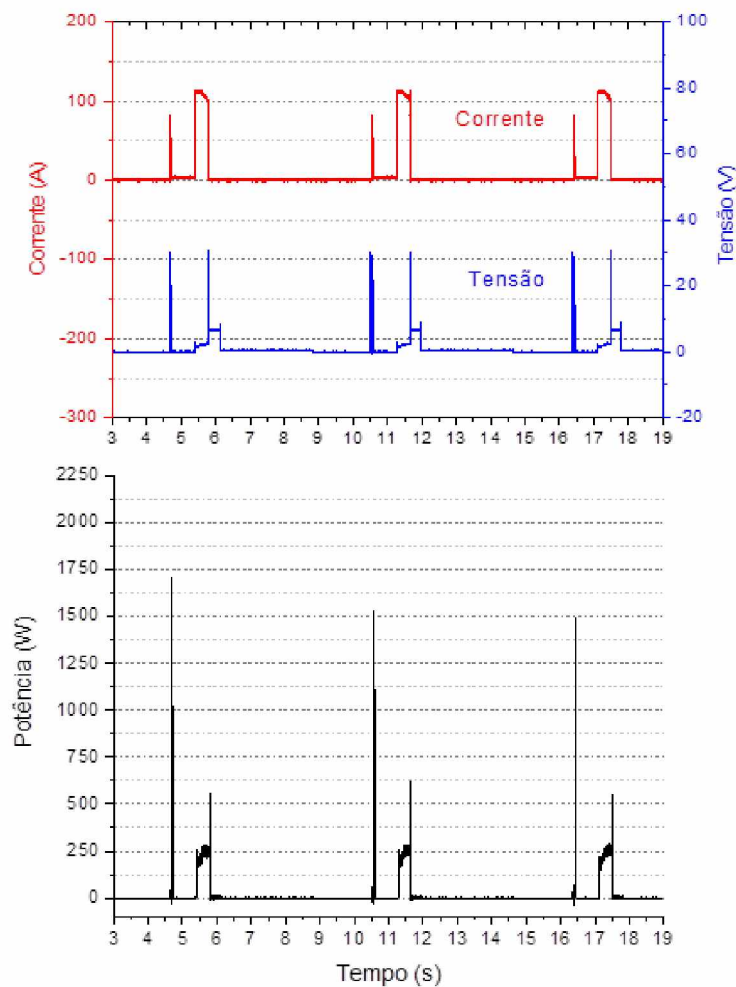


Figura 4.21 - Oscilogramas de corrente, tensão e potência elétrica para chapa de aço carbono com espessura de 1,0 mm e altura dos pinos de 5,0 mm

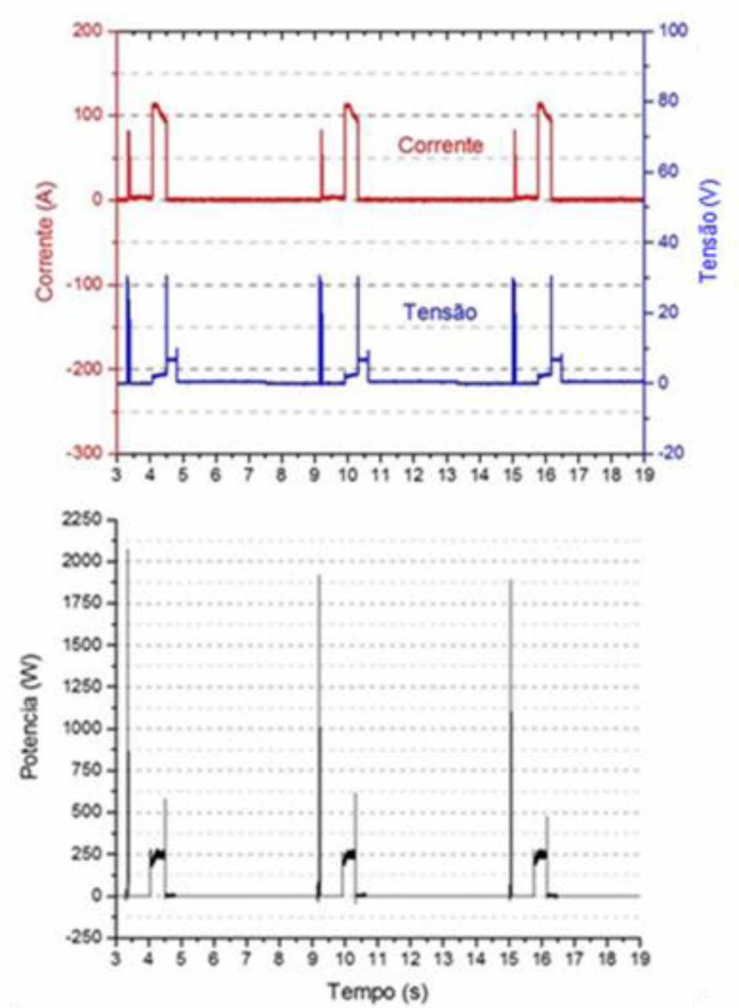


Figura 4.22 - Oscilogramas de corrente, tensão e potência elétrica para chapa de aço carbono com espessura de 1,0 mm e altura dos pinos de 3,0 mm

As Figuras 4.23 e 4.24 apresentam os oscilogramas de tensão, corrente e potência resultante do ciclo de deposição de três pinos na chapa de aço carbono agora com espessura de 0,5 mm e também com pinos de 1,0 mm de diâmetro e com alturas aproximadas respectivamente de 5,0 e 3,0 mm. Em relação às curvas para chapas de aço carbono de 1,0 mm, pode-se considerar que os valores de tensão e corrente se mantiveram inalterados mesmo com a mudança da altura do pino de 3,0 para 5,0 mm. Comparado apenas as situações de chapas com 0,5 mm de espessura, a única alteração foi no tempo de solidificação, com os valores de 681 e 25 ms para os pinos de 5,0 e 3,0 mm respectivamente. Mais uma vez, o sinal de potência aparece com níveis destacados para os tempos de arco aberto (parte da fase 1) e nos tempos de aquecimento dos pinos (fase 3).

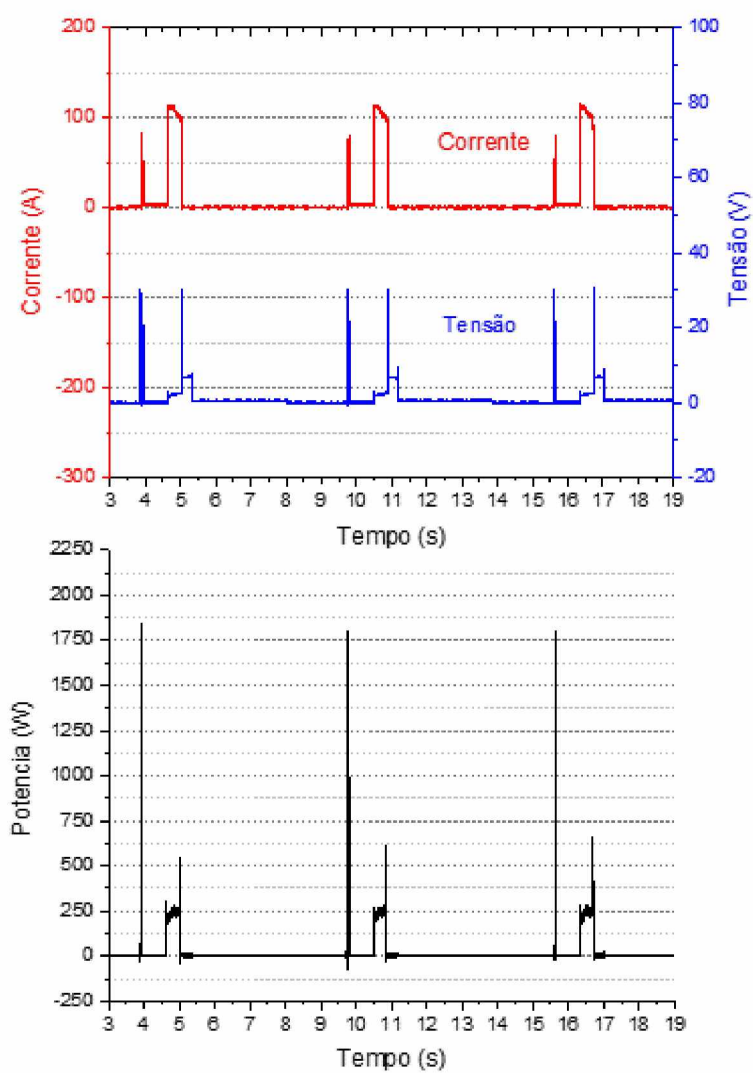


Figura 4.23 - Oscilogramas de corrente, tensão e potência elétrica para chapa de aço carbono com espessura de 0,5 mm e altura dos pinos de 5,0 mm

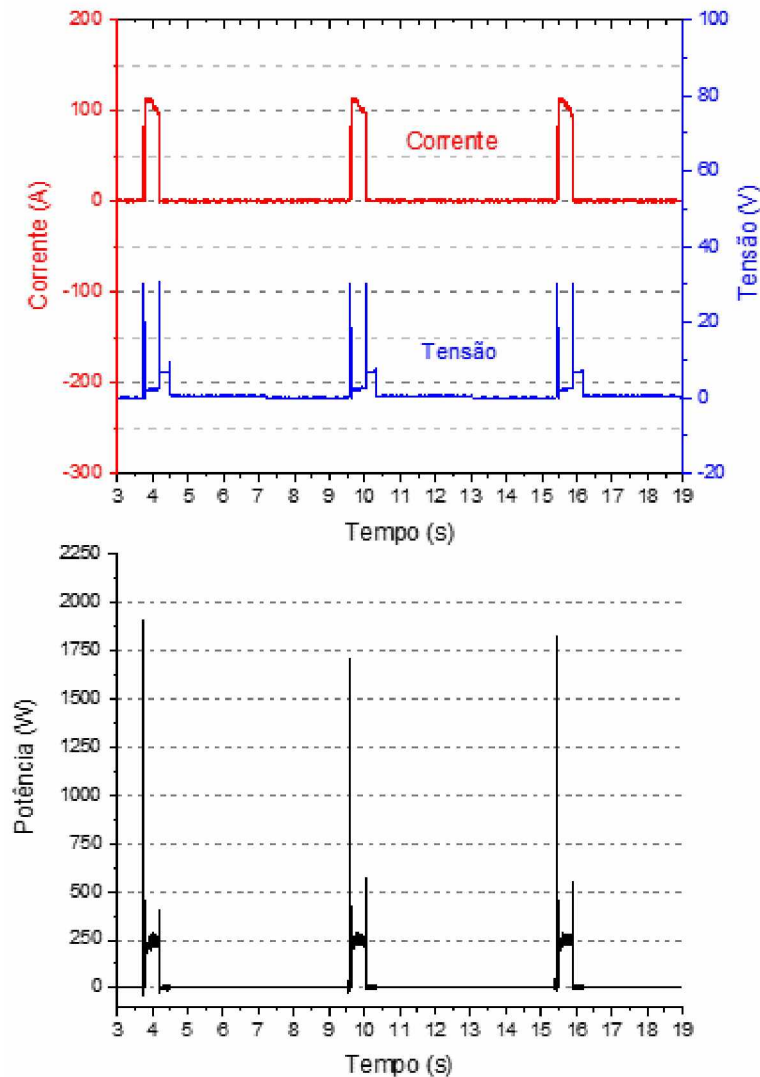


Figura 4.24 - Oscilogramas de corrente, tensão e potência elétrica para chapa de aço carbono com espessura de 0,5 mm e altura dos pinos de 3,0 mm

As Figuras 4.25 e 4.26 apresentam os sinais de tensão, corrente e potência do ciclo de deposição de três pinos de 1,0 mm de diâmetro em chapas de aço galvanizado com 1,0 mm de espessura e com altura de pinos aproximada de 5,0 e 3,0 mm respectivamente. Nas duas alturas de pino obteve-se uma potência de pico menor do que para as chapas de aço carbono de mesma espessura. Isso pode estar relacionado a tensão de abertura de arco e mesmo a auto regulação da máquina devido ao procedimento de “equilibracão”; as chapas de aço galvanizado certamente têm resistividade diferentes das de aço carbono. Como nos experimentos anteriores, também se observou a diferença no tempo de solidificação ao se mudar de pinos de 5 mm (681 ms) para pinos de 3 mm de altura (25 ms). Mais uma vez, o sinal de potência aparece com níveis destacados para os tempos de arco aberto (parte da fase 1) e nos tempos de aquecimento dos pinos (fase 3).

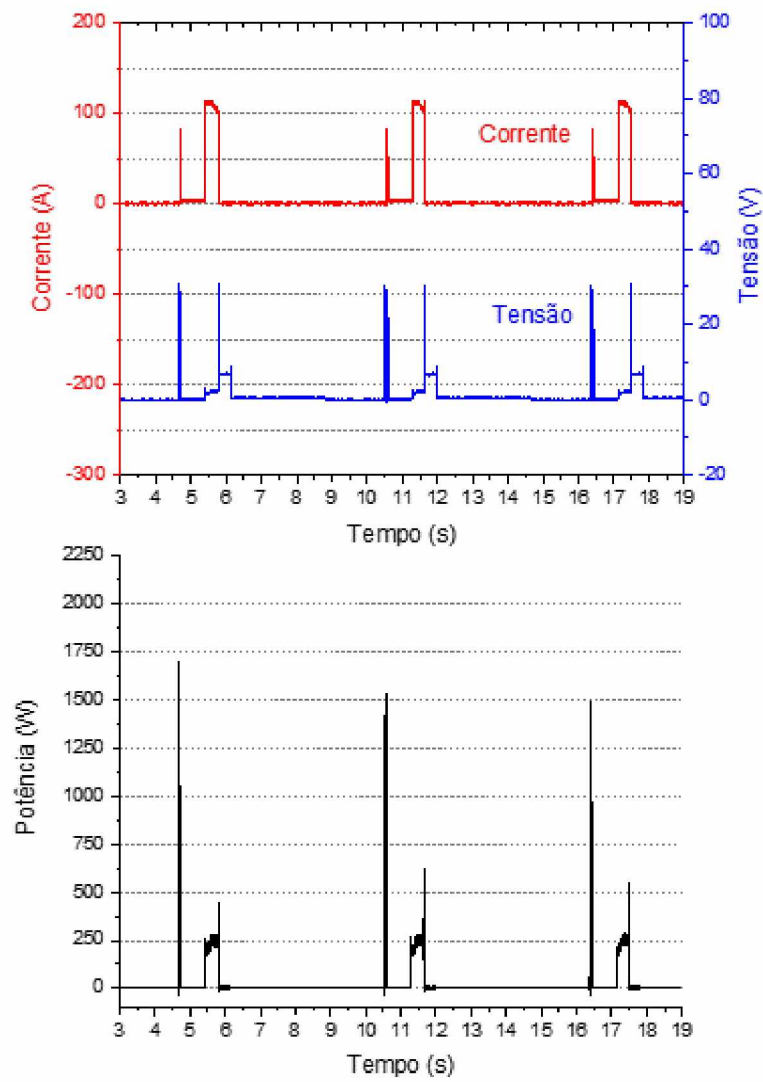


Figura 4.25 - Oscilogramas de corrente, tensão e potência elétrica para chapa de aço galvanizado com espessura de 1,0 mm e altura dos pinos de 5,0 mm

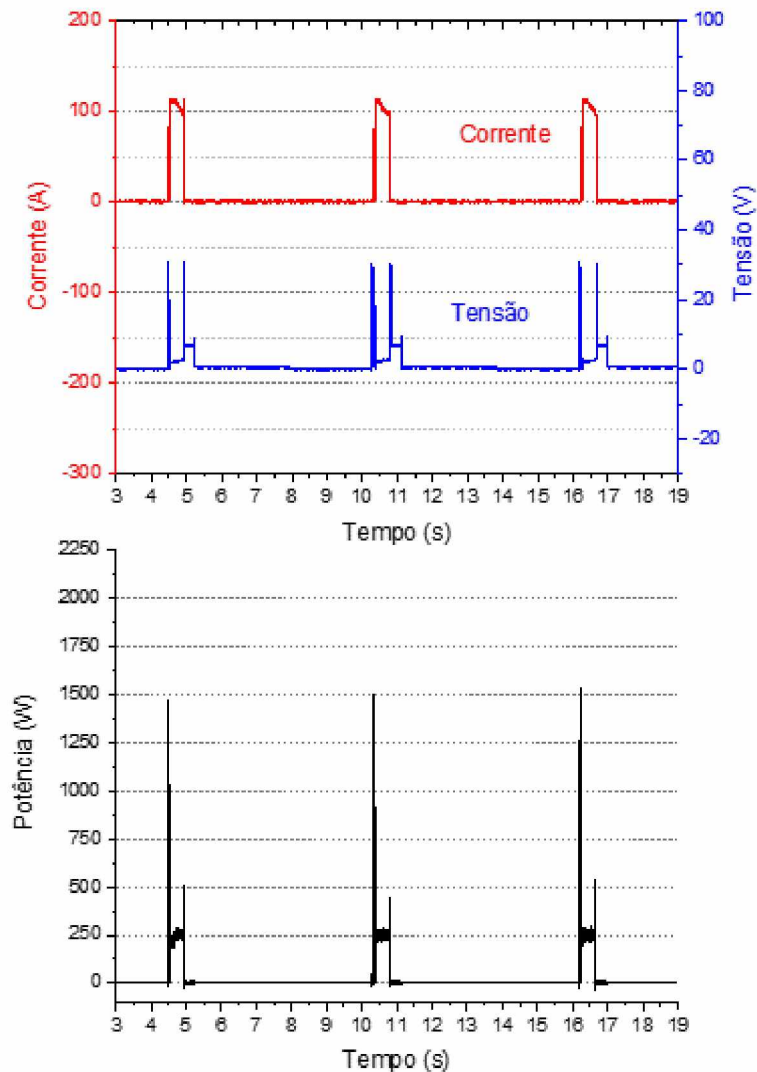


Figura 4.26 - Oscilogramas de corrente, tensão e potência elétrica para chapa de aço galvanizado com espessura de 1,0 mm e altura dos pinos de 3,0 mm

As Figuras 4.27 e 4.28 apresentam os sinais de tensão, corrente e potência do ciclo de deposição de três pinos em chapas de aço galvanizado com 0,5 mm de espessura e uma altura de pinos aproximada de 5,0 e 3 mm respectivamente. Assim como nos sinais anteriores é possível notar o tempo de solidificação mais curto nos casos com pinos menores. Mais uma vez os níveis de potência elevados ocorreram no tempo de arco aberto (parte da fase 1) e no tempo de aquecimento dos pinos (fase 3).

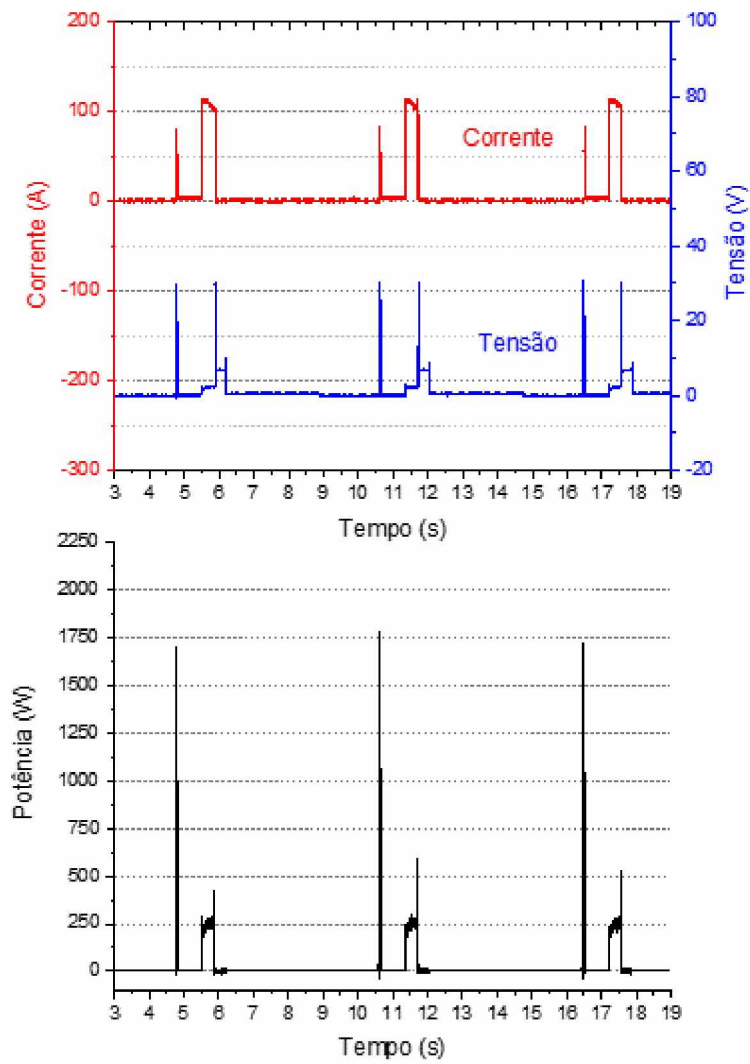


Figura 4.27 - Oscilogramas de corrente, tensão e potência elétrica para chapa de aço galvanizado com espessura de 0,5 mm e altura dos pinos de 5,0 mm

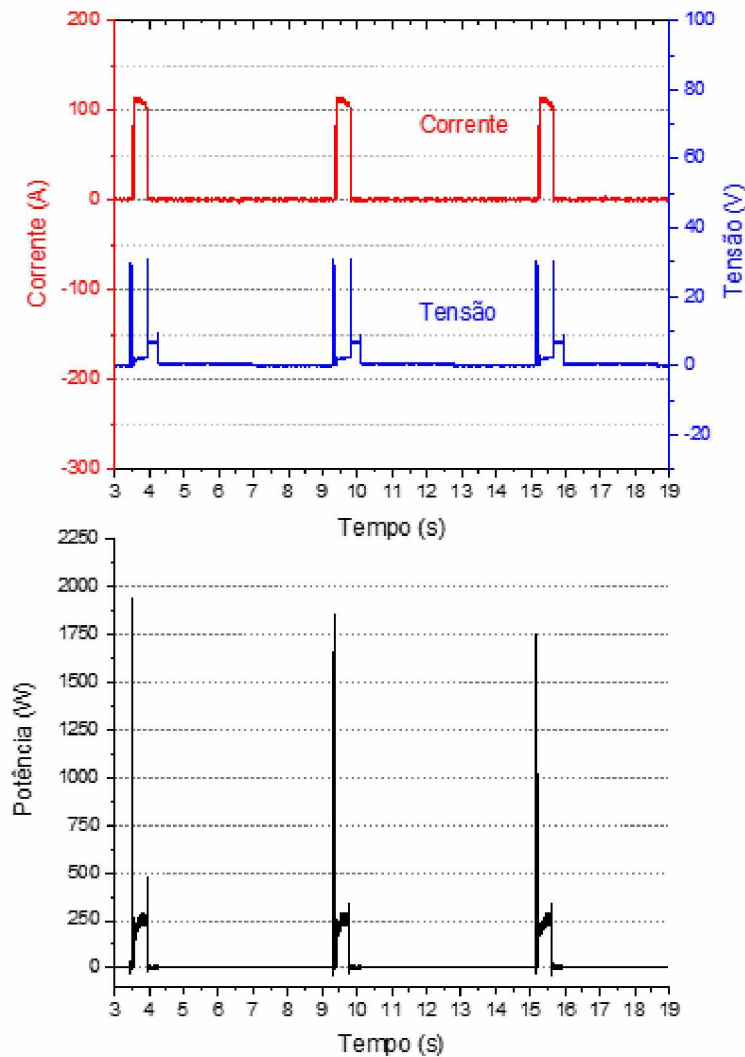


Figura 4.28 - Oscilogramas de corrente, tensão e potência elétrica para chapa de aço galvanizado com espessura de 0,5 mm e altura dos pinos de 3,0 mm

As Figuras 4.29 e 4.30 apresentam os sinais de tensão, corrente e potência do ciclo de deposição de três pinos em chapas de alumínio com 1,0 mm de espessura e com altura aproximada de 5,0 e 3 mm respectivamente. O tempo de solidificação mais uma vez foi maior para pino com altura maior e as regiões de elevado nível de potência se mantiveram. Observou-se uma pequena variação na potência de pico (região de arco aberto) do pino de 5,0 para 3,0 mm, mas destaca-se o menor patamar de potência no tempo de aquecimento dos pinos em relação a todos os casos com chapas de aço carbono e galvanizado.

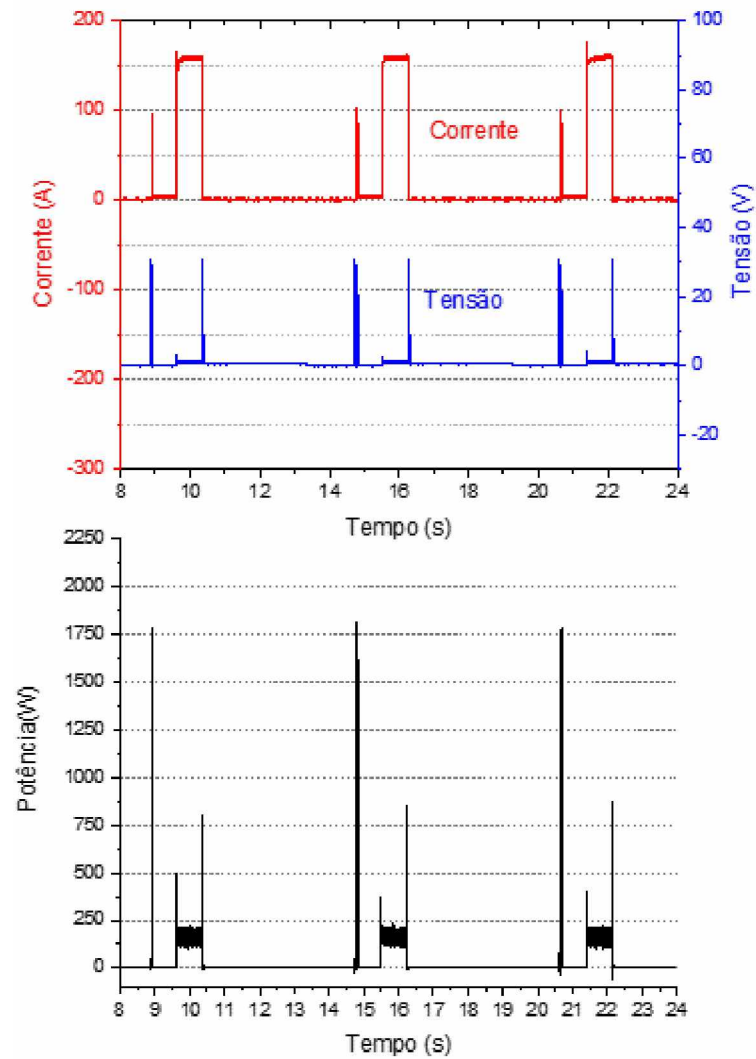


Figura 4.29 - Oscilogramas de corrente, tensão e potência elétrica para chapa de alumínio com espessura de 1,0 mm e altura dos pinos de 5,0 mm

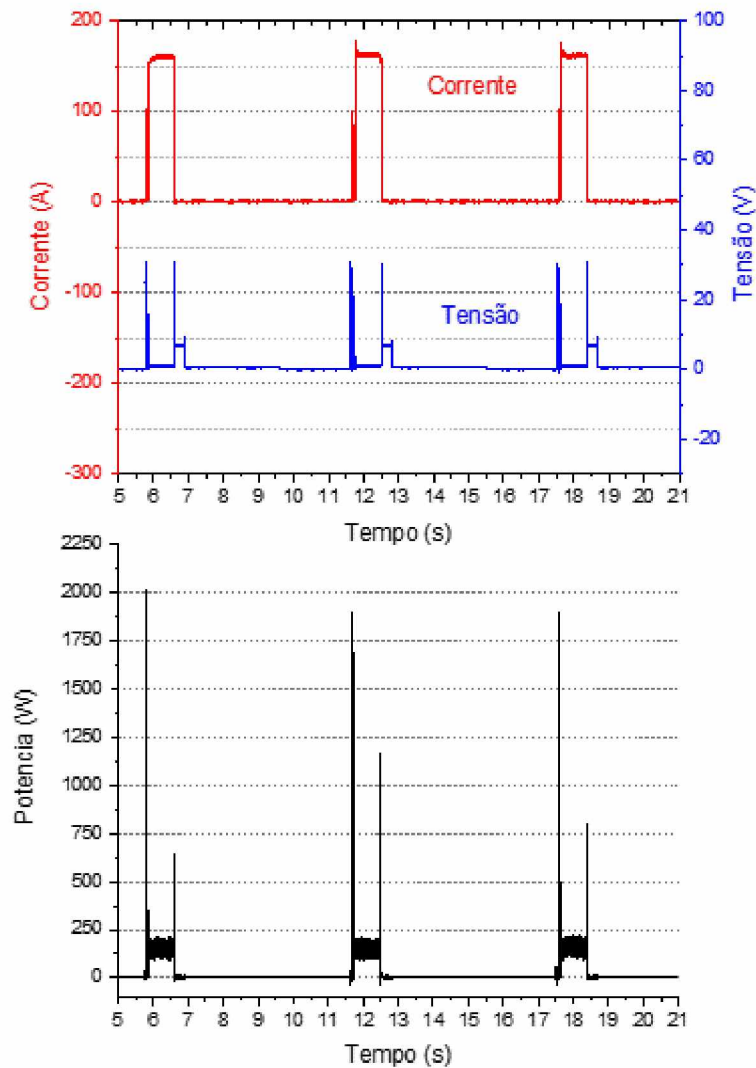


Figura 4.30 - Oscilogramas de corrente, tensão e potência elétrica para chapa de alumínio com espessura de 1,0 mm e altura dos pinos de 3,0 mm

Por fim, as Figuras 4.31 e 4.32 apresentam os sinais de tensão, corrente e potência do ciclo de deposição de três pinos em chapas de alumínio com 0,5 mm de espessura e com alturas aproximadas de 5,0 e 3,0 mm respectivamente. Os níveis dos picos de potência foram similares aos casos com chapas de alumínio com 1,0 mm de espessura. Nota-se também que os tempos de solidificação foram os mesmos dos casos com a chapa de 1 mm de espessura, com 681 ms e 25 ms para os pinos com altura de 5,0 de 3,0 mm respectivamente. O menor patamar de potência no tempo de aquecimento dos pinos em relação ao caso dos pinos de aço se confirmou.

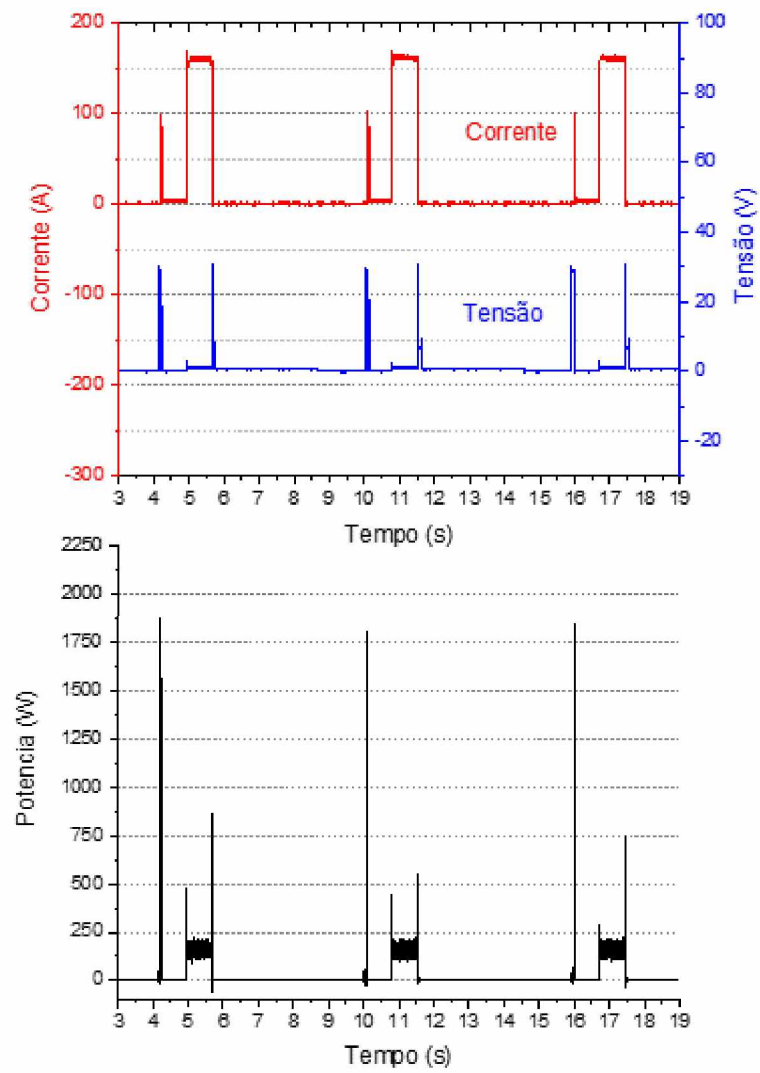


Figura 4.31 - Oscilogramas de corrente, tensão e potência elétrica para chapa de alumínio com espessura de 0,5 mm e altura dos pinos de 5,0 mm

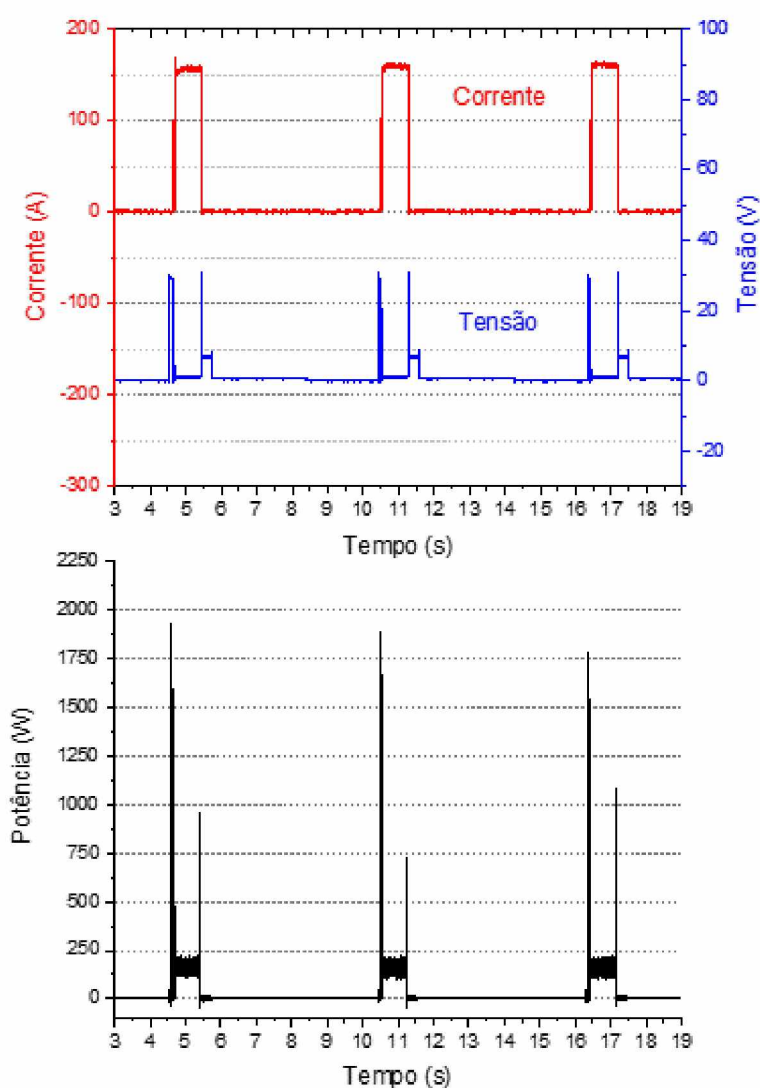


Figura 4.32 - Oscilogramas de corrente, tensão e potência elétrica para chapa de alumínio com espessura de 0,5 mm e altura dos pinos de 3,0 mm

A Tabela 4.6 congrega os resultados de média da potência média instantânea coletados nos períodos de tempo em que se tem níveis elevados de potência, ou seja, nos tempos de arco aberto e de aquecimento do pino, para cada combinação de parâmetros e situações avaliadas. As Figuras 4.33, 4.34 e 4.35 mostram os resultados em separado respectivamente para as chapas de aço carbono, aço galvanizado e alumínio. No geral, nota-se que as médias das potências são maiores para o tempo de arco aberto do que para o tempo de aquecimento dos pinos, mas seus patamares não mudam com a mudança de espessura das chapas e nem com a variação de altura dos pinos.

Percebe-se que a potência média durante o arco foi maior para o alumínio, seguido do aço carbono e galvanizado que foram, inclusive, similares. Esta variação de potência deve estar relacionada à “equilíbrio” feita para cada material e aos vapores metálicos que são formados em cada material que podem alterar a tensão de arco. No caso do alumínio a

própria composição do gás de proteção (somente argônio) certamente influenciou na tensão de arco e assim nas potências obtidas para este material.

Já para as médias de potência no tempo de aquecimento dos pinos, nota-se que os valores são similares nas condições com chapas de aço carbono e de aço galvanizado. No caso da chapa de alumínio as médias de potência nesse tempo são menores. Ao que parece, os pinos de alumínio demandam menor potência para serem aquecidos até o ponto de ficarem prontos (dúcteis o suficiente) para serem tracionados e rompidos. Além disso, pode ser que a própria condutividade térmica do alumínio (bem mais alta que dos aços) é levada em conta, mesmo que indiretamente, e ajude a aquecer mais facilmente os pinos neste caso.

Vale ressaltar que apesar da potência no tempo de arco ser maior que a potência no tempo de aquecimento do pino para todas combinações avaliadas, seu período de atuação é menor se comparado ao período de aquecimento. Essa combinação de potências e tempos de atuação pode afetar possíveis deformações resultantes nas chapas devido a deposição dos pinos, tema abordado a seguir.

Tabela 4.6 - Valores médios de potência média instantânea para as combinações avaliadas

| Material | | | | | | | | | | | | |
|---|-----------------|-------------|-------------|-------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | Aço Galvanizado | | | | Aço Carbonoo | | | | Alumínio | | | |
| Espessura da chapa (mm) | 0,5 | | 1,0 | | 0,5 | | 1,0 | | 1,0 | | 0,5 | |
| Altura do Pino (mm) | 3,0 | 5,0 | 3,0 | 5,0 | 3,0 | 5,0 | 3,0 | 5,0 | 3,0 | 5,0 | 3,0 | 5,0 |
| Média da Potência Média Instantânea (W) | | | | | | | | | | | | |
| Arco (parte da fase 1) | 863 ±25 | 846 ±18 | 756 ±12 | 748 ±15 | 852 ±32 | 787 ±15 | 814 ±28 | 870 ±35 | 917 ±38 | 935 ±39 | 914 ±35 | 958 ±37 |
| Aquecimento (fase 3) | 236 ±2,0 | 234 ±1,5 | 230 ±1,5 | 230 ±1,0 | 238 ±3,0 | 235 ±1,5 | 232 ±1,0 | 236 ±1,5 | 163 ±1,0 | 161 ±1,0 | 165 ±1,5 | 162 ±1,0 |

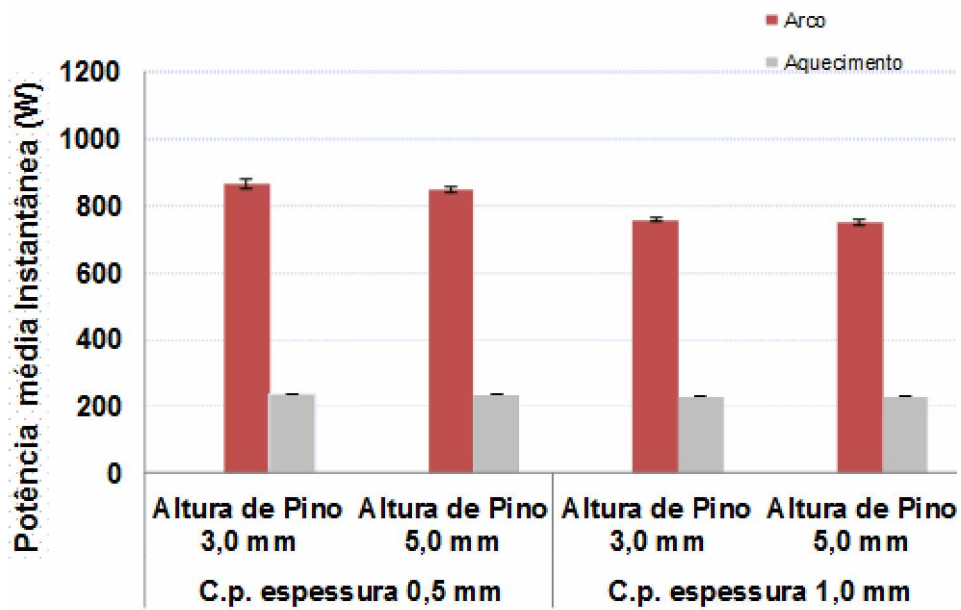


Figura 4.33 - Potência média instantânea nos tempos de arco aberto e de aquecimento dos pinos depositados em aço galvanizado

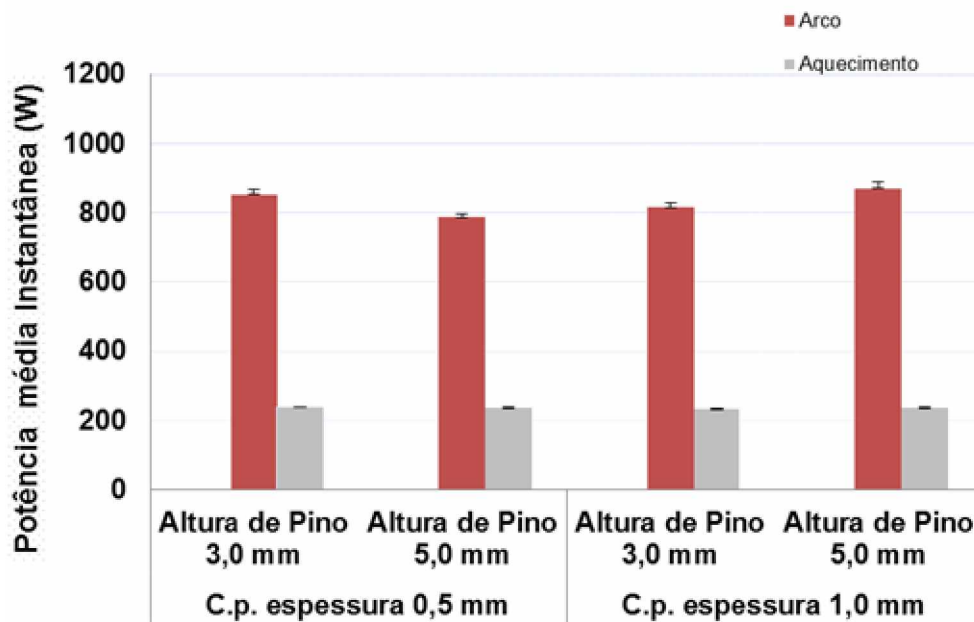


Figura 4.34 - Potência média instantânea nos tempos de arco aberto e de aquecimento dos pinos depositados em aço carbono

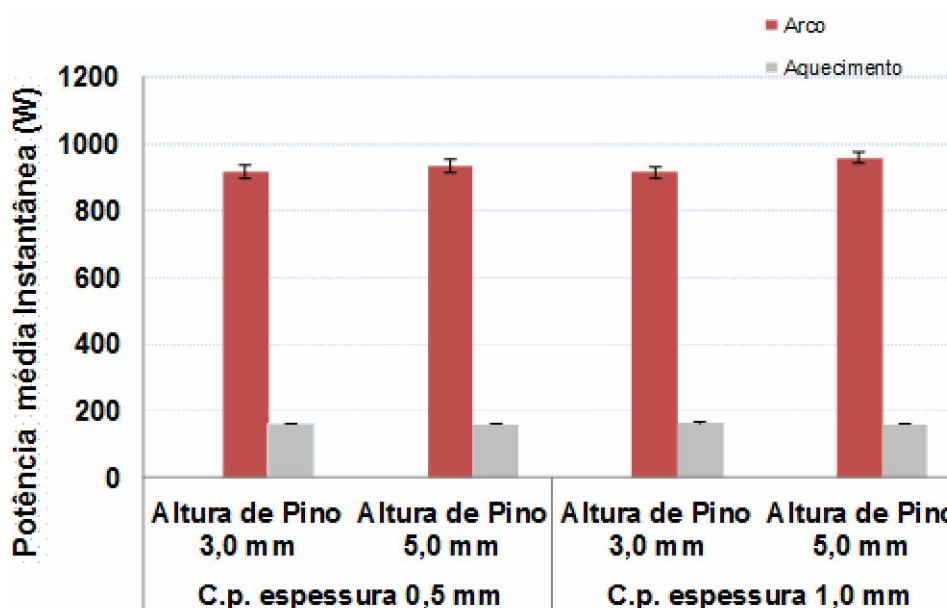


Figura 4.35 - Potência média instantânea nos tempos de arco aberto e de aquecimento dos pinos depositados em alumínio

4.3. Comentários gerais

Depois de avaliado o processo de deposição dos pinos em chapas de aço carbono, aço galvanizado e de alumínio, em diferentes espessuras e diferentes alturas de pinos, pelas imagens de alta velocidade e sinais elétricos, pode-se concluir, na faixa testada, que:

- Durante a execução dos experimentos, pode-se observar a boa repetitividade e uniformidade no processo de deposição dos pinos, reflexo da também consistente repetição dos sinais de corrente e tensão (e indiretamente do movimento de avanço e retração do arame) para cada condição analisada;
- Como os pinos depositados nas chapas de aço carbono e de aço galvanizado foram de aço carbono, os patamares e tempos dos sinais de corrente e tensão, e consequentemente de potência, foram muito similares nestes dois casos;
- A potência de deposição de pinos de alumínio nas chapas de alumínio foi diferenciada, com 200 W aproximadamente a mais no tempo de arco aberto e 100 W a menos no tempo de aquecimento dos pinos em relação aos casos dos pinos de aço;
- A variação de espessura das chapas dos três materiais avaliados não levou a modificações significativas nos patamares e tempos dos sinais de corrente e tensão, e consequentemente de potência de deposição;
- A variação da altura dos pinos levou a variações apenas nos tempos de solidificação dos pinos, com os maiores com mais tempo para se unir às chapas;

- Outro aspecto importante é a aparente boa soldagem dos pinos nas chapas de aço galvanizado, onde a camada de zinco parece não ter impedido a deposição;
- Houve uma deformação (alongamento e inclinação) nos pinos de alumínio, ao que parece pela elevada ductilidade deste material em relação ao aço.

CAPÍTULO V

Efeito da deposição dos pinos na distorção das chapas

O objetivo deste capítulo foi avaliar a influência do processo de deposição de pinos, para duas densidades de pinos diferentes, na possível distorção de chapas de aço carbono, aço galvanizado e de alumínio, todas em duas espessuras diferentes.

5.1. Metodologia

A metodologia foi definida em 5 Fases como descrito a seguir:

Fase I - Definição das variações

Ao todo foram executadas 24 combinações (3x2x2x2x1 variáveis), com 3 repetições em cada combinação, perfazendo um total de 72 corpos de prova, com 60 ou 120 pinos depositados dependendo da configuração de densidade de pinos (Tabela 5.1).

Tabela 5.1 - Combinações das condições e parâmetros utilizados na avaliação do efeito da deposição de pinos na distorção das chapas

| Variáveis | Variações | Número de variações |
|----------------------------------|---|---------------------|
| Material | Alumínio 5052, Aço 1020 Galvanizado, Aço Carbono 1020 | 3 |
| Espessura do material [mm] | 0,5 e 1,0 | 2 |
| Altura dos pinos [mm] | 3,0 e 5,0 | 2 |
| Geometria dos pinos | Cabeça cilíndrica | 1 |
| Densidade/Distribuição dos pinos | 60 e 120 | 2 |

Fase II - Preparação dos corpos de prova

O corte dos CPs foi feito em guilhotina no próprio fornecedor das chapas, nas dimensões de 105 x 60 mm. Na superfície dos CPs traçou-se uma malha com um riscador mecânico resultando em um distanciamento na longitudinal e na transversa de 5,0 mm (Figura 5.1) com o objetivo de facilitar a identificação dos 49 pontos onde foram efetuadas as medições de distorção (Figura 5.2), garantindo que as mesmas fossem feitas na mesma posição antes e após a deposição dos pinos.

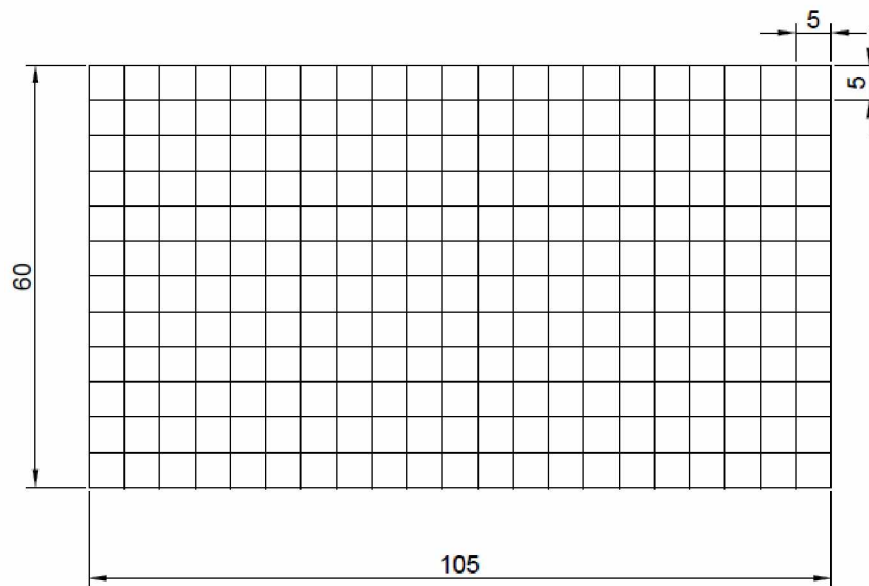


Figura 5.1 - Desenho da malha de referência traçada nos CP (dimensões em mm)

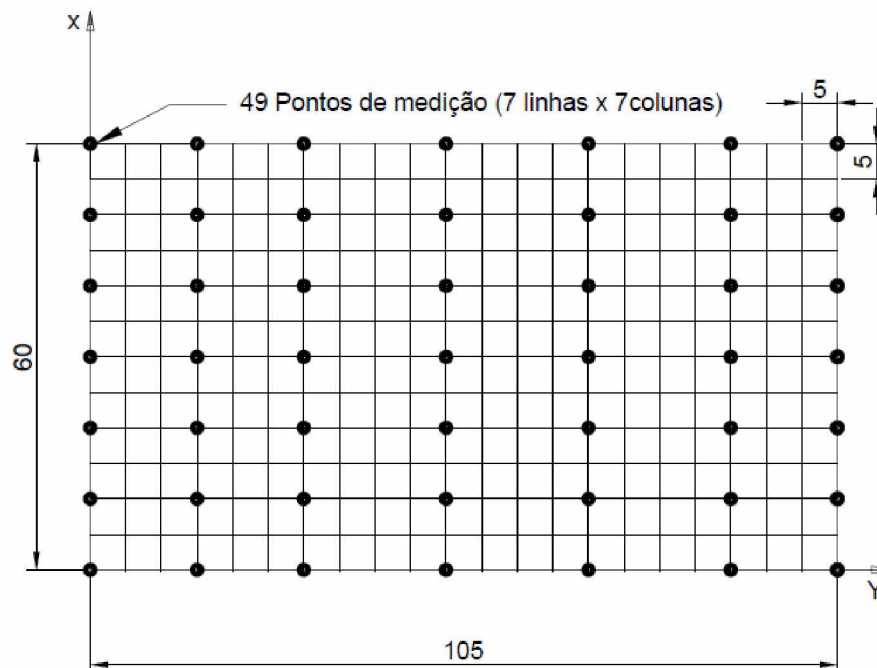


Figura 5.2 - Indicação dos 49 pontos de medição de distorção dos CPs (dimensões em mm)

Fase III - Medição da distorção dos CPs antes da deposição dos pinos

As medições de distorção de todos os CPs foram realizadas em máquina de medição de 3 coordenadas (Figura 3.6), antes da deposição dos pinos, registrando a deformação ocorrida devido ao corte na guilhotina.

Fase IV - Deposição dos pinos.

Para atender as duas distribuições para deposição dos pinos, utilizou-se o distanciamento (separação de pinos) na longitudinal e transversal de 10 mm para 60 pinos e de 10 mm na longitudinal e de 5 mm na transversal para 120 pinos, como ilustram respectivamente as Figuras 5.3 e 5.4. A sequência de deposição para a densidade de 60 e 120 pinos foi a mesma como representado na Figura 5.3.

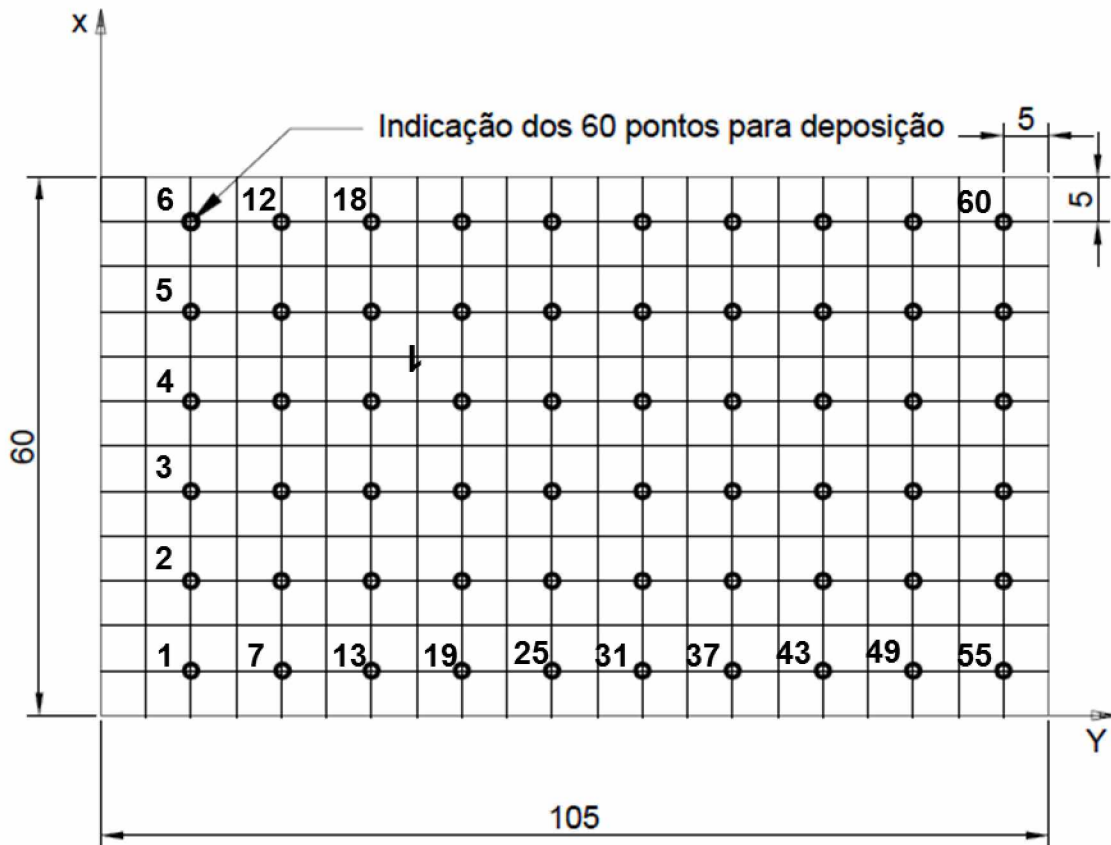


Figura 5.3 - Indicação dos 60 pontos para deposição dos pinos nos CPs (dimensões em mm) e sequência de deposição

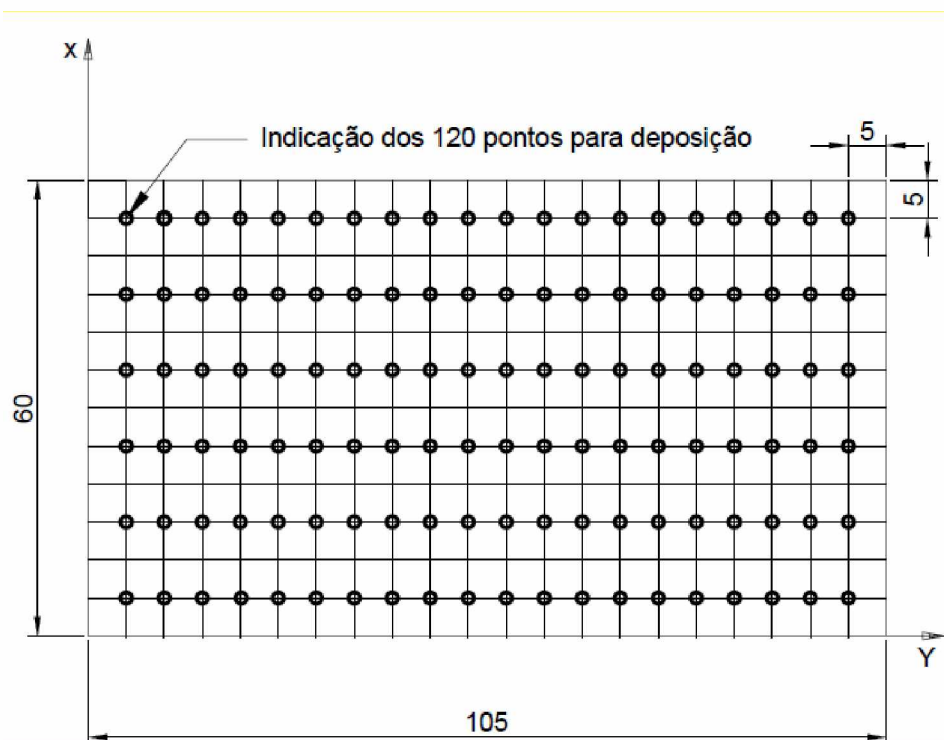


Figura 5.4 - Indicação dos 120 pontos para deposição de pinos nos CPs (dimensões em mm)

Para deposição dos pinos, utilizou-se os mesmos parâmetros do Capítulo IV, ou seja, -30 e +30 para o parâmetro “Altitude Adaptation” e 0 para o parâmetro “Ball/Cyl. Adaptation” (pino de cabeça cilíndrica). Como dito anteriormente, todas os pinos foram depositados com auxílio de um robô, sendo que o tempo médio de deposição entre pinos foi de aproximadamente 6,0 segundos tanto para pino com altura maior quanto para o de altura menor.

Pelo fato da preparação do equipamento de soldagem CMT ser diferente para aplicação do arame de alumínio em relação ao arame de aço, fez-se a deposição em duas etapas, como no Capítulo IV Fase III, sendo uma primeira com o aço (carbono e galvanizado) e uma segunda com o alumínio.

Etapa I) Deposição em aço carbono e aço galvanizado

Os CPs de aço carbono foram lixados com lixas de 220 e 600 mesh para retirar pontos superficiais de oxidação. Depois todos os CPs de aço, incluindo de aço galvanizado foram limpos com um pano embebido em álcool. No processo de deposição de pinos de aço, utilizou-se o mesmo procedimento do Capítulo IV Fase III, ou seja, mesmo equipamento CMT, mesmo programa, arame da classe AWS ER70S-6 de diâmetro nominal 1 mm e uma mistura de gás de proteção de Ar+10,7%CO₂ na vazão de 7 l/min, também aferida por um fluxômetro bibímetro calibrado, e com composição química verificada três

vezes antes de iniciar o processo através do analisador de gás (Oxybaby®). A DBCP (Distância Bico de Contato Peça) utilizada foi também de 10 mm. A modificação ocorreu na fixação dos CPs, como ilustra a Figura 5.5.

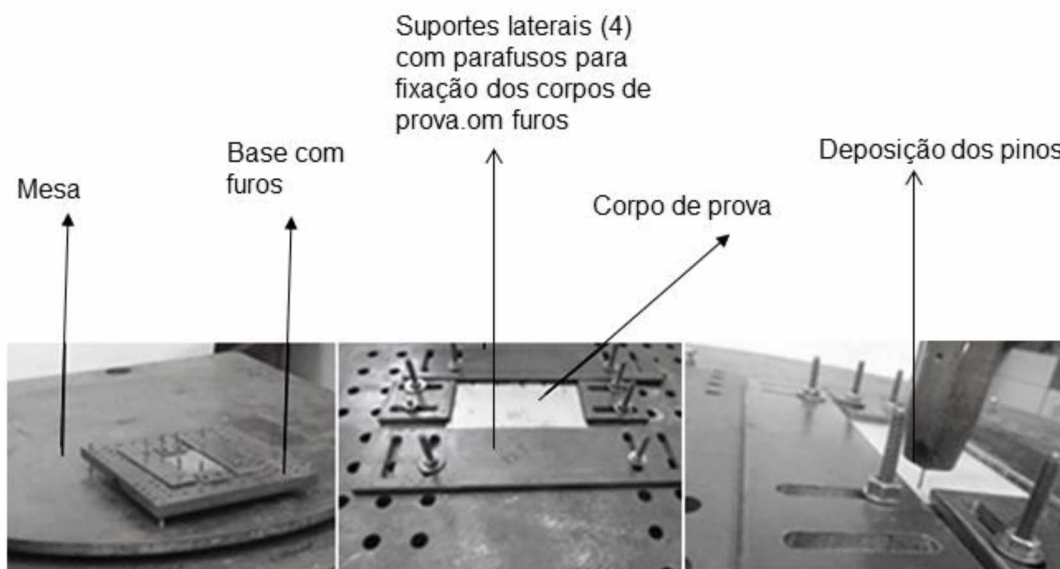


Figura 5.5 - Dispositivo para fixação dos corpos de prova

Etapa II) Deposição em alumínio

Os CPs de alumínio sofreram um processo de limpeza com um pano umedecido em álcool. No processo de deposição de pinos de alumínio, utilizou-se o mesmo procedimento do Capítulo IV, ou seja, mesmo equipamento CMT, o mesmo programa-sinérgico DB0875 para o material AISi5Pin, arame da classe AWS ER4043 de diâmetro nominal 1 mm e o Argônio como gás de proteção na vazão de 7 l/min, também aferida por um fluxômetro bibímetro calibrado. A DBCP (Distância Bico de Contato Peça) utilizada foi também de 10 mm. O suporte de fixação foi o mesmo utilizado para as chapas de aço Figura 5.5.

Fase V - Medição da distorção dos CPs após a deposição dos pinos

Nesta fase mediu-se a deformação de todos os CPs já com os pinos depositados. A diferença entre os valores de deformação aqui obtidos em cada ponto em relação aos obtidos nos mesmos pontos, mas antes da deposição dos pinos, foram considerados como medida de distorção (planicidade) das chapas causada pelo processo CMT PIN. Foi utilizada a mesma máquina de medir por coordenadas (Figura 3.6).

5.2. Resultados

A Tabela 5.2 relaciona o número de identificação dos CPs para cada combinação de condições e parâmetros avaliados. A Tabela 5.3 exemplifica a codificação adotada. As Tabelas de 5.4 até 5.9 indicam as diferenças encontradas entre os valores de deformação depois e antes da deposição dos pinos. Para todos os CPs decidiu-se tomar como representativo da deformação a altura dos pontos(direção Z) ao longo da direção longitudinal (eixo Y) centralizada no meio da direção transversal (eixo X), ilustrado na Figura 5.6, dando-se o nome de linha longitudinal central (LLC) para facilitar daqui em diante.

Tabela 5.2 - Número de identificação dos CPs para avaliação da distorção

| CPs | Material | Espessura (mm) | Quantidade de Pinos | Programa (Por referência na máquina) | Altura do Pino (mm) | Parâmetro "Altitude Adaptation" |
|-------------|-----------------|----------------|---------------------|--------------------------------------|---------------------|---------------------------------|
| 19,20 e 21 | Aço Galvanizado | 0,50 | 60 | 180 | 3,0 | -30 |
| 26, 27 e 28 | Aço Galvanizado | 0,50 | 60 | 181 | 5,0 | 30 |
| 31, 32 e 33 | Aço Galvanizado | 0,50 | 120 | 180 | 3,0 | -30 |
| 4, 29 e 30 | Aço Galvanizado | 0,50 | 120 | 181 | 5,0 | 30 |
| | | | | | | |
| 22, 35 e 39 | Aço Galvanizado | 1,00 | 60 | 180 | 3,0 | -30 |
| 24, 34 e 40 | Aço Galvanizado | 1,00 | 60 | 181 | 5,0 | 30 |
| 36, 37 e 38 | Aço Galvanizado | 1,00 | 120 | 180 | 3,0 | -30 |
| 1, 8 e 23 | Aço Galvanizado | 1,00 | 120 | 181 | 5,0 | 30 |
| | | | | | | |
| 7, 17 e 18 | Aço Carbono | 0,50 | 60 | 180 | 3,0 | -30 |
| 12, 13 e 14 | Aço Carbono | 0,50 | 60 | 181 | 5,0 | 30 |
| 9, 15 e 16 | Aço Carbono | 0,50 | 120 | 180 | 3,0 | -30 |
| 3,10 e 11 | Aço Carbono | 0,50 | 120 | 181 | 5,0 | 30 |
| | | | | | | |
| 43, 49 e 50 | Aço Carbono | 1,00 | 60 | 180 | 3,0 | -30 |
| 41, 42 e 44 | Aço Carbono | 1,00 | 60 | 181 | 5,0 | 30 |
| 25, 45 e 48 | Aço Carbono | 1,00 | 120 | 180 | 3,0 | -30 |
| 2, 46 e 47 | Aço Carbono | 1,00 | 120 | 181 | 5,0 | 30 |
| | | | | | | |

| CPs | Material | Espessura (mm) | Quantidade de Pinos | Programa (Por referência na máquina) | Altura do Pino (mm) | Parâmetro "Altitude Adaptation" |
|-------------|----------|----------------|---------------------|--------------------------------------|---------------------|---------------------------------|
| 68, 69 e 70 | Alumínio | 0,50 | 60 | 190 | 3,0 | -30 |
| 6, 71 e 72 | Alumínio | 0,50 | 60 | 191 | 5,0 | 30 |
| 65, 66 e 67 | Alumínio | 0,50 | 120 | 190 | 3,0 | -30 |
| 62,63 e 64 | Alumínio | 0,50 | 120 | 191 | 5,0 | 30 |
| | | | | | | |
| 54,55 e 61 | Alumínio | 1,00 | 60 | 190 | 3,0 | -30 |
| 51,52 e 53 | Alumínio | 1,00 | 60 | 191 | 5,0 | 30 |
| 56,57 e 58 | Alumínio | 1,00 | 120 | 190 | 3,0 | -30 |
| 5, 59 e 60 | Alumínio | 1,00 | 120 | 191 | 5,0 | 30 |

Tabela 5.3 - Codificação dos corpos de prova da Tabela 5.2

| Código MEAQ | Descrição |
|-------------|--------------------------------|
| AI 1360 | 60 Pinos com 3,0 mm de altura |
| AI 13120 | 120 Pinos com 3,0 mm de altura |
| AI 1560 | 60 Pinos com 5,0 mm de altura |
| AI 15120 | 120 Pinos com 5,0 mm de altura |

M- Material: AI - Alumínio, G - Aço Galvanizado, A - Aço Carbono;

E- Espessura: 0 - espessura de 0,5 mm e 1 - espessura de 1,0 mm;

A - Altura do pino: 3 - 3,0 mm de altura e 5 - 5,0 mm de altura;

Q - Quantidade de pinos: 60 ou 120.

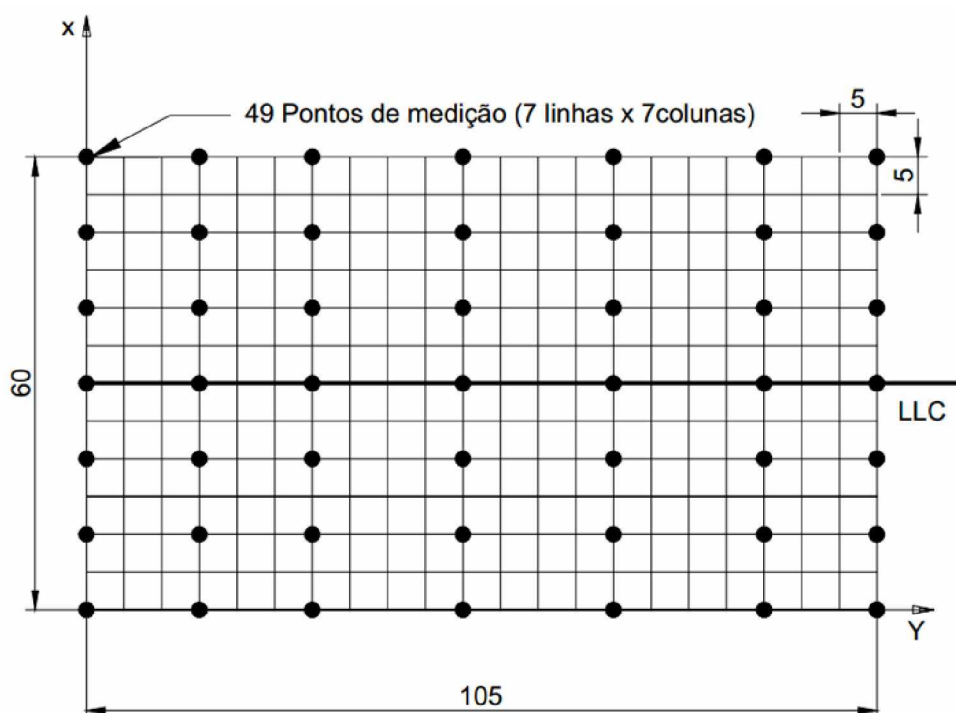


Figura 5.6 - Indicação da linha longitudinal central (LLC), (linha de medição) considerada para representação da deformação dos CPs (dimensões em mm)

Na Tabela 5.4 tem-se os valores encontrados para a deformação média final (medidas de depois menos de antes dos pinos) na linha longitudinal central, como indicado na Figura 5.6 dos CPs de alumínio com espessura de 1,0 mm. Na Figura 5.7 tem-se a representação gráfica da deformação média destes CPs. Nota-se que nestes casos a deformação dos CPs com 120 pinos foi em geral ligeiramente maior que a dos CPs com 60 pinos, talvez pelo maior calor aportado às chapas pelo maior número de pinos. Mas dentro da faixa estudada, a espessura das chapas e a altura dos pinos não parecem ter efeito significativo nessa deformação. Além disso, a deformação ficou mais concentrada na região central dos CPs (meio da linha longitudinal central).

Tabela 5.4 - Valores de deformação na linha longitudinal central dos CPs de alumínio com espessura de 1,0 mm

| CPs | 54/55/61 | 51/52/53 | 56/57/58 | 5/59/60 |
|-----------|----------|----------|----------|---------|
| Descrição | Al1360 | Al1560 | Al13120 | Al15120 |
| Y(mm) | Z(mm) | Z(mm) | Z(mm) | Z(mm) |
| 0 | 0,004 | 0,059 | 0,075 | 0,150 |
| 10 | 0,132 | 0,099 | 0,220 | 0,340 |
| 20 | 0,267 | 0,160 | 0,312 | 0,433 |
| 40 | 0,318 | 0,280 | 0,450 | 0,426 |
| 60 | 0,150 | 0,028 | 0,394 | 0,260 |
| 80 | 0,012 | -0,106 | 0,147 | 0,125 |
| 100 | -0,129 | -0,202 | -0,315 | -0,455 |

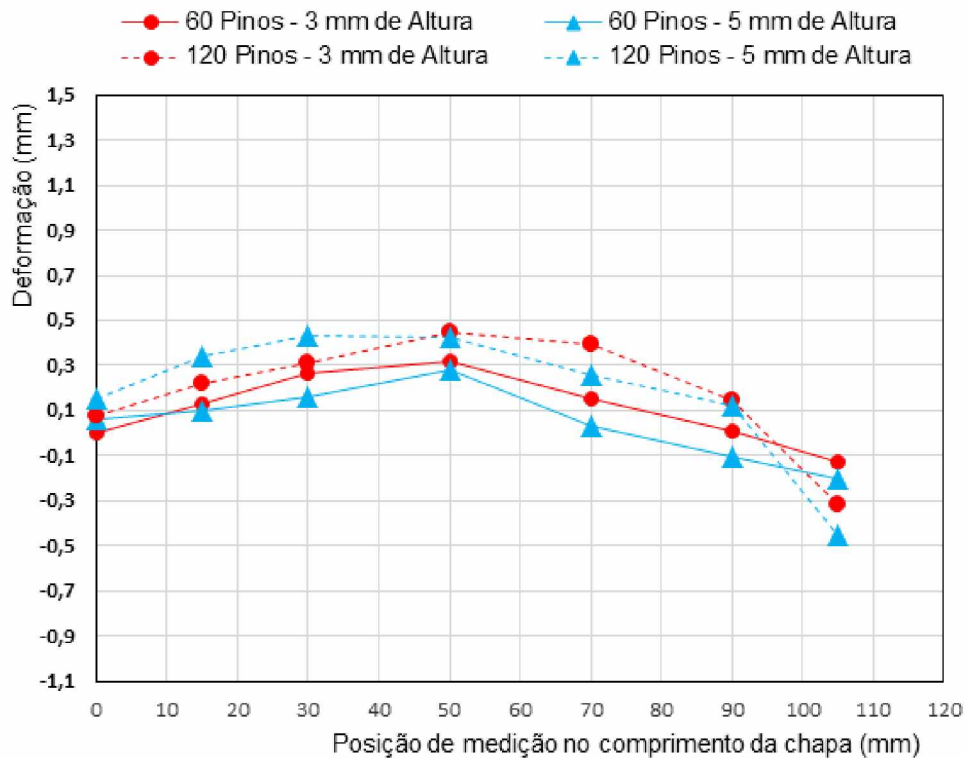


Figura 5.7 - Representação gráfica da deformação ao longo da linha longitudinal central dos CPs de alumínio com espessura de 1,0 mm

Na Tabela 5.5 tem-se os valores encontrados para a deformação média final na linha longitudinal central para os CPs de alumínio com espessura de 0,5 mm. Na Figura 5.8 tem-se a representação gráfica da deformação média destes CPs. Nestas condições com chapas de alumínio de 0,5 mm, os valores de deformação foram em geral maiores do que com as chapas de alumínio de 1,0 mm, provavelmente justamente pela diminuição da espessura e conseqüente menor rigidez e assim menor restrição à deformação. Destaca-se a deformação da condição com 120 pinos de 3 mm de altura que foi maior em relação às

outras. Novamente a deformação ficou mais concentrada na região central dos CPs (meio da linha longitudinal central).

Tabela 5.5 - Valores de deformação na linha longitudinal central dos CPs de alumínio com espessura de 0,5 mm

| CPs | 68/69/70 | 6/71/72 | 65/66/67 | 62/63/64 |
|-----------|----------|---------|----------|----------|
| Descrição | Al0360 | Al0560 | Al03120 | Al05120 |
| Y(mm) | Z(mm) | Z(mm) | Z(mm) | Z(mm) |
| 0 | 0,025 | 0,050 | 0,195 | 0,137 |
| 10 | 0,247 | 0,493 | 0,751 | 0,159 |
| 20 | 0,363 | 0,720 | 1,017 | 0,532 |
| 40 | 0,505 | 0,727 | 1,213 | 0,795 |
| 60 | 0,539 | 0,560 | 1,157 | 0,628 |
| 80 | 0,523 | 0,440 | 0,773 | 0,210 |
| 100 | 0,297 | 0,331 | 0,161 | -0,290 |

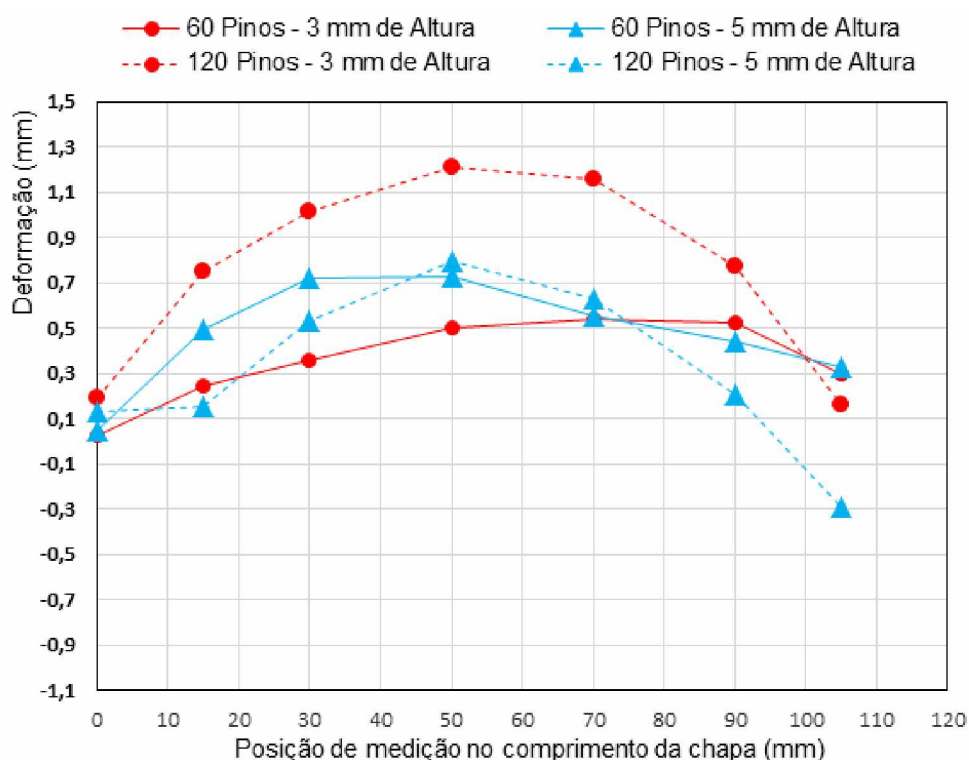


Figura 5.8 - Representação gráfica da deformação ao longo da linha longitudinal central dos CPs de alumínio com espessura de 0,5 mm

Na Tabela 5.6 tem-se os valores obtidos para a deformação média final na linha longitudinal central para os CPs de aço carbono com espessura de 1,0 mm. Na Figura 5.9 é mostrada a representação gráfica da deformação média destes CPs. Para as chapas de aço carbono os níveis de deformação final foram menores do que para as chapas de alumínio,

sendo que a deformação, ao que parece, não depende da quantidade de pinos depositados e nem da altura dos mesmos. Mesmo assim, as deformações, mesmo que levemente, ficaram concentradas na região central dos CPs (meio da linha longitudinal central).

Tabela 5.6 - Valores de deformação na linha longitudinal central dos CPs de aço carbono com espessura de 1,0 mm

| CPs | 43/49/50 | 41/42/44 | 25/45/48 | 2/46/47 |
|-----------|----------|----------|----------|---------|
| Descrição | A1360 | A1560 | A13120 | A15120 |
| Y | Z(mm) | Z(mm) | Z(mm) | Z(mm) |
| 0 | 0,047 | 0,018 | 0,115 | 0,185 |
| 10 | 0,182 | 0,121 | 0,319 | 0,257 |
| 20 | 0,298 | 0,234 | 0,379 | 0,284 |
| 40 | 0,309 | 0,291 | 0,384 | 0,281 |
| 60 | 0,257 | 0,222 | 0,359 | 0,194 |
| 80 | 0,187 | 0,117 | 0,179 | 0,025 |
| 100 | 0,080 | 0,089 | 0,006 | -0,190 |

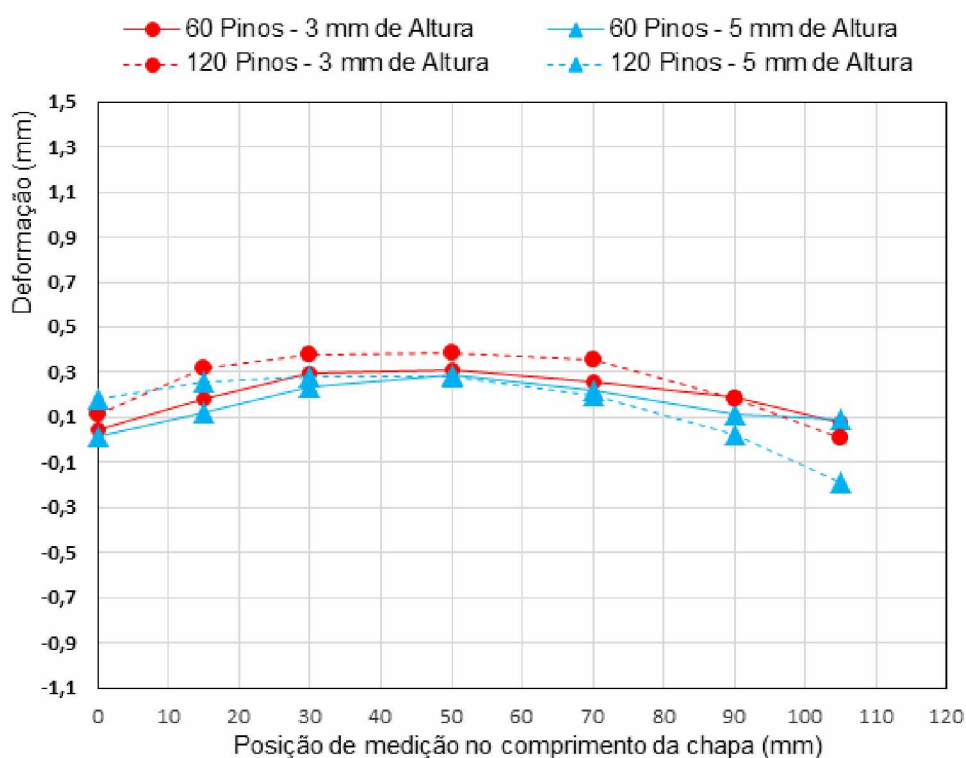


Figura 5.9 - Representação gráfica da deformação ao longo da linha longitudinal central dos CPs de aço carbono com espessura de 1,0 mm

Na Tabela 5.7 tem-se os valores resultantes para a deformação média final na linha longitudinal central para os CPs de aço carbono com espessura de 0,5 mm. A Figura 5.10 apresenta graficamente a deformação média destes CPs. Nota-se que a deformação não

parece ter aumentado em relação às chapas de aço carbono com 1,0 mm de espessura. Além disso, a deformação para as chapas de aço carbono de 0,5 mm de espessura também não parece depender da quantidade de pinos depositados e nem da altura destes.

Tabela 5.7 - Valores de deformação na linha longitudinal central dos CPs de aço carbono com espessura de 0,5 mm

| CPs | 7/17/18 | 12/13/14 | 9/15/16 | 3/10/11 |
|-----------|---------|----------|---------|---------|
| Descrição | A0360 | A0560 | A03120 | A05120 |
| Y(mm) | Z(mm) | Z(mm) | Z(mm) | Z(mm) |
| 0 | 0,007 | 0,032 | 0,026 | 0,073 |
| 10 | 0,237 | 0,185 | 0,146 | 0,136 |
| 20 | 0,318 | 0,296 | 0,231 | 0,221 |
| 40 | 0,344 | 0,378 | 0,330 | 0,291 |
| 60 | 0,303 | 0,331 | 0,394 | 0,361 |
| 80 | 0,195 | 0,274 | 0,210 | 0,176 |
| 100 | 0,090 | 0,053 | 0,098 | -0,030 |

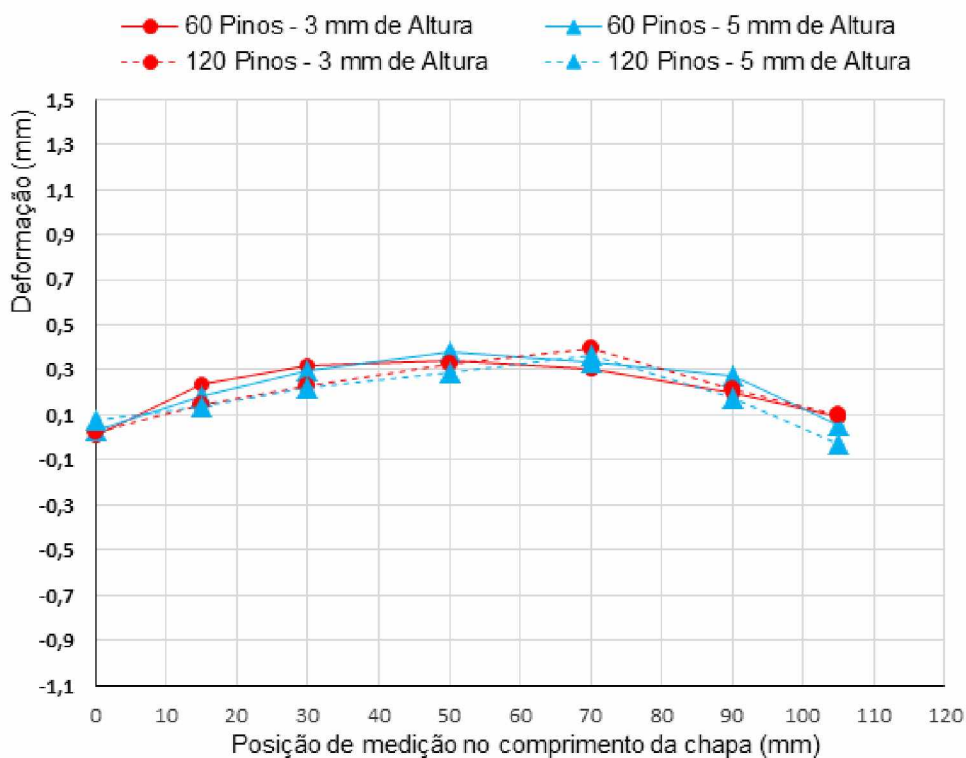


Figura 5.10 - Representação gráfica da deformação ao longo da linha longitudinal central dos CPs de aço carbono com espessura de 0,5 mm

Na Tabela 5.8 tem-se os valores da deformação média final na linha longitudinal central para os CPs de aço galvanizado com 1,0 mm de espessura. A Figura 5.11 mostra graficamente a deformação média destes CPs. Nota-se que as deformações obtidas foram

similares às encontradas para os CPs de aço carbono de mesma espessura. A não influência da quantidade de pinos presentes e da altura dos mesmos na distorção também ocorreu.

Tabela 5.8 - Valores de deformação na linha longitudinal central dos CPs de aço galvanizado com espessura de 1,0 mm

| CPs | 22/35/39 | 24/34/40 | 36/37/38 | 01/08/2023 |
|-----------|----------|----------|----------|------------|
| Descrição | G1360 | G1560 | G13120 | G15120 |
| Y (mm) | Z (mm) | Z (mm) | Z (mm) | Z (mm) |
| 0 | 0,07 | 0,085 | 0,043 | 0,105 |
| 10 | 0,121 | 0,14 | 0,115 | 0,176 |
| 20 | 0,17 | 0,203 | 0,154 | 0,251 |
| 40 | 0,202 | 0,231 | 0,184 | 0,267 |
| 60 | 0,193 | 0,229 | 0,083 | 0,223 |
| 80 | 0,12 | 0,118 | -0,016 | 0,101 |
| 100 | 0,041 | 0,041 | -0,091 | -0,015 |

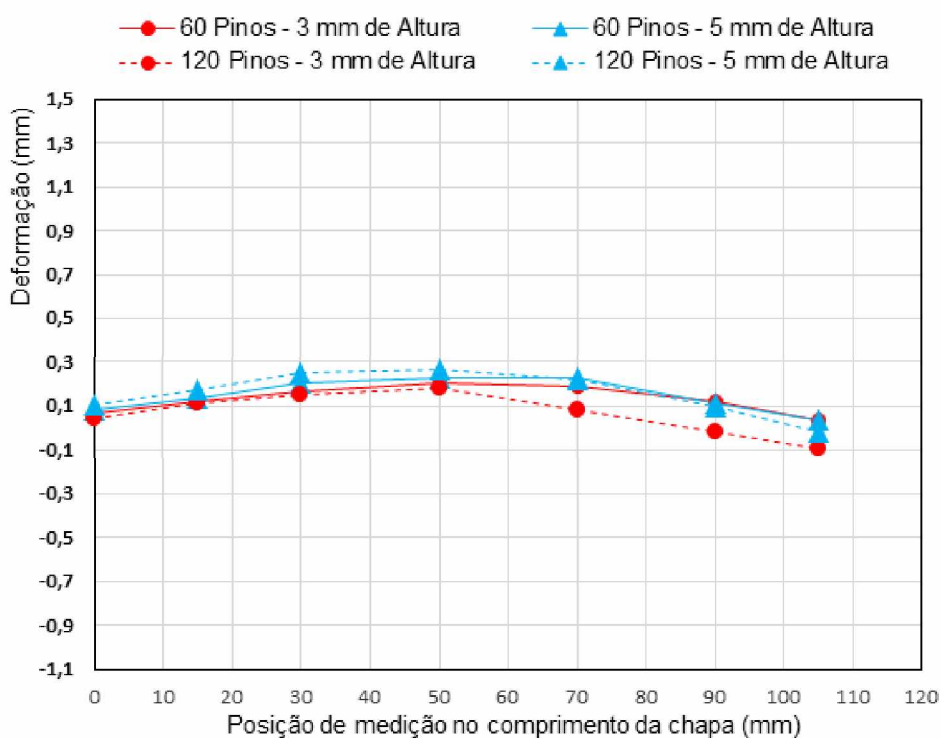


Figura 5.11 - Representação gráfica da deformação ao longo da linha longitudinal central dos CPs de aço galvanizado com espessura de 1,0 mm

Finalmente, na Tabela 5.9 são apresentados os valores da deformação média final na linha longitudinal central para os CPs de aço galvanizado com 0,5 mm de espessura. A Figura 5.12 mostra graficamente a deformação média destes CPs. Como ocorreu antes para

o caso das chapas de aço carbono de diferentes espessuras, a deformação aqui não parece ter aumentado em relação às chapas de aço galvanizado com 1,0 mm de espessura. Também para as chapas de aço galvanizado de 0,5 mm de espessura, não houve diferença significativa de deformação com variação da quantidade e altura dos pinos depositados.

Tabela 5.9 - Valores de deformação na linha longitudinal central dos CPs de aço galvanizado com espessura de 0,5 mm

| CPs | 19/20/21 | 26/27/28 | 31/32/33 | 4/29/30 |
|-----------|----------|----------|----------|---------|
| Descrição | G0360 | G0560 | G03120 | G05120 |
| Y(mm) | Z(mm) | Z(mm) | Z(mm) | Z(mm) |
| 0 | 0,125 | 0,105 | 0,101 | 0,099 |
| 10 | 0,171 | 0,167 | 0,218 | 0,139 |
| 20 | 0,206 | 0,248 | 0,237 | 0,219 |
| 40 | 0,212 | 0,228 | 0,224 | 0,295 |
| 60 | 0,174 | 0,166 | 0,177 | 0,243 |
| 80 | 0,084 | 0,100 | 0,071 | 0,145 |
| 100 | -0,033 | -0,088 | -0,115 | -0,030 |

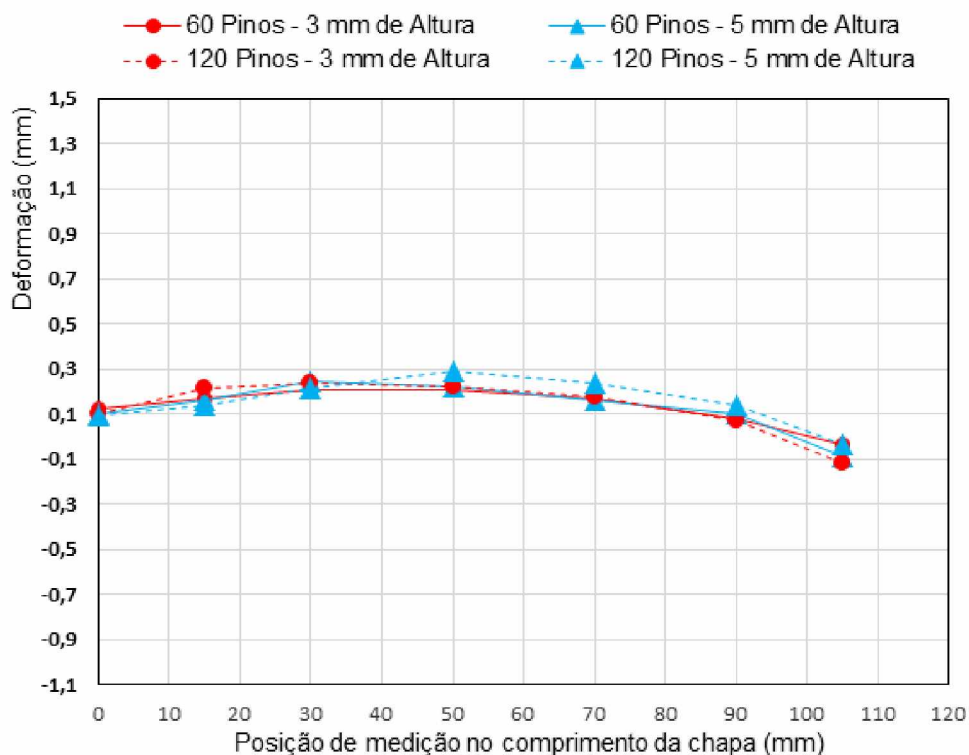


Figura 5.12 - Representação gráfica da deformação ao longo da linha longitudinal central dos CPs de aço galvanizado com espessura de 0,5 mm

Para resumir as deformações obtidas nas diversas condições de materiais e parâmetros de deposição dos pinos, a Tabela 5.10 apresenta apenas as deformações finais máximas obtidas no meio da linha longitudinal central. A Figura 5.13 mostra graficamente estas deformações máximas em função do material, espessura de chapa, altura de pino e quantidade deles.

Tabela 5.10 - Valores máximos de deformação encontrados

| Valores máximos de deformação (mm) | | | | | | |
|------------------------------------|----------|-------|-------------|-------|-----------------|-------|
| Material | Alumínio | | Aço Carbono | | Aço Galvanizado | |
| Espessura (mm) | 1,0 | 0,5 | 1,0 | 0,5 | 1,0 | 0,5 |
| 60 pinos com altura de 3,0 mm | 0,318 | 0,539 | 0,309 | 0,344 | 0,202 | 0,245 |
| 60 pinos com altura de 5,0 mm | 0,386 | 0,727 | 0,291 | 0,378 | 0,231 | 0,336 |
| 120 pinos com altura de 3,0 mm | 0,450 | 1,213 | 0,384 | 0,394 | 0,275 | 0,352 |
| 120 pinos com altura de 5,0 mm | 0,455 | 1,085 | 0,474 | 0,391 | 0,282 | 0,325 |

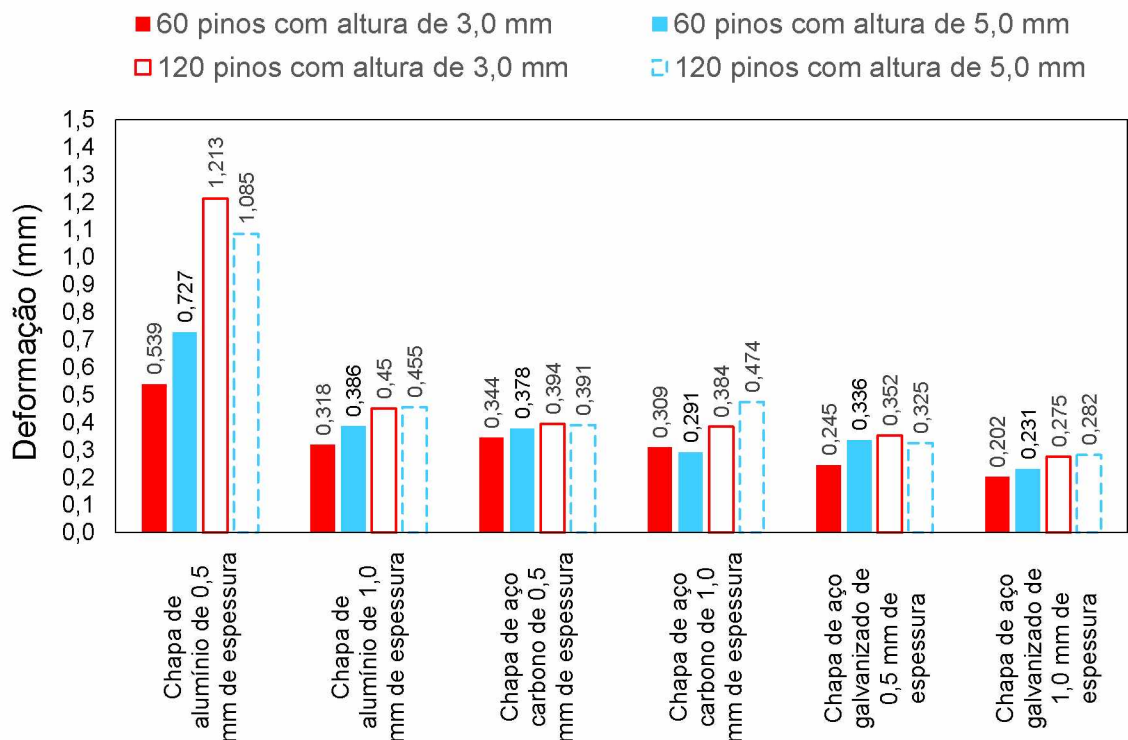


Figura 5.13 - Deformações máximas em função do material, espessura de chapa, altura e quantidade de pinos depositados

Tomando como base os resultados gerais da avaliação da deformação sofrida pelos CPs com a deposição dos pinos pelo processo CMT PIN, dentro da faixa estudada, não houve influência significativa do número de pinos (mesmo com dobra de quantidade), nem

da altura destes, tão pouco da espessura das chapas na deformação do CPs de aço carbono e de aço galvanizado, pelo menos nas condições avaliadas. Já para os CPs de alumínio houve uma deformação maior, com influência da quantidade de pinos depositados (deformação maior para maior quantidade de pinos), com a espessura mais fina levando a deformação visivelmente mais acentuada. Ao se comparar com os resultados de potência (relacionados ao calor gerado pelo processo e atuante nas chapas), como fora mostrado nas (Figuras 4.33, 4.34 e 4.35 nota-se que justamente as condições com alumínio tem maior potência de arco aberto (mais calor na chapa pela ação do arco), apesar da menor potência de aquecimento dos pinos (mas como a condutividade térmica é muito maior que no pino de aço, pode ter ainda aquecido mais as chapas de alumínio). Este maior poder de aquecimento na deposição de pinos de alumínio seria, pelo menos parcialmente, o responsável pelas deformações nestes casos.

Outro fato que ajudaria a explicar a maior deformação das chapas de alumínio, mais ainda nas condições de menor espessura, seria a menor rigidez deste material em relação à rigidez das chapas de aço, tanto ao carbono quanto galvanizado, que restringiria menos a deformação (o módulo de elasticidade do alumínio é bem menor que dos aços).

Como mostrado antes, não houve pressão do sistema de fixação na região central dos CPs (Figura 5.5), o que deixou as chapas livres nesta região para deformar elasticamente e ao que parece mesmo plasticamente. Assim é razoável acreditar que o fato de o arame ser puxado pelo motor tracionador dentro da tocha contribui, talvez até de maneira dominante, também para a deformação final das chapas. Quando o arame é puxado para ser rompido logo depois da união do pino com a chapa, esta logicamente é puxada (deformada) junto, podendo, ao que parece, chegar ao regime de deformação plástica, mais facilmente no caso do alumínio, principalmente na menor espessura, do que no caso dos aços.

Como forma de evitar a deformação das chapas de qualquer material ao se utilizar o processo CMT PIN, propõe-se utilizar, em trabalhos futuros um bocal modificado que possa encostar na chapa e a prender ao redor da região de deposição do pino, mas com saídas laterais para o gás de proteção. Assim, o pino seria puxado pelo motor tracionador de dentro da tocha, mas a chapa teria o movimento/deformação evitado pelo bocal de proteção modificado apoiado sobre a mesma. A Figura 5.14 ilustra como seria este bocal modificado.

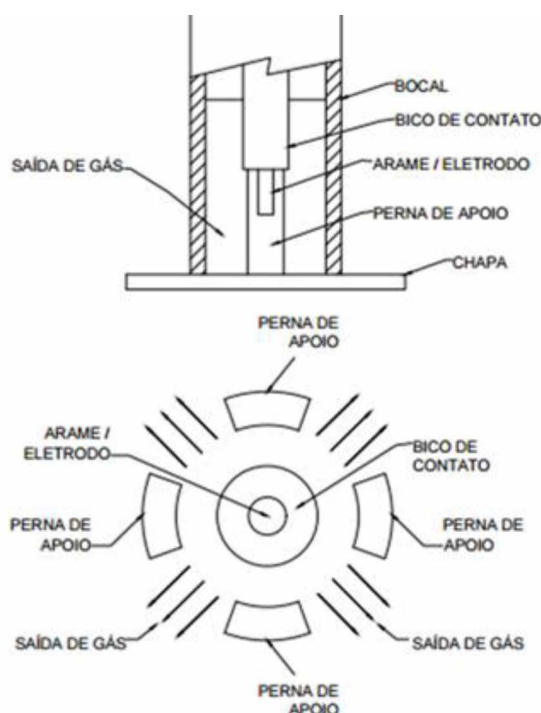


Figura 5.14 - Esquema de proposta de bocal de proteção modificado para servir também de fixador (evitar deformação) das chapas para deposição de pinos pelo processo CMT PIN

5.3. Comentários gerais

A partir da avaliação do efeito da deposição dos pinos sobre a distorção das chapas de aço carbono, aço galvanizado e de alumínio, em diferentes espessuras e diferentes alturas e quantidades de pinos, pode-se concluir, na faixa testada, que:

- O maior nível de distorção ocorreu para as chapas de alumínio, com a espessura mais fina (0,5 mm) e a maior quantidade (120) de pinos depositados levando ao maior nível;
- As chapas de aço carbono e de aço galvanizado praticamente não sofreram deformação, independentemente das combinações avaliadas;
- A deformação máxima de todos os casos ficou concentrada na região central das chapas;
- Em geral, a distorção causada pela deposição dos pinos é baixa (caso dos aços) e pode estar relacionada mais ao efeito mecânico (tração do arame para ruptura e formação do pino) do que ao efeito térmico (arco para junção do arame na chapa e aquecimento do pino do arame para ruptura e formação do pino) do processo CMT PIN.

CAPÍTULO VI

Efeito da deposição dos pinos nas propriedades mecânicas das chapas

Este capítulo teve como objetivo verificar a influência da deposição dos pinos nas propriedades mecânicas de chapas de aço carbono, aço galvanizado e de alumínio. Avaliou-se especificamente o limite de resistência à tração das chapas, e não a resistência da união pino chapa, uma vez que o objetivo foi avaliar a influência nas chapas e também a ductilidade das mesma nas duas espessuras e com pinos de duas alturas diferentes tendo como base de comparação chapas sem pino algum.

6.1. Metodologia

A metodologia para a avaliação dos parâmetros de resistência foi desenvolvida basicamente em 5 fases como descrito a seguir.

Fase I - Definição das variáveis do processo de soldagem

Foram utilizados os mesmos parâmetros e variáveis utilizados no Capítulo IV e os mesmos 72 corpos de prova preparados no Capítulo IV item 4.1 Metodologia e fase II Preparação dos corpos de prova.

Fase II - Preparação dos corpos de prova

Os CPs de tração foram do mesmo tipo dos utilizados no Capítulo IV, ou seja, de acordo com o especificado pela norma ASTM E8/E8M-13a, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials e mostrado na Figura 4.2. Todos os CPs foram cortados através do corte a frio (jato d'água abrasivo), como mostrado na Figura 4.3. O esquema dos CPs de tração, com as respectivas dimensões, esta mostrado na Figura 4.1.

Fase III – Deposição dos pinos

No processo de deposição dos pinos nas chapas de aço e de alumínio, utilizou-se o mesmo processo do Capítulo IV. Foram então depositados 3 pinos na linha central do corpo

de prova, na região com redução de largura, conforme indicado na Figura 4.4.

Fase IV - Embutimentos

Foram realizados ao todo 12 embutimentos, sendo 1 peça para cada combinação de variáveis. Primeiramente cortou-se os CPs em cortadora metalográfica para se ter apenas a região com redução de largura com os lados rentes aos pinos depositados. Estas amostras foram então colocadas em aros metálicos para preenchimento com resina poliéster insaturada cristal (poliéster) misturada ao catalisador MEK-P na proporção de 1% a 3%, e devidamente identificadas. Após a cura da resina, os aros foram retirados e as amostras lixadas com lixas d'água de granulometria #320 (até se alcançar aproximadamente o centro dos pinos) e #400, #600, #1200 e #2000 mesh, gradativamente. Em seguida realizou-se o polimento com óxido de cromo (CrO₃) #5 microns e por último com sílica coloidal #0,06 microns, ficando os CPs prontos para análise, conforme Figura 6.1.

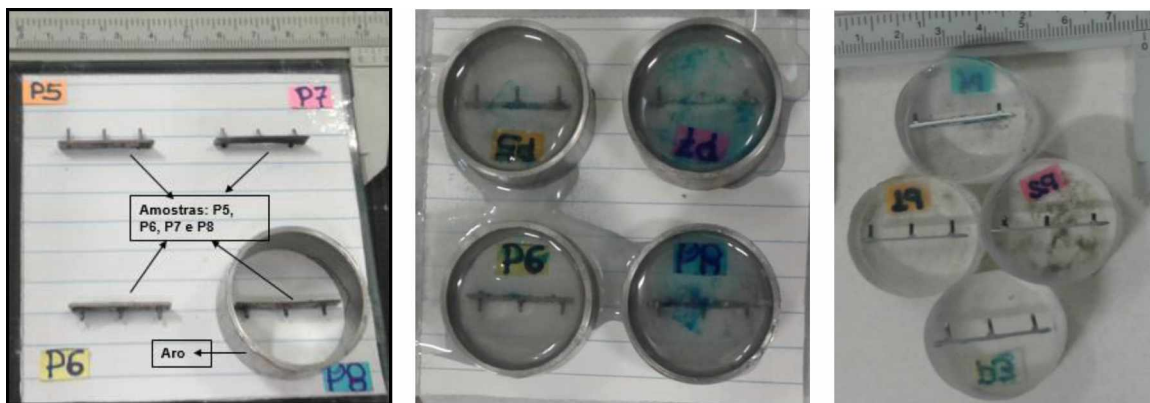


Figura 6.1 - Amostras de chapas com pinos no procedimento de embutimento

Fase V - Testes de tração e macrografia.

Para determinação das propriedades mecânicas das chapas com e sem pinos depositados, realizou-se ensaio de tração com extensômetro seguindo a Norma Técnica ASTM E8/E8M-13a. Dois parâmetros importantes que influenciam nos resultados são a temperatura e a velocidade de ensaio, que se mantiveram constantes em 23°C e 1,0 mm/s respectivamente. A região de largura reduzida dos CPs teve a espessura medida com micrômetro e a largura com o projetor de perfil. Os valores encontrados estão nas (Tabelas 1, 2, 3, 4, 5 e 6) do apêndice e foram utilizados para calcular a área e conseqüentemente na determinação dos valores de tensão resultantes. Foram realizados 54 ensaios de tração no total, sendo 36 CPs com 3 pinos cada e 18 CPs sem pinos.

6.2. Resultados

As curvas de tração resultantes dos ensaios podem ser vistas nas Figuras 6.2 até 6.4. Por estas curvas pode-se dizer que no geral houve boa repetitividade de desempenho em tração das combinações de materiais para os parâmetros avaliados. Os valores obtidos de limite de resistência à tração (LRT) e de alongamento (A) encontram-se na Tabela 5.7. O valor de LRT foi o valor máximo de tensão determinado através do arquivo de dados disponibilizado pela máquina de tração. O valor de alongamento foi o valor correspondente ao LRT determinado para cada condição.

Para facilitar a análise dos resultados do ensaio de tração, as Figuras 6.5 até 6.13 mostram os resultados de limite de resistência à tração e de alongamento em termos gráficos para cada combinação de material, espessura e altura de pino e sempre em comparação à situação equivalente sem pinos.

Na Figura 6.5 verifica-se que a presença dos pinos não deteriorou o valor de resistência alcançado, mesmo com a variação da espessura das chapas e nem mesmo com variação da altura dos pinos depositados. Isso indica que os pinos poderiam ser utilizados em chapas finas de aço carbono sem prejuízos em termos de resistência. Curiosamente a chapa mais fina (0,5 mm) exibiu menor patamar de resistência, talvez por ser muito fina e isso mudar o comportamento do material no ensaio de tração. Nota-se que houve boa repetitividade nos resultados de limite de resistência a tração dos CPs de aço carbono. A Figura 6.6 mostra imagens típicas de CPs de aço carbono depois de fraturados. Nota-se que a fratura ocorreu fora da região de deposição dos pinos (no próprio material de base). Na Figura 6.7 percebe-se que os valores de alongamento obtidos tiveram repetitividade e que não dependeram da presença dos pinos, da altura dos pinos depositados e nem tão pouco da espessura de chapa utilizada. Este resultado indica que a deposição dos pinos não prejudicou a ductilidade das chapas de aço carbono.

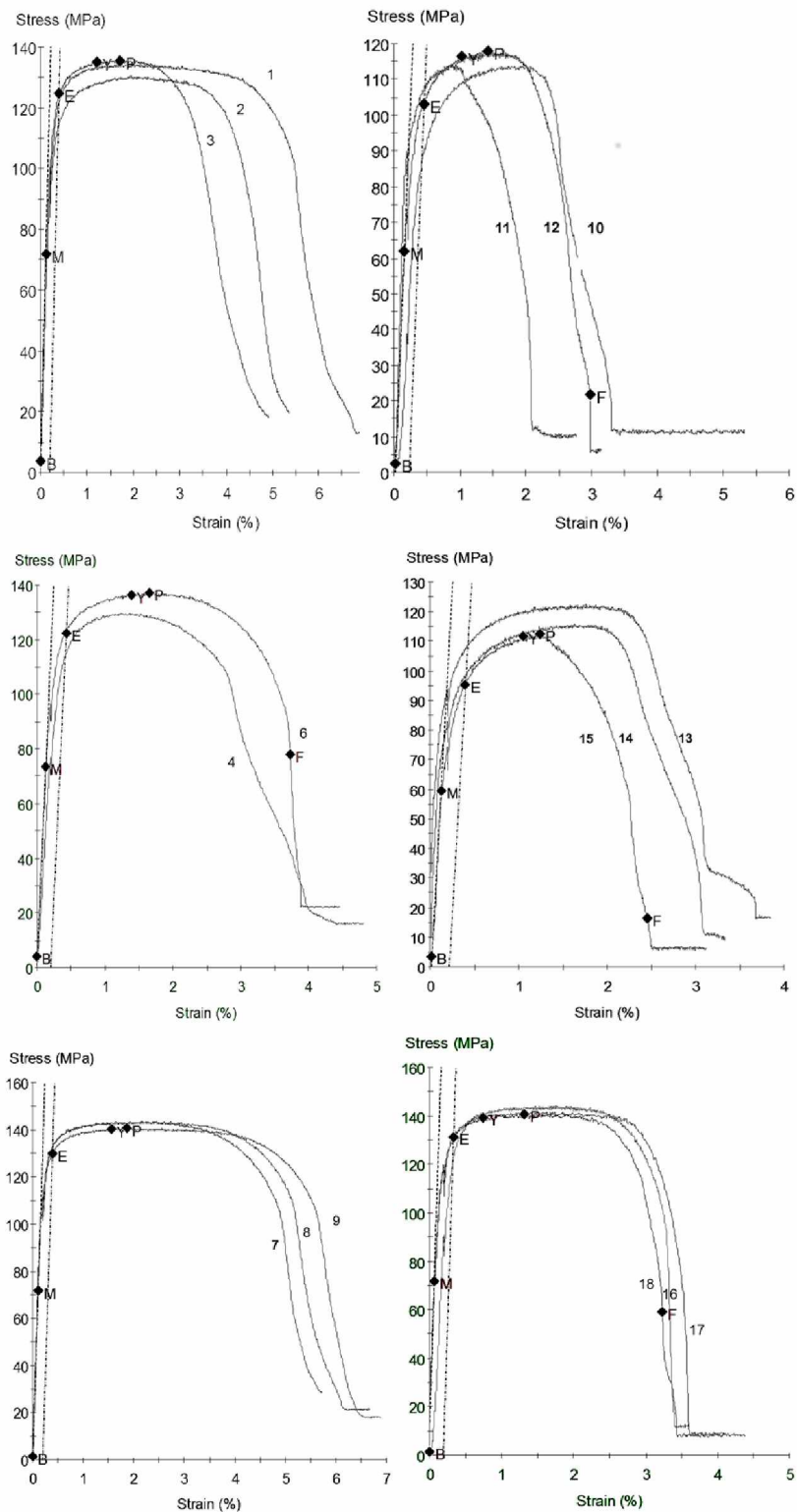


Figura 6.2 - Curvas de tensão versus deformação para chapas de alumínio com pinos de 3,0 mm de altura e de espessura de 1,0 mm (acima à esquerda) e de 0,5 mm (acima à direita) e com pinos de 5,0 mm de altura e de espessura de 1,0 mm (no centro à esquerda) e 0,5 mm (no centro à direita) e sem pinos e de espessura de 1,0 mm (abaixo à esquerda) e 0,5 mm (abaixo à direita)

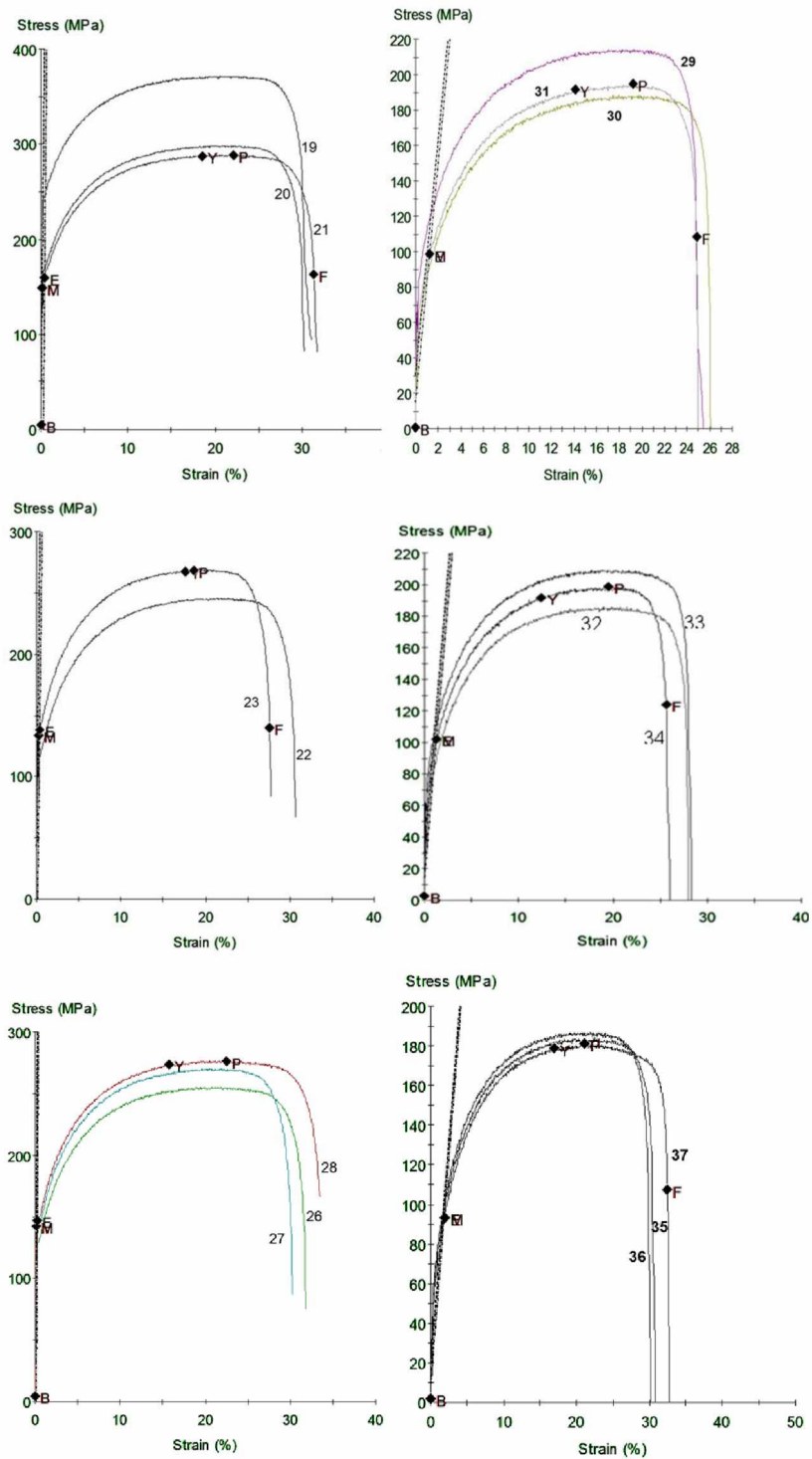


Figura 6.3 - Curvas de tensão versus deformação para chapas de aço carbono com pinos de 3,0 mm de altura e espessura de 1,0 mm (acima à esquerda) e de 0,5 mm (acima à direita) e com pinos de 5,0 mm de altura e de espessura de 1,0 mm (no centro à esquerda) e 0,5 mm (acima no centro à direita) e sem pinos e de espessura de 1,0 mm (abaixo à esquerda) e 0,5 mm (abaixo à direita)

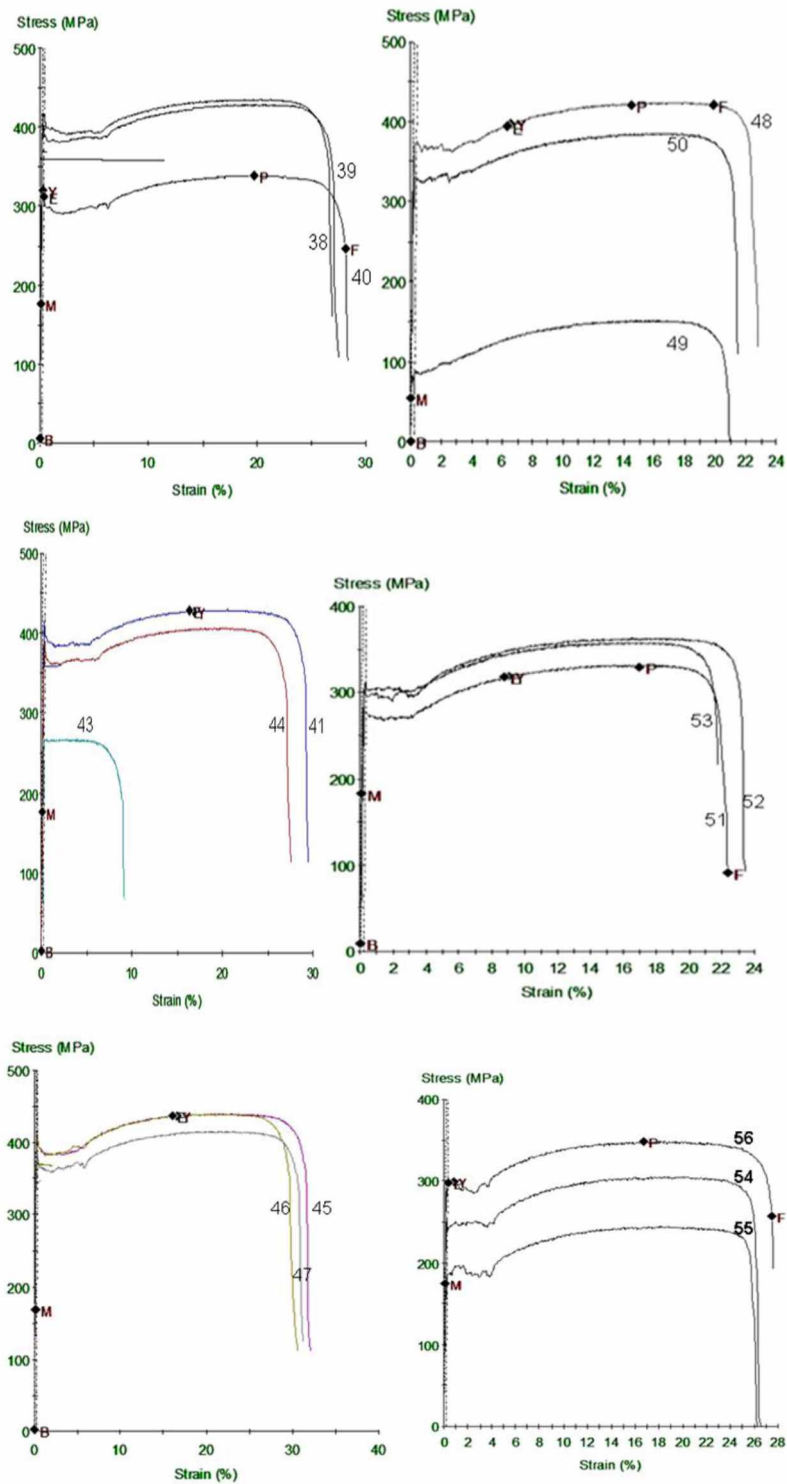


Figura 6.4 - Curvas de tensão versus deformação para chapas de aço galvanizado com pinos de 3,0 mm de altura e espessura de 1,0 mm (acima à esquerda) e de 0,5 mm (acima à direita) e com pinos de 5,0 mm de altura e de espessura de 1,0 mm (no centro à esquerda) e 0,5 mm (acima no centro à direita) e sem pinos e de espessura de 1,0 mm (abaixo à esquerda) e 0,5 mm (abaixo à direita)

Tabelas 6.1 - Valores de limite de resistência à tração (LRT) e de alongamento (A)

| CP | Material | Espessura (mm) | Altura do Pino (mm) | LRT | LRT médio | A (%) | A médio (%) | |
|----------|-------------|----------------|---------------------|--------|-----------|-------|-------------|--|
| # 1 | Alumínio | 1,0 | 3,0 | 134,67 | 134±3 | 1,97 | 1,9±0,1 | |
| # 2 | Alumínio | 1,0 | 3,0 | 130,49 | | 1,92 | | |
| # 4 | Alumínio | 1,0 | 3,0 | 135,63 | | 1,70 | | |
| # 3 | Alumínio | 1,0 | 5,0 | 129,8 | 133±5 | 0,63 | 1,1±0,7 | |
| # 5 | Alumínio | 1,0 | 5,0 | | | | | |
| # 6 | Alumínio | 1,0 | 5,0 | 136,99 | | 1,66 | | |
| # 7 | Alumínio | 1,0 | sem pino | 143,71 | 143±2 | 1,65 | 1,9±0,3 | |
| # 8 | Alumínio | 1,0 | sem pino | 143,52 | | 2,28 | | |
| # 9 | Alumínio | 1,0 | sem pino | 140,71 | | 1,87 | | |
| # 10 | Alumínio | 0,5 | 3,0 | 113,8 | 115±2 | 1,79 | 1,4±0,4 | |
| # 11 | Alumínio | 0,5 | 3,0 | 114,4 | | 0,89 | | |
| # 12 | Alumínio | 0,5 | 3,0 | 117,96 | | 1,42 | | |
| # 13 | Alumínio | 0,5 | Cancelado | | | | | |
| # 14 | Alumínio | 0,5 | 5,0 | 115,93 | 117±5 | 1,63 | 1,5±0,3 | |
| # 15 | Alumínio | 0,5 | 5,0 | 112,31 | | 1,24 | | |
| # 16 | Alumínio | 0,5 | sem pino | 144,53 | 142±2 | 1,76 | 1,6±0,3 | |
| # 17 | Alumínio | 0,5 | sem pino | 141,89 | | 1,85 | | |
| # 18 | Alumínio | 0,5 | sem pino | 140,83 | | 1,31 | | |
| # 19 | Aço Carbono | 1,0 | 3,0 | 371,37 | 293±7 | 20,54 | 21±1 | |
| # 20 | Aço Carbono | 1,0 | 3,0 | 298,24 | | 19,14 | | |
| # 21 | Aço Carbono | 1,0 | 3,0 | 288,5 | | 22,11 | | |
| # 22 | Aço Carbono | 1,0 | 5,0 | 285,48 | 277±12 | 20,97 | 18±3 | |
| # 23 | Aço Carbono | 1,0 | 5,0 | 268,57 | | 18,67 | | |
| #24 & 25 | Aço Carbono | 1,0 | 5,0 | 94,09 | | 15,86 | | |
| # 26 | Aço Carbono | 1,0 | sem pino | 355,13 | 301±47 | 21,17 | 22±1 | |
| # 27 | Aço Carbono | 1,0 | sem pino | 270,23 | | 21,21 | | |
| # 28 | Aço Carbono | 1,0 | sem pino | 276,37 | | 22,46 | | |
| # 29 | Aço Carbono | 0,5 | 3,0 | 214,31 | 199±14 | 17,07 | 18±1 | |
| # 30 | Aço Carbono | 0,5 | 3,0 | 188,14 | | 17,97 | | |
| # 31 | Aço Carbono | 0,5 | 3,0 | 194,72 | | 19,27 | | |

| CP | Material | Espessura (mm) | Altura do Pino (mm) | LRT | LRT médio | A (%) | A médio (%) |
|-----------|-----------------|----------------|---------------------|-----------------|-----------|-------|-------------|
| # 32 | Aço Carbono | 0,5 | 5,0 | 186,14 | 198±12 | 19,02 | 19±1 |
| # 33 | Aço Carbono | 0,5 | 5,0 | 209,32 | | 19,47 | |
| # 34 | Aço Carbono | 0,5 | 5,0 | 198,51 | | 19,55 | |
| # 35 | Aço Carbono | 0,5 | sem pino | 214,01 | 200±17 | 22,50 | 22±1 |
| # 36 | Aço Carbono | 0,5 | sem pino | 204,87 | | 21,94 | |
| # 37 | Aço Carbono | 0,5 | sem pino | 181,15 | | 21,11 | |
| # 38 | Aço Galvanizado | 1,0 | 3,0 | 434,91 | 400±5 | 19,66 | 19±1 |
| # 39 | Aço Galvanizado | 1,0 | 3,0 | 427,97 | | 18,03 | |
| # 40 | Aço Galvanizado | 1,0 | 3,0 | 338,28 | | 19,72 | |
| # 41 | Aço Galvanizado | 1,0 | 5,0 | 429,27 | 418±16 | 20,55 | 21±1 |
| # 42 & 43 | Aço Galvanizado | 1,0 | 5,0 | 398,31 & 266,65 | | | |
| # 44 | Aço Galvanizado | 1,0 | 5,0 | 406,14 | | 21,09 | |
| # 45 | Aço Galvanizado | 1,0 | sem pino | 439,75 | 431±31 | 20,50 | 21±1 |
| # 46 | Aço Galvanizado | 1,0 | sem pino | 439,23 | | 20,95 | |
| # 47 | Aço Galvanizado | 1,0 | sem pino | 415,36 | | 22,25 | |
| # 48 | Aço Galvanizado | 0,5 | 3,0 | 424,5 | 405±28 | 17,99 | 16±3 |
| # 49 | Aço Galvanizado | 0,5 | 3,0 | 151 | | 12,73 | |
| # 50 | Aço Galvanizado | 0,5 | 3,0 | 385,43 | | 17,10 | |
| # 51 | Aço Galvanizado | 0,5 | 5,0 | 332,25 | 351±16 | 17,20 | 16±1 |
| # 52 | Aço Galvanizado | 0,5 | 5,0 | 363,08 | | 16,56 | |
| # 53 | Aço Galvanizado | 0,5 | 5,0 | 358,27 | | 15,21 | |
| # 54 | Aço Galvanizado | 0,5 | sem pino | 305,26 | 327±29 | 18,41 | 18±1 |
| # 55 | Aço Galvanizado | 0,5 | sem pino | 245,04 | | 18,17 | |
| # 56 | Aço Galvanizado | 0,5 | sem pino | 348,92 | | 16,75 | |

Para facilitar a análise dos resultados do ensaio de tração, as Figuras 6.5 até 6.13 mostram os resultados de limite de resistência à tração e de alongamento em termos gráficos para cada combinação de material, espessura e altura de pino e sempre em comparação à situação equivalente sem pinos.

Na Figura 6.5 verifica-se que a presença dos pinos não deteriorou o valor de resistência alcançado, mesmo com a variação da espessura das chapas e nem mesmo com variação da altura dos pinos depositados. Isso indica que os pinos poderiam ser utilizados em chapas finas de aço carbono sem prejuízos em termos de resistência. Curiosamente a

chapa mais fina (0,5 mm) exibiu menor patamar de resistência, talvez por ser muito fina e isso mudar o comportamento do material no ensaio de tração. Nota-se que houve boa repetitividade nos resultados de limite de resistência a tração dos CPs de aço carbono. A Figura 6.6 mostra imagens típicas de CPs de aço carbono depois de fraturados. Nota-se que a fratura ocorreu fora da região de deposição dos pinos (no próprio material de base). Na Figura 6.7 percebe-se que os valores de alongamento obtidos tiveram repetitividade e que não dependeram da presença dos pinos, da altura dos pinos depositados e nem tão pouco da espessura de chapa utilizada. Este resultado indica que a deposição dos pinos não prejudicou a ductilidade das chapas de aço carbono.

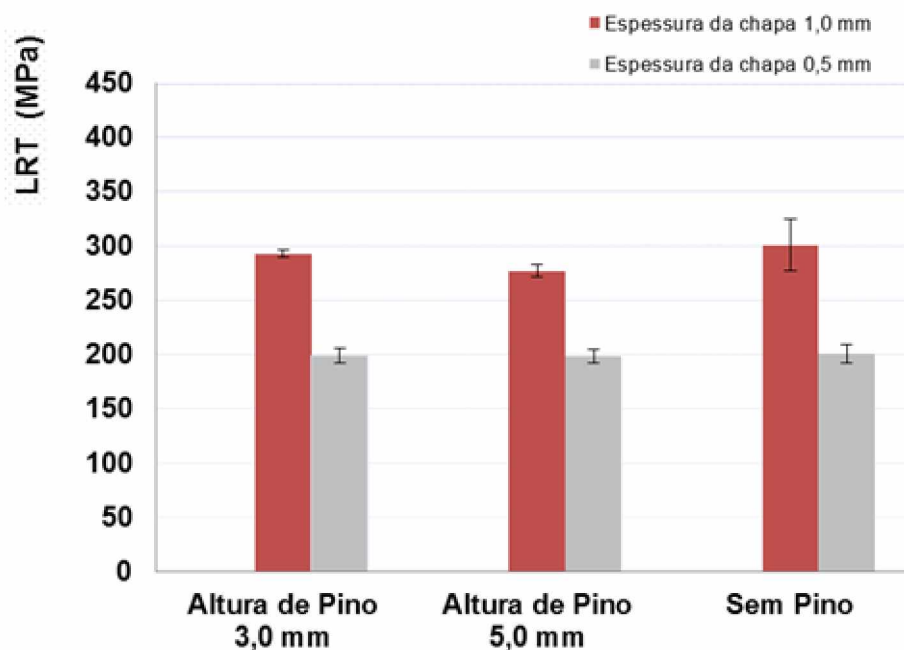


Figura 6.5 - Limite de resistência à tração para chapas de aço carbono com espessuras de 1,0 e 0,5 mm

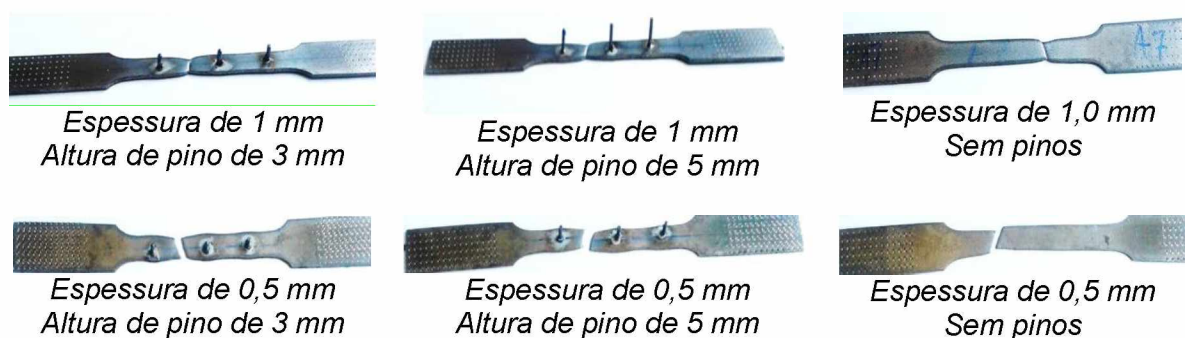


Figura 6.6 - CPs de aço carbono depois de fraturados

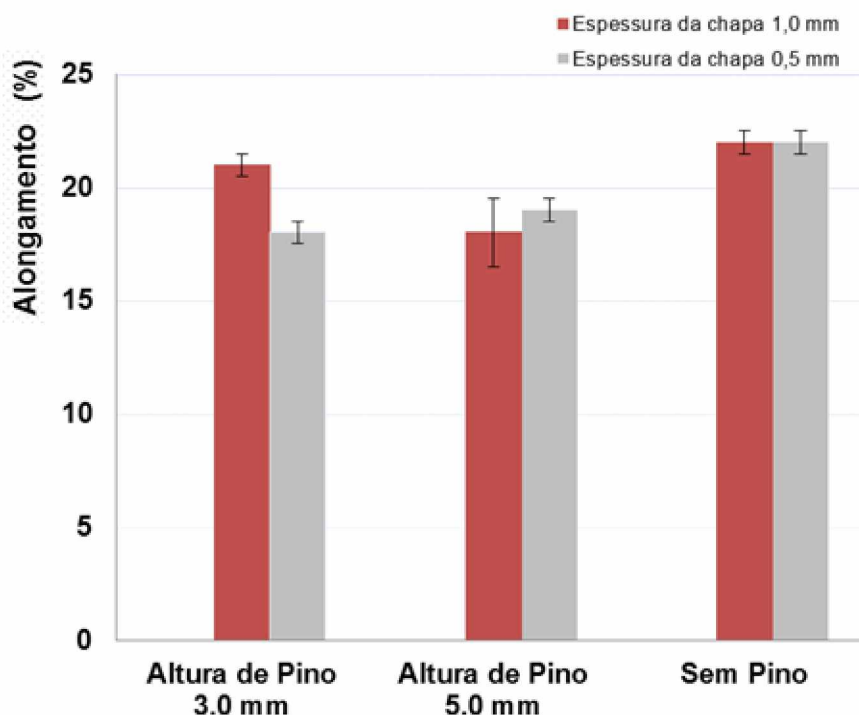


Figura 6.7 - Alongamento para chapa de aço carbono com espessura de 1,0 mm e 0,5 mm

Na Figura 6.8 nota-se que em geral a presença dos pinos não deteriorou o valor de resistência resultante nas chapas de aço galvanizado, mesmo com a variação da espessura das chapas e nem mesmo com variação da altura dos pinos depositados. Isso indica que os pinos poderiam ser utilizados também em chapas finas de aço galvanizado sem reduções nos níveis de resistência. Mais uma vez, assim como no caso do aço carbono mas não de forma geral, nota-se que a chapa mais fina (0,5 mm) exibiu menor patamar de resistência. De forma geral ocorreu boa repetitividade nos resultados de limite de resistência a tração dos CPs de aço galvanizado. A Figura 6.9 apresenta imagens típicas de CPs de aço galvanizado após o teste de tração. Assim como no caso do aço carbono, a fratura ocorreu fora da região de deposição dos pinos (no próprio material de base). Na Figura 6.10 percebe-se que os valores de alongamento obtidos tiveram repetitividade e foram próximos ao patamar exibido no caso do aço carbono, mas desta vez parece que a presença dos pinos, de ambas as alturas, reduz levemente os níveis obtidos, principalmente para a chapa mais fina (0,5 mm). Este resultado indica que a deposição dos pinos pode prejudicar a ductilidade das chapas de aço galvanizado.

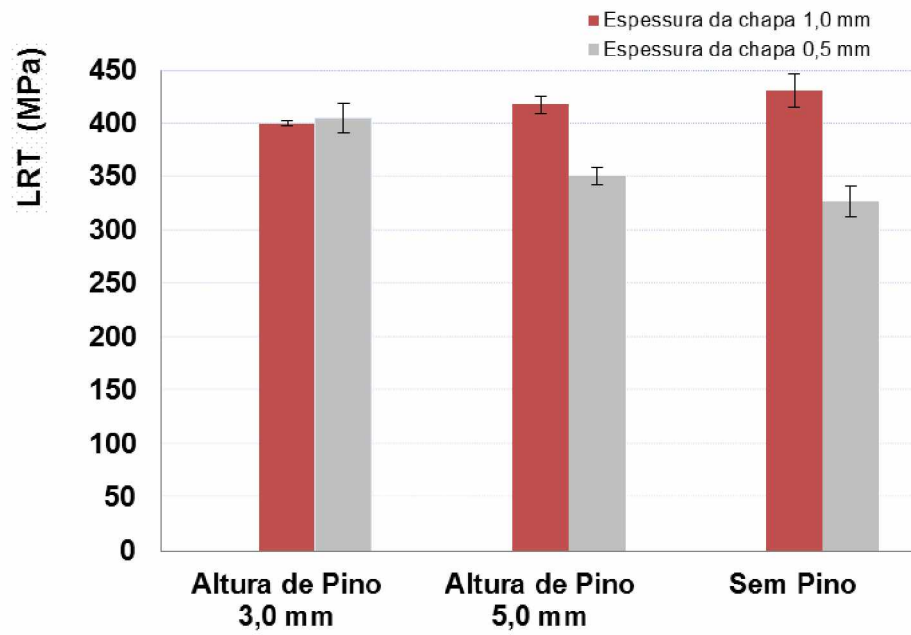


Figura 6.8 - Limite de resistência à tração para chapa de aço galvanizado com espessura de 1,0 mm e 0,5 mm



Figura 6.9 - CPs de aço galvanizado depois de fraturados

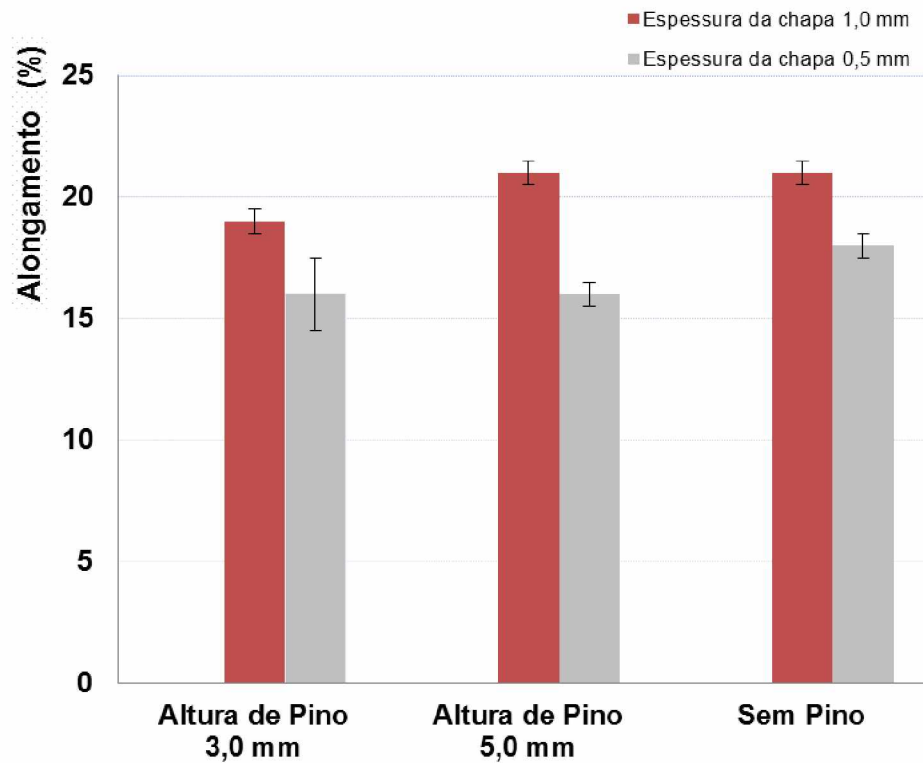


Figura 6.10 - Alongamento para chapas de aço galvanizado com espessura de 1,0 e 0,5 mm

Na Figura 6.11 nota-se que a presença dos pinos diminuiu significativamente o valor de resistência nas chapas de alumínio, principalmente para a menor espessura (0,5 mm), mas a altura dos pinos depositados não teve influência. Assim, a deposição de pinos em chapas de alumínio passa ser um problema se estas precisarem cumprir alguma função estrutural. De forma geral obteve-se boa repetitividade nos resultados de limite de resistência a tração dos CPs de alumínio. A Figura 6.12 apresenta imagens típicas de CPs deste material após o ruptura. Diferentemente do que ocorreu nos casos do aço carbono e do aço galvanizado, a fratura ocorreu sempre alinhada a um dos três pinos depositados. Na Figura 6.13, inclusive, nota-se que os níveis de alongamento obtidos foram um pouco reduzidos com a deposição dos pinos, o que indica uma fragilização da chapas nestes casos.

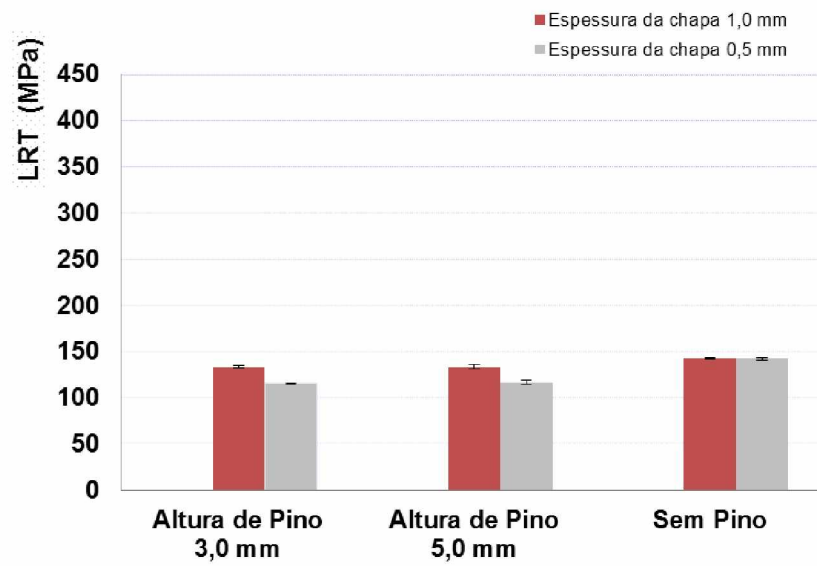


Figura 6.11 - Limite de resistência à tração para chapas de alumínio com espessuras de 1,0 e 0,5 mm

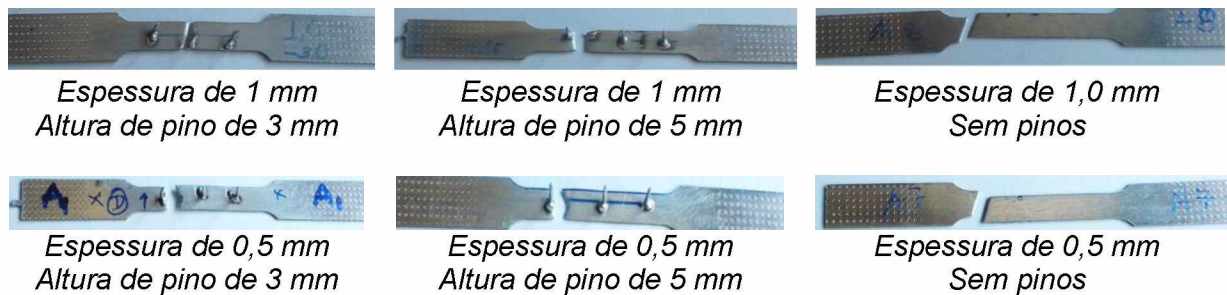


Figura 6.12 - CPs de alumínio depois de fraturados

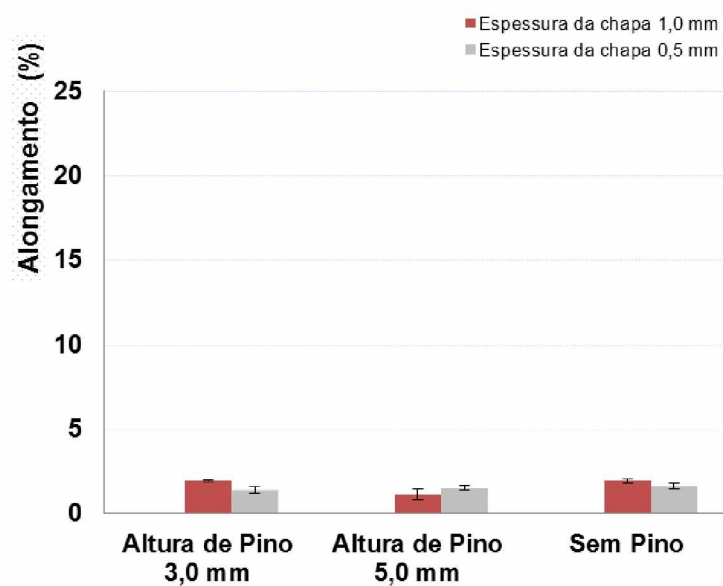


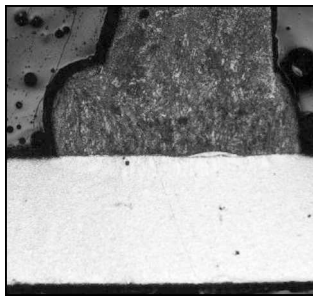
Figura 6.13 - Alongamento para chapas de alumínio com espessura de 1,0 e 0,5 mm

Como forma de complementar os resultados e análises sobre os efeitos da deposição dos pinos na resistência mecânica e ductilidade das chapas, as Figuras 6.14, 6.15 e 6.16 apresentam macrografias de regiões de junção entre o pino e chapa para diversas combinações de parâmetros. No geral, nota-se que ocorreram porosidades na região fundida, principalmente para os casos de deposição de pinos em chapa de aço galvanizado, nos quais uma região de grande vazio (porosidade concentrada) se formou de forma recorrente logo abaixo dos pinos e acima da chapa, e para os casos de deposição de pinos em chapa de alumínio, nos quais a porosidade foi mais fina e distribuída.

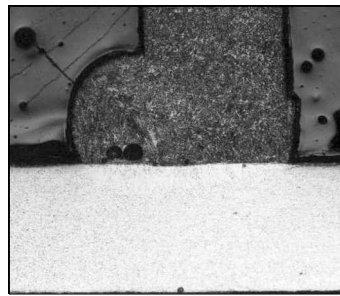
Em todos os casos das chapas de aço carbono mostradas Figura 6.14, nota-se que aparentemente quase não ocorreu fusão do metal de base, ou seja, das próprias chapas. Nota-se também que a porosidade não ocorreu em todos os pinos e que esta fica acima do nível do metal de base. Isso pode justificar porque as chapas de aço carbono não tiveram seu desempenho modificado pela disposição dos pinos, como mostrado na Figuras 6.5 e 6.7. Em muitos casos não houve simetria no pé do pino (região fundida entre pino e chapa).

Em todos os casos das chapas de aço galvanizado mostradas na Figura 6.15 também quase não ocorreu aparentemente fusão do metal de base. Nota-se que a porosidade ocorreu em todas as condições mostradas (em alguns casos os pinos se soltaram durante o lixamento, não sendo possível fazer a metalografia). O provável motivo dos grandes vazios (porosidade concentrada) com as chapas galvanizadas deve ser a vaporização da camada de zinco durante o tempo de arco aberto e de solidificação da junção pino-chapa. Mesmo assim, essa porosidade ficou acima do nível do metal de base e isso parece justificar por que a deposição dos pinos em geral não afetou o desempenho em tração (Figuras 6.8 e 6.10).

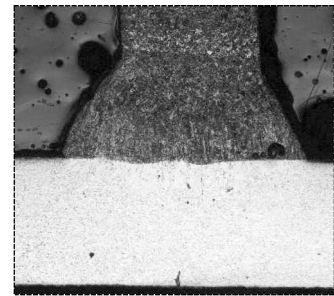
Já para os casos das chapas de alumínio mostrados na Figura 6.16 o comportamento foi bem diferente do ocorrido para as chapas de aço carbono e de aço galvanizado. Houve maior penetração da fusão no metal de base (chapas), mesmo que parcialmente Figura 6.16. Nota-se que a porosidade ocorreu em todas as condições mostradas (em alguns casos os pinos se soltaram durante o lixamento, não sendo possível fazer a metalografia). A porosidade fina e espalhada pela região fundida é típica da soldagem de alumínio, sendo o principal motivo provável a absorção de hidrogênio do ar. Pode ser que a proteção com 7 l/min de gás não tenha sido suficiente para evitar a entrada de hidrogênio. Como no caso das chapas de alumínio, a zona fundida e a porosidade dentro dela, penetrou bastante no metal de base, isso pode justificar a queda de desempenho em tração deste material com a deposição dos pinos, como mostrado nas Figuras 6.11 e 6.13. A Figura 6.17 mostra, além da fusão parcial do metal de base, exemplos de inclinação e estricção dos pinos de alumínio, que foram recorrentes neste caso provavelmente devido à elevada ductilidade.



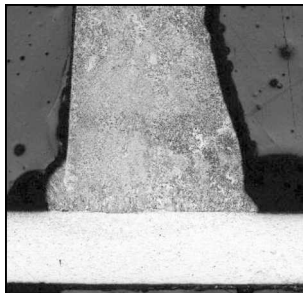
*Espessura de 1,0 mm
Altura de pino de 3 mm*



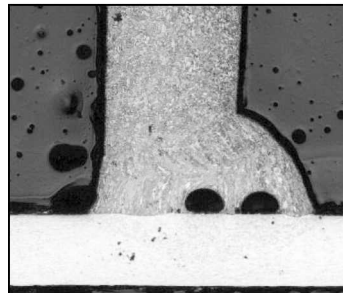
*Espessura de 1,0 mm
Altura de pino de 3 mm*



*Espessura de 1,0 mm
Altura de pino de 3 mm*



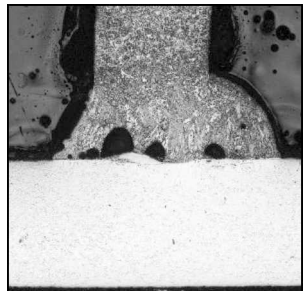
*Espessura de 0,5 mm
Altura de pino de 3 mm*



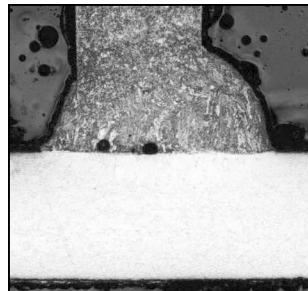
*Espessura de 0,5 mm
Altura de pino de 3 mm*

Não foi possível efetuar a análise de metalografia pois o pino se soltou no lixamento devido a desnível do embutimento

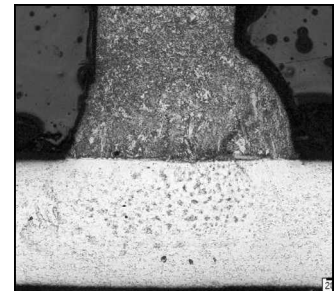
*Espessura de 0,5 mm
Altura de pino de 3 mm*



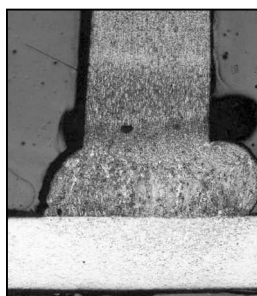
*Espessura de 1,0 mm
Altura de pino de 5 mm*



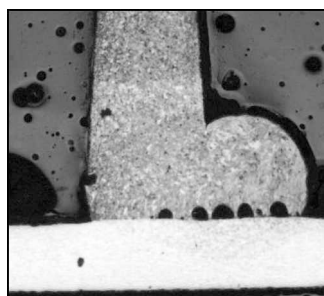
*Espessura de 1,0 mm
Altura de pino de 5 mm*



*Espessura de 1,0 mm
Altura de pino de 5 mm*



*Espessura de 0,5 mm
Altura de pino de 5 mm
Pino 1*

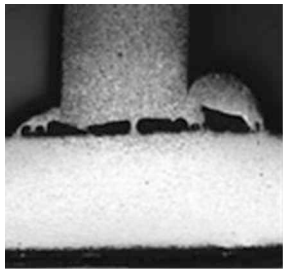


*Espessura de 0,5 mm
Altura de pino de 5 mm
Pino 2*

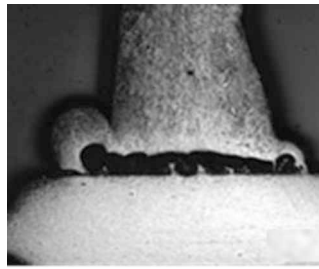


*Espessura de 0,5 mm
Altura de pino de 5 mm
Pino 3*

Figura 6.14 - Imagens metalográficas da junção dos pinos de 3 e 5 mm de altura com chapas de aço carbono com espessura de 0,5 e 1,0 mm



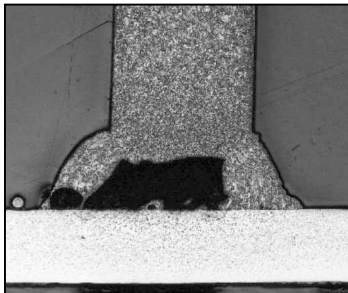
*Espessura de 1,0 mm
Altura de pino de 3 mm*



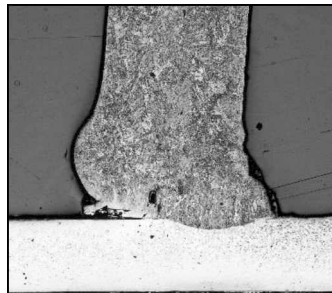
*Espessura de 1,0 mm
Altura de pino de 3 mm*

Não foi possível efetuar a análise de metalografia pois o pino se soltou no lixamento devido a desnível do embutimento

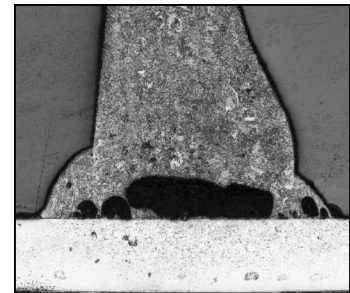
*Espessura de 1,0 mm
Altura de pino de 3 mm*



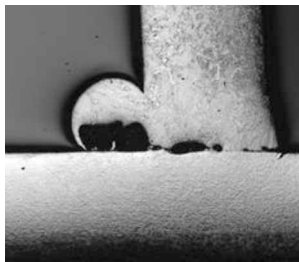
*Espessura de 0,5 mm
Altura de pino de 3 mm*



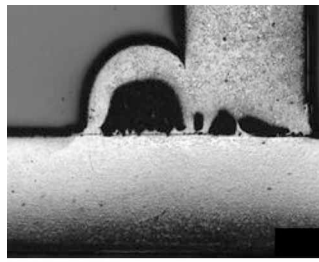
*Espessura de 0,5 mm
Altura de pino de 3 mm*



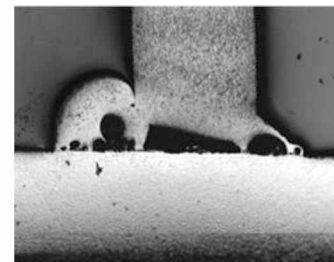
*Espessura de 0,5 mm
Altura de pino de 3 mm*



*Espessura de 1,0 mm
Altura de pino de 5 mm*



*Espessura de 1,0 mm
Altura de pino de 5 mm*



*Espessura de 1,0 mm
Altura de pino de 5 mm*

Não foi possível efetuar a análise de metalografia pois o pino se soltou no lixamento devido a desnível do embutimento

*Espessura de 0,5 mm
Altura de pino de 5 mm
Pino 1*

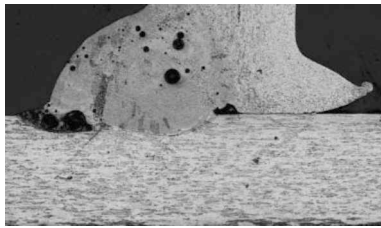
Não foi possível efetuar a análise de metalografia pois o pino se soltou no lixamento devido a desnível do embutimento

*Espessura de 0,5 mm
Altura de pino de 5 mm
Pino 2*

Não foi possível efetuar a análise de metalografia pois o pino se soltou no lixamento devido a desnível do embutimento

*Espessura de 0,5 mm
Altura de pino de 5 mm
Pino 3*

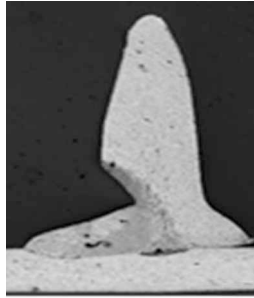
Figura 6.15 - Imagens metalográficas da junção dos pinos de 3 e 5 mm de altura com chapas de aço galvanizado com espessura de 0,5 e 1,0 mm



*Espessura de 1,0 mm
Altura de pino de 3 mm*

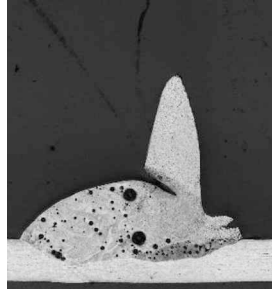
Não foi possível efetuar a análise de metalografia pois o pino se soltou no lixamento devido a desnível do embutimento

Não foi possível efetuar a análise de metalografia pois o pino se soltou no lixamento devido a desnível do embutimento



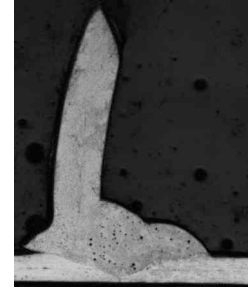
*Espessura de 0,5 mm
Altura de pino de 3 mm*

*Espessura de 1,0 mm
Altura de pino de 3 mm*



*Espessura de 0,5 mm
Altura de pino de 3 mm*

*Espessura de 1,0 mm
Altura de pino de 3 mm*



*Espessura de 0,5 mm
Altura de pino de 3 mm*

Não foi possível efetuar a análise de metalografia pois o pino se soltou no lixamento devido a desnível do embutimento

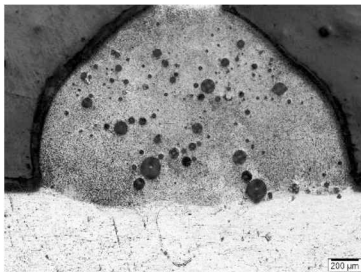
*Espessura de 1,0 mm
Altura de pino de 5 mm*

Não foi possível efetuar a análise de metalografia pois o pino se soltou no lixamento devido a desnível do embutimento

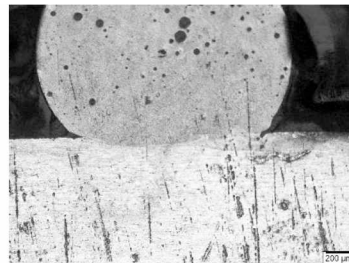
*Espessura de 1,0 mm
Altura de pino de 5 mm*

Não foi possível efetuar a análise de metalografia pois o pino se soltou no lixamento devido a desnível do embutimento

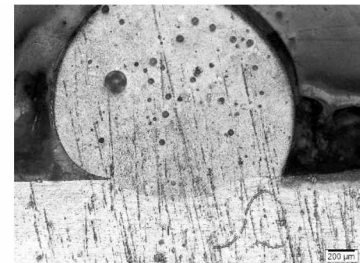
*Espessura de 1,0 mm
Altura de pino de 5 mm*



*Espessura de 0,5 mm
Altura de pino de 5 mm
Pino 1*



*Espessura de 0,5 mm
Altura de pino de 5 mm
Pino 2*



*Espessura de 0,5 mm
Altura de pino de 5 mm
Pino 3*

Figura 6.16 - Imagens metalográficas da junção dos pinos de 3 e 5 mm de altura com chapas de alumínio com espessura de 0,5 e 1,0 mm.

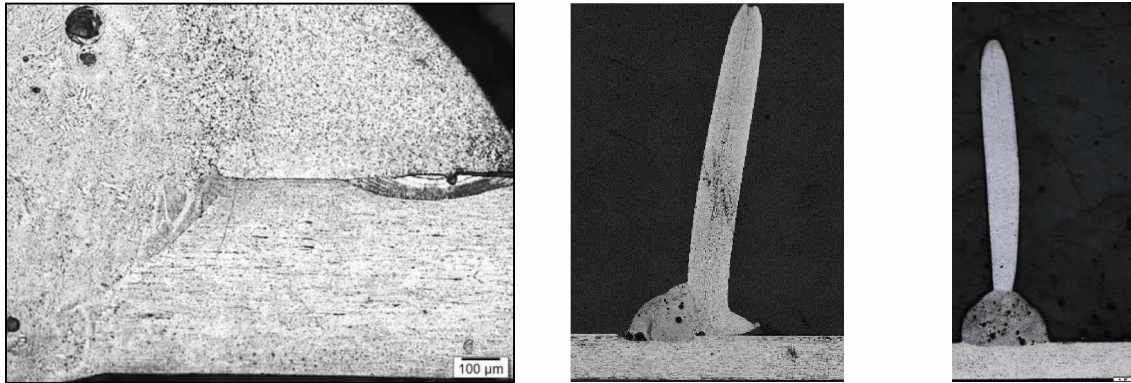


Figura 6.17 - Pino depositado em chapa de alumínio com detalhe da fusão parcial do metal de base (chapa)(à esquerda), da inclinação do pino (ao centro) e da estricção do pino (à direita)

6.3. Comentários gerais

A partir da avaliação do efeito da deposição dos pinos sobre resistência à tração e ductilidade das chapas de aço carbono, aço galvanizado e de alumínio, em diferentes espessuras e diferentes alturas, pode-se concluir, na faixa testada, que:

- Para as chapas de aço carbono e de aço galvanizado, o limite de resistência à tração não foi alterado pela deposição dos pinos, mesmo com variação de altura dos mesmos, mas a redução da espessura de chapa no caso do aço carbono tendeu a reduzir o patamar de limite de resistência à tração;
- Para as chapas de alumínio, a deposição dos pinos afetou razoavelmente o limite de resistência à tração resultante, principalmente para a menor espessura de chapa (0,5 mm), mas sem influência da altura dos pinos;
- Em termos de ductilidade, a deposição dos pinos em todos os materiais e combinações avaliadas não mudou muito o percentual de alongamento resultante;
- A fratura para as chapas de alumínio especificamente, para todas as combinações avaliadas, ocorreu sempre junto ao local de deposições dos pinos, provavelmente pela presença de porosidade dentro das chapas (além de na base dos pinos) causada pela fusão das mesmas logo abaixo dos pinos;
- No caso das chapas de aço, com revestimento à base de zinco (galvanizado) principalmente, ocorreu formação de porosidade na base dos pinos, algo que pode afetar a resistência da união pino chapa, algo que não foi investigado neste trabalho.

CAPÍTULO VII

CONCLUSÕES

Para as condições, materiais e parâmetros utilizados neste trabalho para estudo do efeito da deposição de pinos pelo processo MIG/MAG CMP PIN, chegou-se às conclusões listadas a seguir.

Em relação ao processo de deposição dos pinos:

- Verificou-se boa repetitividade (altura e geometria da cabeça) dos pinos depositados pelo processo CMT PIN;
- A potência de deposição de pinos de alumínio nas chapas de alumínio foi diferenciada, um pouco maior no tempo de arco aberto e um pouco menor no tempo de aquecimento dos pinos em relação aos casos dos pinos de aço;
- A variação de espessura das chapas dos três materiais avaliados não levou a modificações significativas nos patamares e tempos dos sinais de corrente e tensão, e conseqüentemente de potência de deposição;
- A variação da altura dos pinos levou a variações apenas nos tempos de solidificação dos mesmos, com pinos mais altos demandando mais tempo para se unir às chapas;

Em relação ao efeito da deposição dos pinos sobre a distorção das chapas:

- O maior nível de distorção ocorreu para as chapas de alumínio de menor espessura e com mais pinos depositados;
- As chapas de aço carbono e de aço galvanizado praticamente não sofreram deformação, independentemente das combinações avaliadas;
- A deformação máxima de todos os casos ficou concentrada na região central das chapas;

Em relação ao efeito da deposição dos pinos sobre a resistência à tração e ductilidade das chapas:

- Nas chapas de aço carbono e de aço galvanizado o limite de resistência à tração não foi alterado pela deposição dos pinos, mesmo com variação de altura dos mesmos;
- Nas chapas de alumínio a deposição dos pinos afetou razoavelmente o limite de resistência à tração resultante, principalmente para a menor espessura de chapa avaliada, mas sem influência da altura dos pinos;
- Em termos de ductilidade, a deposição dos pinos em todos os materiais e combinações avaliadas não mudou muito o percentual de alongamento resultante;
- A fratura para as chapas de alumínio especificamente, para todas as combinações avaliadas, ocorreu sempre junto ao local de deposições dos pinos, provavelmente pela presença de porosidade dentro das chapas;
- No caso das chapas de aço, com revestimento à base de zinco (galvanizado) principalmente, ocorreu formação de porosidade na base dos pinos, algo que pode afetar a resistência da união pino chapa.

CAPÍTULO VIII

TRABALHOS FUTUROS

Como forma de complementar e aprofundar a avaliação feita neste trabalho acerca dos pinos depositados pelo processo MIG/MAG CMT PIN, são propostos os seguintes pontos para estudo:

- Utilizar um bocal de proteção modificado que encoste nas chapas como medida de redução de distorções nas mesmas;
- Desenvolver um ensaio mecânico para avaliar a resistência da união pino chapa em diferentes materiais e com diferentes parâmetros de deposição (altura e formato da cabeça) dos pinos;
- Estudar a formação da porosidade na base dos pinos, levando em conta a vazão de gás de proteção utilizada, e verificar a relação desta com a resistência da união pino chapa;
- Avaliar a aplicação dos pinos depositados em chapas metálicas para fortalecimento de uniões com outros materiais, como por exemplo, plásticos, borrachas e compósitos;
- Como aparentemente não obteve-se boa diluição na região de união entre pino e chapa, sugere-se investigar a variação da corrente de arco para aumentar a fusão da chapa;
- Testar a liga Al-Mg para aumentar a resistência mecânica dos pinos em chapas de alumínio;
- Considerando-se que para o primeiro pino o arame ainda está frio, seria interessante avaliar a mudança da característica dos pinos subsequentes em relação ao primeiro;
- Para um melhor entendimento da influência dos pinos na resistência das chapas, sugere-se medir o perfil de microdureza na interface pino chapa para entender melhor o efeito da deposição dos pinos no comportamento da resistência e alongamento das chapas.

CAPÍTULO IX

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, C. B. F. **Uma Contribuição ao Estudo da Soldagem MIG Duplamente Pulsada da Liga Al-Mg 5083**. 2003. 97 f. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Pará, Belém.

ASTM – E8/E8M -13a. **Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials**. P.A . ASTM – American Society for testing and Materials, USA, 2013. 28 p.

AWS **Standard welding terms and definitions**. Miami: AWS- AMERICAN WELDING SOCIETY, A 3.0M/A3.0, USA, 2010. 12 edition 127 p.

BERNARDOS, N.; OLSZEWSKI, S. **Process of and Apparatus for Working Metals by the Direct Application of the Electric Current**. US Patent 363320, 17 may 1887.

BARRA, S. R.. **Influência do Processo MIG/MAG Térmico sobre a Microestrutura e a Geometria da Zona Fundida**. 2003. 220 f. Tese de Doutorado - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

BOHME, D., NENTWIG R. & KNOCH R. **A high efficiency welding process – The Double Wire Welding**, proc conf IIW Asian welding congress (Productivity beyond 1996). Auckland, New Zeland, pp.867-880 , feb. 1996.

BRUCKNER, J. **Cold Metal Transfer Has a Future Joining Steel to Aluminum**. Welding Journal, Vol.84, n. 6, pp.38-40, jun. 2005.

CONG, B.; Ding, J.; Williams, S. **Effect of arc mode in cold metal transfer process on porosity of additively manufactured Al-6.3%Cu alloy**. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, n. 76, pp.1593-1606, 2015.

CUTLASS STUD WELDING, **Technical Data, CD or ARC Process?** – Disponível em: <<http://www.cutlass-studwelding.com/technical.php>> Acesso em 15 dez. 2016.

EGERLAND, S. A. **Status and Perspectives in Overlaying under Particular Consideration of Sophisticated Welding Processes**. Quarterly Journal of the Japan Welding Society, 27, n. n°2, pp. 50-54, 2009.

FENG, J.; ZHANG, H.; HE, P. **The CMT short-circuiting metal transfer process and its use in thin aluminium sheets welding**. Materials and Design, 30, pp.1850-1852, 2009.

FOKENS, R. **Cold Metal Transfer - CMT - A Revolution in Mechanized Root Pass Pipeline Welding**. 4th Pipeline Technology Conference. Hannover, Germany, 2009.

FRONIUS INTERNATIONAL, **Some like it cold - The new welding process CMT is the innovation in the field of joining technology**. Disponível em: <http://www.fronius.com/cps/rde/xchg/SID-3FA6C90E-12B3CA32/fronius_international/hs.xsl/79_11528_ENG_HTML.htm#.V16pg7srLIU> september.2004, Acesso em 6 de mar de 2016.

FRONIUS CMT: Cold Metal Transfer Disponível em: <http://www.fronius.com/cps/rde/xbcr/SID-288FCE80-FC95C839/fronius_brasil/CMT_cold_metal_transfer_pt.pdf>, jul 2007 Acesso em: 6 de mar de 2016.

GARTNER, N.. **Fabricação de trocador de calor por método de manufatura aditiva**, Relatório de Estágio no Exterior (Laprosolda-UFU), em inglês, 2015.

GOHR, R. J., **Desenvolvimento de novos métodos de controle da soldagem MIG/MAG**. 2002. 150 f. Tese de Doutorado - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

GRAHAM, D.P.; REZAI, A.; BAKER, D.; SMITH, P.A.; WATTS, J.F., **The development and scalability of a high strength, damage tolerant, hybrid joining scheme for composite-metal structures**, Composites: Part A, 64, pp.11-24, 2014.

KIM, Y. S. *et al.* "**Analysis of Metal Transfer in Gas Metal Arc Welding**". Welding Journal, USA, VOL.72 pp.269-278 jun. 1993.

KIM, C. **Back Bead Characteristics during Butt Welding of a Thick Plate for Various Backing Conditions**. Materials Science Forum, vol.654-656, pp.350-353, jun. 2010.

MACHADO, I. G., **Soldagem e Técnicas Conexas – Processos** Porto Alegre, UFRGS 1996, 477 p.

MARQUES, C. **Prospecções da Natureza Física da Soldagem MIG Automática de Ligas de Alumínio**. 2013. 101 f. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Santa Catarina - Florianópolis.

MATWEB. Disponível em:

<<http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matquid=0ed7293cbcc34bf5981215248e22d068>>. Acesso em: 8 jun. 2015.

MATWEB. Disponível em:

<<http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matquid=1bea9ea04c71414e9109cd25419440c4>>. Acesso em: 8 jun. 2015.

MATWEB. Disponível em:

<<http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matquid=10b74ebc27344380ab16b1b69f1cffbb>>. Acesso em: 8 jun. 2015.

MATWEB. Disponível em:

<<http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matquid=96d768abc51e4157a1b8f95856c49028>>. Acesso em: 8 jun. 2015.

MELLO, A. **Houston, we have a welder shortage**, *Houston Chronicle*. Disponível em:

<<http://www.chron.com/jobs/article/Houston-we-have-a-welder-shortage-4851720.php>>
Acesso em 15 mar. 2015.

MODENESI, P. J. **Soldabilidade de algumas ligas metálicas.** (Apostila) Belo Horizonte: UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais, 2011. 26 p.

Disponível em <<http://demet.eng.ufmg.br/wp-content/uploads/2012/10/soldabilidade.pdf>>
Acesso em: 15 dez. 2015.

MODENESI, P.J.; MARQUES, P.V.; BRACARENSE A.Q. **Soldagem Fundamentos e tecnologia** . ed. B.H: UFMG, 2009. 362 p.

MODENESI, P. J.; NIXON, J. H., **Arc Instability Phenomena in GMA Welding**”, Welding Research Supplement – Welding Journal, pp. 219-224, set. 1994.

NASCIMENTO, A.S.; BATISTA, M.A.; NASCIMENTO, V.C.; SCOTTI, A., **Avaliação dos Métodos de Cálculo de Potência Elétrica em Soldagem a Arco e as Conseqüências sobre as Previsões Geométricas, Térmicas e Metalúrgicas da Junta, Soldagem & Inspeção**, Vol. 12, No 2. pp. 97 - 106 , abr/jun, 2007.

PICKIN, C. G.; WILLIAMS, S. W.; LUNT, M. **Characterisation of the cold metal transfer (CMT) process and its application for low dilution cladding.** Journal of Materials Processing Technology, Vol.211, pp. 496-502, mar 2011.

RIVET & WELDSTUD MANUFACTURING CC, Studewelding Equipment Disponível em: <http://www.studwelding.co.za/index.php?option=com_content&view=article&id=52&Itemid=58>. Acesso em 15 dez. 2016.

SÁBIO, A.D. **Estudo da viabilidade operacional do processo de soldagem MAG com alimentação adicional de arame frio.** 2007. 126 f. Dissertação de mestrado, Universidade do Pará, Belém.

SACKS, R.J.; BOHNART, E.R., **Welding Principles and Practices**, 3 ed. N.Y. McGraw-Hill, 2004. 1312p.

SCOTTI, A.; Ponomarev, V. - **Soldagem MIG/MAG: melhor entendimento, melhor desempenho** - 1 ed. S.P. Artliber, 2008, 284p.

SILVA, F. **Soldadura robotizada com tecnologia CMT.** 2015. 71 f. Dissertação de mestrado - Instituto Politécnico de Setúbal, Setúbal.

SKHABOVSKIY, I.; GARTNER, N.; RODRIGUES, C.F.; REIS, R.P.; SCOTTI, A.
Parametrização da técnica CMT (Cold Metal Transfer) Pin visando sua aplicação em trocadores de calor. POSMEC 2015 – Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia Mecânica - Universidade Federal de Uberlândia, 18 e 19 de nov de 2015, Uberlândia - MG.

SMITH, C. **How the welder shortage affects the infrastructure**, Disponível em:
<<http://www.thefabricator.com/article/testingmeasuring/how-the-welder-shortage-affects-the-infrastructure>>, Acesso em 15 mar. 2015.

SOMOSKOI G.; TOROK, I. - **CMT PIN** - Define the shape of the welded pin through welding parameters, *Production Processes and Systems*, vol. 6.no. 1. pp. 47-56, 2013.
University of Miskolc, Department of Mechanical Technology.

STENBACKA, N.; PERSSON, K. A., **Shielding Gases for Gas Metal Arc Welding**, *Welding Journal*, vol.68, pp.41-47, nov. 1989.

VILARINHO, L. O., **Desenvolvimento e Avaliação de um Algoritmo Alternativo para Soldagem MIG Sinérgica do Alumínio**, 2000. 111 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

WAINER,E., **Soldagem**. 14 ed. S.P:ABM, 1979, 175p.

WANG, W.; LIU, S.; JONES, J. E., **Flux Cored Arc Welding: Arc Signals, Processing and Metal Transfer Characterization**. *Welding Journal*,pp.369-377, nov 1995.

WITWER, L.; ENZINGER, N.; SOMMITSCH, C. **Impacts on the mechanical properties of aluminum base material due to pin welding**, ,IWS Austria, nov 2012.

ZHANG, H. T.; FENG, J. C.; HE, P. **Interfacial phenomena of cold metal transfer (CMT) welding of zinc coated steel and wrought aluminium**. *Materials Science and Technology*, pp.1346-1349, nov. 2008.

ZHANG, H. T. *et al.* **The arc characteristics and metal transfer behaviour of cold metal transfer and its use in joining aluminium to zinc-coated steel.** *Materials Science and Engineering*, vol.499 pp.111-113, jan. 2009.

ZIEDAS, S.;TATINI, I. **Soldagem.** Coleção Tecnologia – Senai São Paulo,1^a ed. pp. 373-385, 1997.

UCSNIK, S.; SCHEERER, M.; ZAREMBA, S.; PAHR, D.H.; **Experimental investigation of a novel hybrid metal-composite joining technology.** *Composites Parts A Applied Science and Manufacturing*: vol.41, issue 3, pp.369-374, mar. 2010.

CAPÍTULO X

APÊNDICE

MEDIDAS DE ESPESSURA E DE LARGURA DA SEÇÃO REDUZIDA DOS CPS

Tabela 10.1 - Material: Aço Galvanizado de 0,5 mm de espessura

| Placa | Altura (mm) | Micrometro | | | | | Projetor de Perfil | | | | | Área Canal mm ² |
|------------|----------------|-----------------|-------|-------|-------|--------------|--------------------|---------------|------|-------------|--------------|----------------------------------|
| | | Espessura em mm | | | | | Largura Canal | | | Comp. Canal | | |
| | | #1 | #2 | #3 | #4 | Média | #1 | Média | D.P. | #2 | Média | |
| A1 # 47 | 3,0 | 0,506 | 0,507 | 0,505 | 0,512 | | 39,939 | | | 6,243 | | |
| | | 0,507 | 0,504 | 0,514 | 0,509 | 0,508 | 40,065 | 39,981 | | 6,234 | 6,239 | 3,170 |
| | | | | | | | 39,939 | | | 6,241 | | |
| A2 # 48 | 3,0 | 0,514 | 0,516 | 0,514 | 0,515 | | 39,954 | | | 6,069 | | |
| | | 0,514 | 0,514 | 0,516 | 0,513 | 0,515 | 40,020 | 40,017 | | 6,039 | 6,054 | 3,115 |
| | | | | | | | 40,078 | | | 6,053 | | |
| A3 # 49 | 3,0 | 0,515 | 0,515 | 0,522 | 0,514 | | 40,069 | | | 6,070 | | |
| | | 0,518 | 0,517 | 0,519 | 0,515 | 0,517 | 40,081 | 40,055 | | 6,059 | 6,054 | 3,129 |
| | | | | | | | 40,016 | | | 6,033 | | |
| A4 # 50 | 5,0 | 0,510 | 0,514 | 0,512 | 0,513 | | 39,939 | | | 6,055 | | |
| | | 0,512 | 0,513 | 0,514 | 0,512 | 0,513 | 40,061 | 39,986 | | 6,046 | 6,038 | 3,094 |
| | | | | | | | 39,958 | | | 6,012 | | |
| A5 # 51 | 5,0 | 0,512 | 0,514 | 0,512 | 0,514 | | 40,061 | | | 6,257 | | |
| | | 0,508 | 0,509 | 0,513 | 0,519 | 0,513 | 40,121 | 40,110 | | 6,271 | 6,269 | 3,214 |
| | | | | | | | 40,149 | | | 6,279 | | |
| A6 # 52 | 5,0 | 0,500 | 0,517 | 0,514 | 0,514 | | 40,011 | | | 6,014 | | |
| | | 0,513 | 0,518 | 0,508 | 0,512 | 0,512 | 39,985 | 40,030 | | 6,038 | 6,021 | 3,083 |
| | | | | | | | 40,094 | | | 6,012 | | |
| A7 # 53 | ----- | 0,512 | 0,512 | 0,512 | 0,513 | | 40,075 | | | 6,270 | | |
| | | 0,508 | 0,509 | 0,507 | 0,509 | 0,510 | 40,151 | 40,112 | | 6,265 | 6,262 | 3,195 |
| | | | | | | | 40,110 | | | 6,250 | | |
| A8 # 54 | ----- | 0,508 | 0,508 | 0,507 | 0,512 | | 40,166 | | | 6,268 | | |
| | | 0,514 | 0,508 | 0,505 | 0,512 | 0,509 | 40,138 | 40,138 | | 6,246 | 6,266 | 3,191 |
| | | | | | | | 40,109 | | | 6,283 | | |
| A9 # 54 | ----- | 0,506 | 0,507 | 0,505 | 0,505 | | 40,110 | | | 6,270 | | |
| | | 0,505 | 0,505 | 0,503 | 0,508 | 0,506 | 40,182 | 40,125 | | 6,250 | 6,262 | 3,166 |
| | | | | | | | 40,082 | | | 6,267 | | |

Tabela 10.2 - Material: Aço Galvanizado de 1,0 mm de espessura

| Placa | Altura (mm) | Micrometro | | | | | Projeto de Perfil | | | | Área Canal mm ² |
|------------|----------------|-----------------|-------|-------|-------|--------------|-------------------|---------------|-------------|--------------|----------------------------------|
| | | Espessura em mm | | | | | Largura Canal | | Comp. Canal | | |
| | | #1 | #2 | #3 | #4 | Média | #9 | | #10 | | |
| A1 # 38 | 3,0 | 0,882 | 0,883 | 0,884 | 0,880 | | 40,104 | | 6,119 | | |
| | | 0,882 | 0,880 | 0,884 | 0,882 | 0,882 | 40,301 | 40,212 | 6,162 | 6,137 | 5,413 |
| | | | | | | | 40,230 | | 6,129 | | |
| A2 # 39 | 3,0 | 0,888 | 0,882 | 0,882 | 0,882 | | 40,032 | | 6,193 | | |
| | | 0,878 | 0,882 | 0,883 | 0,882 | 0,882 | 39,969 | 40,003 | 6,197 | 6,204 | 5,475 |
| | | | | | | | 40,009 | | 6,223 | | |
| A3 # 40 | 3,0 | 0,886 | 0,884 | 0,898 | 0,883 | | 40,005 | | 6,118 | | |
| | | 0,883 | 0,883 | 0,895 | 0,883 | 0,887 | 40,103 | 40,028 | 6,141 | 6,127 | 5,434 |
| | | | | | | | 39,976 | | 6,123 | | |
| A4 # 41 | 5,0 | 0,881 | 0,879 | 0,881 | 0,881 | | 40,123 | | 6,099 | | |
| | | 0,878 | 0,878 | 0,882 | 0,882 | 0,880 | 40,118 | 40,124 | 6,111 | 6,105 | 5,374 |
| | | | | | | | 40,131 | | 6,106 | | |
| A5 # 42 | 5,0 | 0,875 | 0,875 | 0,889 | 0,889 | | 40,052 | | 6,101 | | |
| | | 0,882 | 0,875 | 0,888 | 0,882 | 0,882 | 40,094 | 40,058 | 6,099 | 6,111 | 5,389 |
| | | | | | | | 40,027 | | 6,133 | | |
| A6 # 43 | 5,0 | 0,885 | 0,883 | 0,885 | 0,887 | | 40,099 | | 6,117 | | |
| | | 0,882 | 0,883 | 0,884 | 0,885 | 0,884 | 40,199 | 40,121 | 6,155 | 6,133 | 5,423 |
| | | | | | | | 40,065 | | 6,126 | | |
| A7 # 44 | ----- | 0,878 | 0,871 | 0,875 | 0,880 | | 40,138 | | 6,306 | | |
| | | 0,876 | 0,879 | 0,876 | 0,882 | 0,877 | 40,079 | 40,123 | 6,335 | 6,322 | 5,545 |
| | | | | | | | 40,152 | | 6,325 | | |
| A8 # 45 | ----- | 0,880 | 0,879 | 0,877 | 0,879 | | 40,018 | | 6,274 | | |
| | | 0,878 | 0,877 | 0,874 | 0,876 | 0,878 | 40,124 | 40,022 | 6,308 | 6,292 | 5,522 |
| | | | | | | | 39,924 | | 6,295 | | |
| A9 # 46 | ----- | 0,876 | 0,881 | 0,871 | 0,869 | | 40,105 | | 6,335 | | |
| | | 0,877 | 0,877 | 0,880 | 0,876 | 0,876 | 40,182 | 40,138 | 6,345 | 6,326 | 5,541 |
| | | | | | | | 40,127 | | 6,299 | | |

Tabela 10.3 - Material: Aço Carbono de 0,5 mm de espessura

| Placa | Altura (mm) | Micrometro | | | | | Projetor de Perfil | | | | | Área Canal mm ² |
|------------|-----------------|-----------------|-------|-------|-------|-------|--------------------|--------|--|-------------|-------|----------------------------------|
| | | Espessura em mm | | | | | Largura Canal | | | Comp. Canal | | |
| | | #1 | #2 | #3 | #4 | Média | #9 | | | #10 | | |
| A1 # 31 | 3,0 | 0,506 | 0,504 | 0,504 | 0,506 | | 40,169 | | | 6,147 | | |
| | | 0,504 | 0,502 | 0,500 | 0,504 | 0,504 | 40,145 | 40,162 | | 6,136 | 6,117 | 3,081 |
| | | | | | | | 40,171 | | | 6,067 | | |
| A2 # 32 | 3,0 | 0,500 | 0,500 | 0,504 | 0,504 | | 40,063 | | | 6,087 | | |
| | | 0,503 | 0,508 | 0,504 | 0,500 | 0,503 | 40,014 | 40,035 | | 6,071 | 6,079 | 3,057 |
| | | | | | | | 40,027 | | | 6,080 | | |
| A3 # 33 | 3,0 | 0,498 | 0,500 | 0,504 | 0,502 | | 39,999 | | | 6,159 | | |
| | | 0,503 | 0,501 | 0,504 | 0,504 | 0,502 | 40,189 | 40,045 | | 6,112 | 6,124 | 3,074 |
| | | | | | | | 39,948 | | | 6,101 | | |
| A4 # 34 | 5,0 | 0,505 | 0,504 | 0,497 | 0,506 | | 39,999 | | | 6,043 | | |
| | | 0,501 | 0,502 | 0,502 | 0,500 | 0,502 | 40,018 | 40,004 | | 6,046 | 6,057 | 3,042 |
| | | | | | | | 39,995 | | | 6,083 | | |
| A5 # 35 | 5,0 | 0,503 | 0,504 | 0,504 | 0,500 | | 40,095 | | | 6,093 | | |
| | | 0,505 | 0,504 | 0,505 | 0,500 | 0,503 | 39,952 | 40,031 | | 6,121 | 6,108 | 3,073 |
| | | | | | | | 40,047 | | | 6,111 | | |
| A6 # 36 | 5,0 | 0,502 | 0,502 | 0,503 | 0,506 | | 39,910 | | | 6,137 | | |
| | | 0,502 | 0,503 | 0,505 | 0,504 | 0,503 | 40,024 | 39,952 | | 6,149 | 6,139 | 3,090 |
| | | | | | | | 39,921 | | | 6,131 | | |
| A7 # 37 | ----- | 0,506 | 0,503 | 0,501 | 0,503 | | 40,149 | | | 6,188 | | |
| | | 0,504 | 0,500 | 0,502 | 0,501 | 0,503 | 40,042 | 40,109 | | 6,197 | 6,197 | 3,114 |
| | | | | | | | 40,136 | | | 6,207 | | |
| A8 # 38 | ----- | 0,505 | 0,504 | 0,505 | 0,502 | | 40,154 | | | 6,131 | | |
| | | 0,500 | 0,504 | 0,503 | 0,502 | 0,503 | 40,067 | 40,089 | | 6,152 | 6,148 | 3,093 |
| | | | | | | | 40,046 | | | 6,160 | | |
| A9 # 39 | ----- | 0,499 | 0,502 | 0,495 | 0,496 | | 40,155 | | | 6,289 | | |
| | | 0,497 | 0,502 | 0,494 | 0,494 | 0,497 | 40,135 | 40,101 | | 6,245 | 6,255 | 3,111 |
| | | | | | | | 40,013 | | | 6,23 | | |

Tabela 10.4 - Material: Aço Carbono de 1,0 mm de espessura

| Placa | Altura (mm) | Micrometro | | | | | Projedor de Perfil | | | | Área Canal mm ² |
|------------|-----------------|-----------------|-------|-------|-------|--------------|--------------------|---------------|-------------|--------------|----------------------------------|
| | | Espessura em mm | | | | | Largura Canal | | Comp. Canal | | |
| | | #1 | #2 | #3 | #4 | Média | #9 | | #10 | | |
| A1 # 19 | 3,0 | 0,890 | 0,886 | 0,886 | 0,886 | | 40,155 | | 5,993 | | |
| | | 0,887 | 0,887 | 0,888 | 0,887 | 0,887 | 40,145 | 40,131 | 5,991 | 5,993 | 5,316 |
| | | | | | | | 40,093 | | 5,994 | | |
| A2 # 20 | 3,0 | 0,887 | 0,890 | 0,887 | 0,894 | | 40,018 | | 6,059 | | |
| | | 0,887 | 0,886 | 0,888 | 0,880 | 0,887 | 40,175 | 40,088 | 6,072 | 6,061 | 5,379 |
| | | | | | | | 40,070 | | 6,053 | | |
| A3 # 21 | 3,0 | 0,882 | 0,882 | 0,886 | 0,885 | | 40,160 | | 6,006 | | |
| | | 0,885 | 0,885 | 0,888 | 0,875 | 0,884 | 40,117 | 40,136 | 5,997 | 5,998 | 5,300 |
| | | | | | | | 40,132 | | 5,992 | | |
| A4 # 22 | 5,0 | 0,884 | 0,882 | 0,884 | 0,882 | | 40,013 | | 6,000 | | |
| | | 0,882 | 0,885 | 0,883 | 0,883 | 0,883 | 40,133 | 40,052 | 5,992 | 5,993 | 5,293 |
| | | | | | | | 40,010 | | 5,988 | | |
| A5 # 23 | 5,0 | 0,884 | 0,881 | 0,882 | 0,882 | | 40,082 | | 5,980 | | |
| | | 0,884 | 0,884 | 0,884 | 0,886 | 0,883 | 40,135 | 40,102 | 5,973 | 5,971 | 5,275 |
| | | | | | | | 40,090 | | 5,961 | | |
| A6 # 25 | 5,0 | 0,890 | 0,890 | 0,890 | 0,890 | | 40,063 | | 5,988 | | |
| | | 0,886 | 0,894 | 0,884 | 0,892 | 0,890 | 40,071 | 26,705 | 5,956 | 5,976 | 5,316 |
| | | | | | | | 40,043 | | 5,984 | | |
| A7 # 26 | ----- | 0,876 | 0,875 | 0,875 | 0,876 | | 40,082 | | 5,936 | | |
| | | 0,875 | 0,875 | 0,875 | 0,876 | 0,875 | 40,137 | 40,120 | 5,910 | 5,922 | 5,184 |
| | | | | | | | 40,140 | | 5,919 | | |
| A8 # 27 | ----- | 0,894 | 0,896 | 0,900 | 0,900 | | 40,281 | | 6,134 | | |
| | | 0,894 | 0,894 | 0,902 | 0,900 | 0,898 | 40,086 | 40,218 | 6,221 | 6,187 | 5,553 |
| | | | | | | | 40,288 | | 6,205 | | |
| A9 # 28 | ----- | 0,88 | 0,880 | 0,883 | 0,882 | | 40,112 | | 5,979 | | |
| | | 0,882 | 0,878 | 0,88 | 0,884 | 0,881 | 40,244 | 40,172 | 5,981 | 5,984 | 5,273 |
| | | | | | | | 40,159 | | 5,993 | | |

Tabela 10.5 - Material: Alumínio de 0,5 mm de espessura

| Placa | Altura (mm) | Micrometro | | | | | Projeto de Perfil | | | | Área Canal mm ² |
|------------|----------------|-----------------|-------|-------|-------|--------------|-------------------|---------------|-------------|--------------|----------------------------------|
| | | Espessura em mm | | | | | Largura Canal | | Comp. Canal | | |
| | | #1 | #2 | #3 | #4 | Média | #9 | | #10 | | |
| A1 # 10 | 3,0 | 0,525 | 0,524 | 0,524 | 0,521 | | 39,969 | | 6,191 | | |
| | | 0,525 | 0,524 | 0,523 | 0,524 | 0,524 | 39,938 | 39,970 | 6,186 | 6,195 | 3,244 |
| | | | | | | | 40,002 | | 6,207 | | |
| A2 # 11 | 3,0 | 0,528 | 0,526 | 0,520 | 0,520 | | 39,961 | | 6,262 | | |
| | | 0,522 | 0,531 | 0,524 | 0,522 | 0,524 | 40,001 | 39,981 | 6,273 | 6,268 | 3,285 |
| | | | | | | | 39,980 | | 6,268 | | |
| A3 # 12 | 3,0 | 0,520 | 0,520 | 0,521 | 0,522 | | 39,939 | | 5,985 | | |
| | | 0,519 | 0,520 | 0,521 | 0,518 | 0,520 | 40,015 | 39,983 | 5,996 | 6,000 | 3,121 |
| | | | | | | | 39,996 | | 6,018 | | |
| A4 # 13 | 5,0 | 0,519 | 0,521 | 0,520 | 0,522 | | 39,980 | | 6,015 | | |
| | | 0,523 | 0,520 | 0,519 | 0,520 | 0,521 | 40,159 | 40,049 | 5,997 | 6,007 | 3,127 |
| | | | | | | | 40,009 | | 6,009 | | |
| A5 # 14 | 5,0 | 0,529 | 0,528 | 0,524 | 0,528 | | 40,122 | | 6,077 | | |
| | | 0,522 | 0,526 | 0,526 | 0,525 | 0,526 | 40,060 | 26,722 | 6,067 | 6,057 | 3,186 |
| | | | | | | | 40,043 | | 6,026 | | |
| A6 # 15 | 5,0 | 0,524 | 0,526 | 0,528 | 0,530 | | 40,193 | | 6,010 | | |
| | | 0,520 | 0,523 | 0,523 | 0,528 | 0,525 | 40,014 | 40,120 | 6,029 | 6,002 | 3,153 |
| | | | | | | | 40,152 | | 5,967 | | |
| A7 # 16 | ----- | 0,524 | 0,519 | 0,522 | 0,521 | | 40,076 | | 6,204 | | |
| | | 0,519 | 0,518 | 0,519 | 0,522 | 0,521 | 40,081 | 40,075 | 6,209 | 6,206 | 3,230 |
| | | | | | | | 40,069 | | 6,205 | | |
| A8 # 17 | ----- | 0,519 | 0,522 | 0,516 | 0,520 | | 40,194 | | 6,175 | | |
| | | 0,519 | 0,516 | 0,518 | 0,517 | 0,518 | 40,151 | 40,179 | 6,196 | 6,179 | 3,203 |
| | | | | | | | 40,192 | | 6,166 | | |
| A9 # 18 | ----- | 0,523 | 0,520 | 0,518 | 0,518 | | 40,094 | | 6,155 | | |
| | | 0,520 | 0,520 | 0,520 | 0,519 | 0,520 | 40,184 | 40,126 | 6,198 | 6,176 | 3,210 |
| | | | | | | | 40,099 | | 6,175 | | |

Tabela 10.6 - Material: Alumínio de 1,0 mm de espessura

| Placa | Altura (mm) | Micrometro | | | | | Projetor de Perfil | | | | | Área Canal mm ² |
|-----------|-----------------|-----------------|-------|-------|-------|--------------|--------------------|---------------|--|-------------|--------------|----------------------------------|
| | | Espessura em mm | | | | | Largura Canal | | | Comp. Canal | | |
| | | #1 | #2 | #3 | #4 | Média | #9 | | | #10 | | |
| A1 # 1 | 3,0 | 0,994 | 0,994 | 0,997 | 0,998 | | 40,063 | | | 5,921 | | |
| | | 0,994 | 0,995 | 0,996 | 0,997 | 0,996 | 40,135 | 40,113 | | 5,913 | 5,927 | 5,901 |
| | | | | | | | 40,141 | | | 5,948 | | |
| A2 # 2 | 3,0 | 0,998 | 0,995 | 0,997 | 0,998 | | 40,198 | | | 5,988 | | |
| | | 0,990 | 0,991 | 0,992 | 0,997 | 0,995 | 40,033 | 40,149 | | 5,955 | 5,955 | 5,923 |
| | | | | | | | 40,216 | | | 5,921 | | |
| A3 # 3 | 3,0 | 0,998 | 0,999 | 1,005 | 0,998 | | 40,082 | | | 5,968 | | |
| | | 0,997 | 0,999 | 1,004 | 0,996 | 1,000 | 40,095 | 40,062 | | 6,003 | 5,992 | 5,989 |
| | | | | | | | 40,008 | | | 6,004 | | |
| A4 # 4 | 5,0 | 0,995 | 1,003 | 1,004 | 0,992 | | 39,994 | | | 5,854 | | |
| | | 0,992 | 1,000 | 0,994 | 0,993 | 0,997 | 40,030 | 40,080 | | 5,786 | 5,811 | 5,791 |
| | | | | | | | 40,215 | | | 5,792 | | |
| A5 # 5 | 5,0 | 0,988 | 0,985 | 0,986 | 0,992 | | 40,010 | | | 5,864 | | |
| | | 0,989 | 0,986 | 0,991 | 0,990 | 0,988 | 40,246 | 40,091 | | 5,924 | 5,907 | 5,838 |
| | | | | | | | 40,018 | | | 5,933 | | |
| A6 # 6 | 5,0 | 0,991 | 0,990 | 0,990 | 1,000 | | 40,001 | | | 5,914 | | |
| | | 0,990 | 0,992 | 0,990 | 1,000 | 0,993 | 40,122 | 40,058 | | 5,825 | 5,864 | 5,822 |
| | | | | | | | 40,052 | | | 5,853 | | |
| A7 # 7 | ----- | 0,988 | 0,986 | 0,987 | 0,990 | | 40,030 | | | 6,214 | | |
| | | 0,992 | 0,990 | 0,988 | 0,990 | 0,989 | 40,067 | 40,033 | | 6,257 | 6,250 | 6,180 |
| | | | | | | | 40,002 | | | 6,279 | | |
| A8 # 8 | ----- | 0,986 | 0,992 | 0,989 | 0,987 | | 40,128 | | | 6,219 | | |
| | | 0,987 | 0,987 | 0,986 | 0,992 | 0,988 | 40,235 | 40,187 | | 6,294 | 6,267 | 6,193 |
| | | | | | | | 40,199 | | | 6,288 | | |
| A9 # 9 | ----- | 0,986 | 0,986 | 0,986 | 0,986 | | 40,056 | | | 6,280 | | |
| | | 0,987 | 0,991 | 0,987 | 0,985 | 0,987 | 40,156 | 40,105 | | 6,289 | 6,277 | 6,194 |
| | | | | | | | 40,104 | | | 6,262 | | |