



## **FACULDADE DE TECNOLOGIA SENAI CIMETEC**

**PROGRAMA DE POS-GRADUAÇÃO EM GESTÃO E TECNOLOGIA INDUSTRIAL**

**MESTRADO PROFISSIONAL**

**HEITOR JOSE DE GODOY PINHEIRO**

**ESTUDO DA CORRELAÇÃO ENTRE A CORRENTE DE “SHUNT” E A FEOMETRIA  
DO PONTO DE SOLDA EM FUNÇÃO DO ESPEÇAMENTO, EM CHAPA DE AÇO  
DE BAIXO TEOR DE CARBONO E ESPESSURA DE 0,8 MM.**

Salvador

2010

HEITOR JOSE DE GODOY PINHEIRO

ESTUDO DA CORRELAÇÃO ENTRE A CORRENTE DE “SHUNT” E A FEOMETRIA  
DO PONTO DE SOLDA EM FUNÇÃO DO ESPEÇAMENTO, EM CHAPA DE AÇO  
DE BAIXO TEOR DE CARBONO E ESPESSURA DE 0,8 MM.

Dissertação de mestrado profissional apresentada ao  
programa de Pós-Graduação em Gestão e Tecnologia  
Industrial, Faculdade de Tecnologia SENAI CIMATEC,  
como requisito parcial para obtenção do título de Mestre  
em Gestão e Tecnologia Industrial.

Orientador: Prof. Dr. Sergio Rodrigues Barra

Salvador  
2011

Ficha catalográfica

HEITOR JOSE DE GODOY PINHEIRO

ESTUDO DA CORRELAÇÃO ENTRE A CORRENTE DE “SHUNT” E A GEOMETRIA DO PONTO DE SOLDA EM FUNÇÃO DO ESPEÇAMENTO, EM CHAPA DE AÇO DE BAIXO TEOR DE CARBONO E ESPESSURA DE 0,8 MM.

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Gestão e Tecnologia Industrial, Faculdade de Tecnologia SENAI Cimatec.

**Banca Examinadora**

Dedico este trabalho a  
minha mãe, minha família, irmãos e amigos.

## **AGRADECIMENTOS**

## RESUMO

O processo de soldagem a ponto por resistência elétrica ainda hoje é o principal processo de união de chapas metálicas na indústria automobilística, devido a sua simplicidade, o baixo custo de produção, a alta taxa de produtividade e a não utilização de metal de adição durante a formação do ponto de solda na montagem das carrocerias. A corrente de "shunt" ou corrente derivada, é um fenômeno que ocorre no processo de soldagem por resistência, quando parte da corrente de soldagem é desviada (derivada) do ponto de solda, em formação, em decorrência do surgimento de um circuito elétrico adjacente. Este efeito pode ocorrer em diversas circunstâncias, principalmente quando são executados pontos de solda consecutivos e sequências, denominada de soldagem em série, mantendo-se uma distância reduzida entre estes. Nesta condição, a redução da corrente útil induzida pela corrente desviada poderá ocasionar problemas de qualidade na formação da zona fundida e, como consequência, a necessidade da imposição de valores de corrente fora da faixa de projeto. Assim, esta dissertação estuda um método para determinar o valor da corrente de "shunt" a partir da correlação entre a resistência dinâmica e a geometria da zona fundida, para diferentes valores da distância entre os pontos de solda. No estudo, foram realizadas soldagens em corpos de prova confeccionadas com chapas de aço carbono (0,13% C) com 0,8 mm de espessura, coleta dos valores instantâneos da corrente e da tensão soldagem e a determinação da resistência dinâmica, nos enrolamentos primário e secundário do transformador, para diferentes distâncias entre os pontos de solda. Como resultado, o trabalho demonstrar a possibilidade de se estimar a corrente de "shunt" em função da distância projetada para pontos de solda adjacentes e, adicionalmente, que a resistência dinâmica (medição dos valores de corrente e tensão de soldagem) pode ser medida tanto no secundário quanto no primário do transformador, evidenciando a robustez do método para esta aplicação industrial.

**Palavras chaves:** Soldagem a ponto por resistência elétrica. Corrente de "Shunt". Resistência dinâmica.

## ABSTRACT

The process of spot welding by electrical resistance is still the main process of sheet metal union in the auto industry due to its simplicity, low cost production, high productivity rate and no use of filler metal during the formation the solder joint assembly of car bodies. The current shunt or current derivative, is a phenomenon that occurs in the process of resistance welding, where part of the welding current is diverted (derived) from the spot welding, forming, due to the emergence of an adjacent electrical circuit. This effect can occur in different circumstances, especially when have spot weld in consecutive sequences, called welding in series, maintaining a reduced distance between them. In this condition, reducing the useful current induced current diverted may cause quality problems in the formation of the melted zone and, consequently, the need for the imposition of values outside the range of current design. Thus, this paper studies a method to determine the current value of the shunt from the correlation between the dynamic resistance and geometry of the fusion zone for different values of the distance between the spot weld. In the study, welds were carried out on samples to fabricate carbon steel plates (0.13% C) with 0.8 mm thick, collects the instantaneous values of current and welding voltage and the determination of dynamic resistance in the primary and secondary of transformer for different distances between the spot weld. As a result, the study shows the possibility of estimating the current shunt as a function of projected distance to adjacent welding spots and, additionally, that the dynamic resistance (measured values of welding current and voltage) can be measured both the secondary and the primary of the transformer, showing the robustness of this method for industrial application.

**Keywords:** Resistance spot welding. Current shunt. Dynamic resistance



# SUMÁRIO

**RESUMO**

**ABSTRACT**

**AGRADECIMENTOS**

**SUMÁRIO**

**LISTA DE FIGURAS**

**LESTA DE TABELAS**

**LISTA DE ABREVIACÕES E SIGLAS**

**LISTA DE SIMBOLOS**

## **1. INTRODUÇÃO**

- 1.1 Apresentação
- 1.2 Situação problema
- 1.3 OBJETIVOS
  - 1.3.1 Objetivo Geral
  - 1.3.2 Objetivos Específicos

## **2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS**

- 2.1 Processo de Soldagem a Ponto por Resistência Elétrica
- 2.2 Principais componentes de um equipamento de soldagem por resistência elétrica
  - 2.2.1 Transformador de soldagem
  - 2.2.2 Retificador controlado de silício (SCR)
  - 2.2.3 Controlador de soldagem
  - 2.2.4 Configurações de montagem dos equipamentos de soldagem
    - 2.2.4.a Maquina fixa ou pedestal
    - 2.2.4.b Maquina multiponto
    - 2.2.4.c Maquina portátil, pinça de soldagem
  - 2.2.5 Eletrodos
- 2.3 Resistência de contato
- 2.4 Classificação dos processos de soldagem por resistência elétrica
- 2.5 Parâmetro de processo de soldagem por resistência elétrica nos controladores de soldagem
- 2.6 Base de tempo dos parâmetros de soldagem utilizada fabricantes de equipamento de soldagem

- 2.6.1 Tempo de compressão
- 2.6.2 Tempo de soldagem
- 2.6.3 Corrente de soldagem
- 2.6.4 Tempo de subida de soldagem
- 2.6.5 Tempo de descida da corrente de soldagem
- 2.6.6 Tempo de pós-pressão
- 2.6.7 Tempo de pausa

### **3. MEDIÇÃO DA REISTÊNCIA DINÂMICA**

- 3.1 Medição da resistência dinâmica pelo secundário da fonte de soldagem
- 3.2 Medição da resistência dinâmica pelo primário do equipamento de soldagem

### **4. EFEITO DA CORRENTE DE "SHUNT"**

- 4.1 Comportamento da corrente de "shunt" em função do espaçamento entre os pontos de solda
- 4.2 Comportamento do diâmetro da zona Fundida em função do espaçamento (ds)
- 4.3 Tipos de ensaios para avaliação da qualidade da solda
  - 4.3.1 Inspeção visual
  - 4.3.2 Ensaio de flexão ou arrancamento
  - 4.3.3 Ensaio de tração
  - 4.3.4 Ensaio de ultrassom

### **5. PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL**

- 5.1 Introdução
- 5.2 Definição do material dos corpos de prova
- 5.3 Procedimento experimental para levantamento da curva do diâmetro em função da corrente de soldagem
  - 5.3.1 Equipamentos
  - 5.3.2 Dispositivo de fixação dos corpos de prova.
  - 5.3.3 Equipamento de soldagem
  - 5.3.4 Controlador de soldagem

- 5.3.5 Definição do diâmetro do ponto de solda “setup”
- 5.3.6 Procedimento para avaliação do ponto de solda.
- 5.3.7 Levantamento da curva do diâmetro em função da corrente de soldagem
- 5.4 Mapeamento da curva do diâmetro de ponto de solda em função da variação da distância entre pontos
- 5.5 Procedimento experimental para averiguar o coeficiente de correlação da resistência dinâmica medida com os dados do circuito primário e o secundário da fonte de soldagem
  - 5.5.1 Equipamentos utilizados
    - 5.5.1.a Fonte de soldagem
    - 5.5.1.b Controlador de soldagem
    - 5.5.1.c Transformador de corrente (Tc1 e Tc2)
    - 5.5.1.d Medição da tensão
    - 5.5.1.e Bancada de testes
    - 5.5.1.f Procedimento experimental para a correlação da resistência dinâmica do primário com o secundário de uma fonte de soldagem

## **6. RESULTADOS E DISCUSSÕES**

- 6.1 Mapeamento da curva do diâmetro do ponto de solda em função da corrente de soldagem
- 6.2 Mapeamento da perda da corrente de “shunt” em função da distância entre os pontos de solda
- 6.3 Mapeamento da correlação da resistência dinâmica ( $R_d$ ) do primário e secundário da fonte de soldagem
- 6.4 Considerações finais
  - 6.4.1 Estudo de redução de consumo de energia elétrica Fundamentado na redução de corrente de “shunt” durante o processo de soldagem de uma carroceria de um automóvel
  - 6.4.2 Proposta de método de gestão de qualidade da solda em tempo real de uma carroceria de automóvel na indústria
    - 6.4.2.1 Sistema de “Supervisory Control And Data Acquisition” (SCADA)

6.4.2.2 Sistemas ERP

**7. CONCLUSÕES**

**8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

**9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 2.1</b>	Representação de um processo de soldagem por resistência elétrica a ponto	12
<b>Figura 2.2</b>	Representação esquemática dos principais componentes de um equipamento de soldagem por resistência elétrica	
<b>Figura 2.3</b>	Representação de um transformador de um equipamento de soldagem por resistência elétrica	
<b>Figura 2.4</b>	Representação esquemática das resistências no secundário de um típico equipamento de soldagem por resistência elétrica	
<b>Figura 2.5</b>	Representação de um sistema de refrigeração do eletrodo de um equipamento de soldagem por resistência elétrica	
<b>Figura 2.6</b>	Representação da composição das resistências elétricas na área de contato entre os eletrodos e a peça	
<b>Figura 2.7</b>	Detalhes das regiões do processo de soldagem a ponto	
<b>Figura 2.8</b>	Representação de um ciclo de soldagem por resistência elétrica a ponto	
<b>Figura 2.9</b>	Representação do ciclo de soldagem	
<b>Figura 2.10</b>	Lóbulo de soldabilidade, diagrama generalizado da janela de fusão da soldagem por resistência elétrica	
<b>Figura 2.11</b>	Exemplos de expulsão de material	
<b>Figura 2.12</b>	Representação da curva de resistência dinâmica	
<b>Figura 3.1</b>	Representação esquemática das conexões das sondas de medições da corrente e tensão elétrica no secundário do equipamento de soldagem	
<b>Figura 3.2</b>	Corte transversal ilustrando o conjunto de porta eletrodo e a modificação para coletar a tensão elétrica da resistência de contato por meio de um par de fios trançado	
<b>Figura 3.3</b>	Representação de uma toróide envolvendo um condutor durante a passagem de corrente elétrica ( $I$ ) no	

condutor induz, devido ao campo eletromagnético, uma tensão proporcional (V) nos terminais de saída da toróide

- Figura 3.4** Diagrama esquemático simplificado representando equipamento de soldagem com sondas de medição de tensão e corrente no circuito
- Figura 4.1** Representação esquemática do efeito da corrente de “shunt” decorrente do desenho físico da peça
- Figura 4.2** Representação esquemática do efeito da corrente de “shunt” decorrente do processo de soldagem de pontos múltiplos
- Figura 4.3** Representação do efeito da corrente “shunt” decorrente ao processo de soldagem indireta
- Figura 4.4** Representação da corrente de “shunt” devido ao processo de soldagem por resistência de pontos em serie
- Figura 4.5** Percentual da corrente de “shunt” desviada no primeiro ponto de solda durante o período de soldagem
- Figura 4.6** Comportamento dos diâmetros da zona fundida para distâncias de **ds** para 8 mm, 20 mm e infinito, comparando os resultados dos ensaios em corpos de prova com modelo matemático
- Figura 4.7** Macrografia de um corte transversal de dois pontos de solda realizados a 8 mm de distância
- Figura 4.8** Representação ilustrativa de teste de flexão
- Figura 5.1** Gráfico do percentual de utilização das chapas classificadas por espessuras, empregadas nas peças estampadas de um carro popular
- Figura 5.2** Dimensões dos corpos de prova para os ensaios, conforme Ford Laboratory Test Method – BA 013-04.
- Figura 5.3** Tela de programação de parâmetros de soldagem do aplicativo CPC Connect

- Figura 5.4** Representação esquemática de um equipamento de soldagem por resistência com sistema de chaveamento em media frequência
- Figura 5.5** Representação do procedimento do calculo do diâmetro do ponto de solda por resistência
- Figura 5.6** Levantamento da curva do diâmetro de ponto de solda em função da variação da distância entre pontos
- Figura 5.7** Fonte de soldagem de 45kVA adaptada para a medição da resistência dinâmica no primário e secundário simultaneamente
- Figura 5.8a** Controlador de soldagem de corrente constante para equipamento de soldagem monofásico por solda de resistência
- Figura 5.8b** Visão da parte trazeira do controlador de soldagem ilustrando a placa de aquisição de dados e condicionamento de sinal incorporado ao controlador de soldagem
- Figura 5.9** Transformador de corrente de medição em núcleo de ar da fonte de soldagem do controlador CCPT 100
- Figura 5.10** Curva de calibração do conversor analógico digital para a medição da tensão do primário da fonte de soldagem
- Figura 5.11** Diagrama esquemático da bancada de teste adaptada para medição da resistência dinâmica ( $R_d$ ) do primário e secundário da fonte de soldagem
- Figura 6.1** Gráfico do diâmetro do ponto de solda em função da corrente de soldagem
- Figura 6.2** Curva da corrente de shunt em kA e % em função da variação de  $d_s$  nos corpos de prova
- Figura 6.3** Curva da tensão elétrica do circuito secundário para  $d_s = 45$  mm
- Figura 6.4** Curva da corrente elétrica do circuito secundário para  $d_s = 45$  mm
- Figura 6.5** Curva da resistência elétrica ( $R_d$ ) do circuito secundário para  $d_s = 45$  mm
- Figura 6.6** Curva da tensão elétrica do circuito primário para  $d_s = 45$  mm

- Figura 6.7** Curva da corrente elétrica do circuito primário para  $d_s = 45 \text{ mm}$
- Figura 6.8** Curva da resistência elétrica ( $R_d$ ) do circuito secundário para  $d_s = 45 \text{ mm}$
- Figura 6.9** Curva de dispersão para os valores de  $R_d$  do primário e secundário
- Figura 6.10** Representação das camadas de elementos na Automação Industrial



## LISTA DE TABELAS

- Tabela 2.1** Efeito da temperatura em relação à condutividade dos eletrodos, comparando o cobre e os eletrodos classe 1 e 2
- Tabela 4.1** Valores referenciais do dimensional dos eletrodos, parâmetros de soldagem, espaçamento mínimo entre pontos e diâmetro mínimo da zona fundida para chapas de baixo teor de Carbono tipo SAE 1008-1010
- Tabela 4.2** Valores referenciais da distância mínima entre pontos de solda em função da espessura da chapa governante
- Tabela 5.1** Tabela para determinar o diâmetro do ponto de solda mínimo, satisfatório e de “setup”
- Tabela 5.2** Diâmetros de referência para ensaios nos corpos de prova para chapa de espessura de 0,8 mm
- Tabela 5.3** Envelope operacional de soldagem para a chapa de 0,8 mm, com baixo teor de carbono
- Tabela 5.4** Matriz de experimento para o ensaio referente ao levantamento da curva do diâmetro da zona fundada em função da corrente de soldagem
- Tabela 5.5** Matriz experimental para coleta do diâmetro da zona fundida e resistência dinâmica em função da variação da distância entre os pontos de solda
- Tabela 5.6** Matriz experimental para coleta da resistência dinâmica do primário e secundário de uma fonte de soldagem
- Tabela 5.7** Tabela representativa dos parâmetros coletados pelo controlador de soldagem durante o ciclo de soldagem para o cálculo da resistência dinâmica
- Tabela 6.1** Tabela do diâmetro do ponto de solda em função da variação da corrente de soldagem
- Tabela 6.2** Tabela do levantamento do diâmetro do ponto de solda em função da variação da distância entre os pontos de soldagem (ds)
- Tabela 6.3** Tabela dos valores registrados pelo controlador de

soldagem dos valores de tensão e corrente elétrica do secundário para  $d_s = 45$  mm

- Tabela 6.4** Tabela do cálculo da resistência dinâmica ( $R_d$ ) do secundário para cada ciclo de solda e a média total do período de soldagem
- Tabela 6.5** Tabela dos valores registrados pelo controlador de soldagem dos valores de tensão e corrente elétrica do primário para  $d_s = 45$  mm
- Tabela 6.6** Tabela do cálculo da resistência dinâmica ( $R_d$ ) do primário para cada ciclo de solda e a média total do período de soldagem
- Tabela 6.7** Tabela dos valores de  $R_d$  do secundário e primário para corpos de prova com  $d_s$  de 10 a 45 mm
- Tabela 6.8** Cálculo estimado da perda de energia elétrica em kW/h ao ano na fabricação de uma carroceria de um automóvel

## LISTA DE ABREVIações E SIGLAS

AWS	American Welding Society
AHSS	Advanced High Strength Steel
ASTM	American Society for Testing and Materials
ds	Distância entre pontos de solda (mm)
Hz	Frequência elétrica em Hertz
ISO	International Organization for Standardization
IACS	International Annealed Copper Standard
kA	Quilo Amperes ( $10^3$ A)
kVA	Quilo Volts Amperes
kgf	Quilo grama força
Rc	Resistência de contato ( $\Omega$ )
Rd	Resistência dinâmica ( $\Omega$ )
RSW	Resistance spot welding
RWMA	Resistance welding manual
SAE	Society of Automotive Engineers
SCR	Retificador controlado de silício
TR	Transformador de soldagem
VCA	Tensão em corrente alternada (V)
ZF	Zona fundida
ZTA	Zona termicamente afetada

## LISTA DE SIMBOLOS

$\Omega$	Resistência ôhmica ( $\Omega$ )
$\mu\Omega$	Micro ohm ( $10^{-6} \Omega$ )
$\alpha$	Ponto de mínimo na curva de resistência dinâmica
$\beta$	Ponto de máximo na curva de resistência dinâmica

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 Apresentação

A indústria de automóvel, apesar da crise econômica de 2009, ainda é considerada um dos principais pilares econômico do país, notadamente devido à sua grande capacidade de demanda de empregos e pela cadeia de fornecedores. No Brasil, no ano de 2009, foram produzidas 2,652 milhões de unidades, a qual gerou um valor aproximadamente de 125 mil empregos diretos em dezembro de 2009 (Agência o Globo, 2010).

Nas últimas décadas as indústrias de automóvel, em função da competitividade do setor, vêm reestruturando todos os departamentos das organizações, onde o maior impacto se deu no departamento de manufatura. Dentre as novas formas de organização flexível da produção, destaca-se o sistema “just in time”, técnica cuja lógica é produzir somente no momento, na quantidade e na ordem em que o mercado demandar. Isso se dá com base num relacionamento mais estreito entre montadoras, fornecedores de autopeças e clientes.

Segundo PORSSSE (1998), a competitividade e o alto volume de produção, fazem com que as indústrias de automóvel sejam grandes consumidoras e provedoras de inovações tecnológicas. Em síntese, a modernização tecnológica da indústria automobilística consiste na utilização de robôs, máquinas-ferramentas com comando numérico (MFCN), controladores lógicos programáveis (CLPs) e sistemas de desenhos auxiliados por computador (CAD), interligados com os processos de manufatura por intermédio de redes de comunicação industriais. As integrações dos departamentos permitem automatizar as plantas industriais, desde o desenvolvimento do produto até sua fabricação, proporcionando melhor qualidade, redução do tempo de lançamento, versatilidade e flexibilidade da produção.

Segundo BILHA (2006) o processo de soldagem a ponto por resistência elétrica (PSRE) vem sendo utilizado na indústria automobilística a varias décadas, sendo atualmente o processo mais aplicado, na união dos variados tipos de conjuntos de peças em chapas de aço, que compõem a carroçaria. Em comparação ao processo de soldagem por arco elétrico, o PSRE tem como vantagens principais, proporcionar menor aquecimento às partes unidas, uma vez que a fusão é restrita apenas ao local

de formação do ponto, não acrescentar peso extra ao produto, uma vez que não utiliza metal de adição, e principalmente proporcionar custo reduzido comparado aos outros processos de soldagem como, por exemplo, soldagem a Laser. Principalmente em função do aprimoramento dos microprocessadores eletrônicos, e da redução de custos deste componente, os microprocessadores foram aos últimos anos, incorporados aos equipamentos de soldagem, adicionando diversos recursos de programação e de controle de processo. Avanço em componentes distintos, como transformadores de soldagem, que trabalham com alta frequência, com o objetivo de reduzir o peso e o tamanho, possibilitou que os equipamentos de soldagem pudessem ser manipulados por robôs. A integração dos robôs com os controladores de soldagem acrescentou repetibilidade, reprodutividade, e confiabilidade no processo de soldagem por resistência (VARGAS, 2006).

Outras funções como o controle de qualidade da soldagem, em tempo real, e a comunicação em rede com computadores, vem sendo nas últimas décadas, incorporadas nos controladores, o que permite que problemas de qualidade, sejam detectados e corrigidos ainda durante o processo de soldagem, reduzindo a necessidade de testes destrutivos, os quais normalmente são de custos elevados, pois devido às características do teste, as peças não são reaproveitadas, e também de caráter reativo, pois os defeitos são detectados, somente após algum tempo que a peça foi produzida. Outra desvantagem do teste destrutivo é ser realizado por amostragem pequena em relação ao total de unidades produzidas, gerando um alto risco de avaliação incorreta.

A competitividade das indústrias automobilísticas fomenta objetivos ousados na redução de custos nos processos de desenvolvimento, manufatura e de garantia do produto. Uma das possíveis abordagens para redução de custo se dá pelo mapeamento do fenômeno que ocorre na soldagem a ponto por resistência elétrica, denominado de corrente de “shunt”. Neste caso a corrente elétrica de fuga, não contribui para a formação do ponto de solda, sendo totalmente desperdiçada durante o processo de soldagem.

## **1.2 Situação problema**

São realizados em um automóvel denominado de “popular”, em média de 4000 a

5000 pontos de soldas. Durante a execução da união, realizada por meio do processo de soldagem a ponto por resistência elétrica, ocorre o desvio de parte da corrente elétrica pelos pontos adjacentes. A corrente elétrica desviada é denominada de corrente de “shunt”, a qual não contribui na geração de calor necessário para a fusão do ponto de solda”. Conseqüentemente, a corrente elétrica de “shunt” induz uma perda de energia durante o processo de soldagem. As distâncias mínimas entre os pontos de solda, recomendadas pelo Standard Ford BA-013-14 e pelo “Resistance Welding Manual” (RWMA) são determinadas empiricamente, com o objetivo de minimizar a corrente de shunt. Pretende-se com este estudo determinar a curva da intensidade de corrente de “shunt” em função da variação da distância entre os pontos de solda, para um determinado componente, onde situações equivalentes ou ser base para novas condições de união, reduzindo o desperdício de energia elétrica e o potencial de falhas na fusão do botão de solda.

### **1.3 OBJETIVOS**

#### **1.3.1 Objetivo Geral**

Avaliar a existência de correlação entre a corrente de Shunt, o espaçamento entre pontos e a resistência dinâmica durante a soldagem a ponto por resistência elétrica em chapa de aço de baixo teor de Carbono de espessura de 0,8 mm.

#### **1.3.2 Objetivos Específicos**

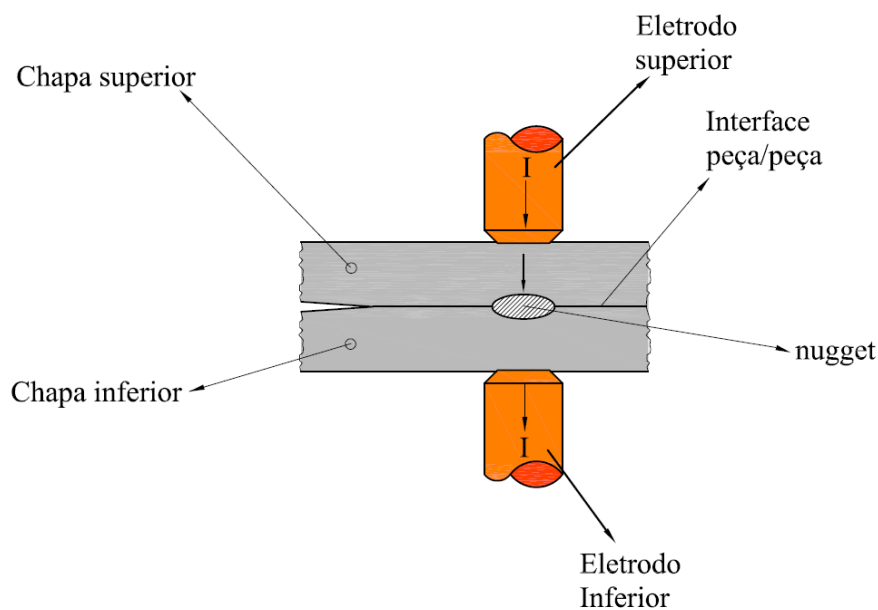
- a) Determinar a correlação entre a corrente de “shunt” e a distância entre os pontos de solda, pela avaliação indireta da geometria da zona fundida.
- b) Mapeamento de resistência dinâmica de contato do ponto de solda ( $R_d$ ), pelo método de GEDEON, com os parâmetros de corrente e tensão elétrica, coletado no primário da fonte de soldagem.
- c) Propor um sistema de gestão do banco de dados das informações de ( $R_d$ ) do processo de soldagem como, históricos de tendências e controles estatísticos de processo mapeado para um componente, visando monitorar a qualidade dos pontos

de solda em tempo real, e prover rastreabilidade do processo de união em determinado componente.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Conceitos e princípio de funcionamento da Soldagem a Ponto por Resistência Elétrica

O princípio básico da soldagem a ponto por resistência elétrica, conforme ilustrado na Fig. 2.1, consiste na passagem da corrente elétrica de soldagem ( $I$ ), entre o eletrodo superior e eletrodo inferior, que exercem uma força de compressão entre as chapas, e devido à existência de uma resistência elétrica na interface de contato, ocorre à geração do calor por efeito Joule durante a passagem da corrente elétrica. A taxa de aquecimento deve ser suficientemente intensa para gerar a fusão no local da interface entre as chapas, surge uma região denominada zona fundida (ZF) ou “nugget”/lentilha, neste momento a corrente de soldagem é interrompida, mas os eletrodos permanecem exercendo a força de compressão até que o metal fundido se solidifique (ASW, 1993; MACHADO, 1995).



**Figura 2.1** – Representação de um processo de soldagem por resistência elétrica a ponto (modificado de AWS 1997)



Segundo AWS (1997) a energia térmica gerada durante este processo pode ser calculada pela lei de Joule, conforme demonstrado na equação 1.

$$Q = I^2 \times R \times t \quad (1)$$

Onde:

Q = Calor em Joules gerado durante a soldagem (J);

I = Corrente elétrica de soldagem em (A);

R = Resistência elétrica de soldagem em ( $\Omega$ );

t = Tempo de imposição da corrente de soldagem em (s).

Quando a corrente de soldagem (I) não for constante, a energia térmica será calculada conforme equação 2 (ASM, 1993).

$$Q = \int_0^t I^2 R dt \quad (2)$$

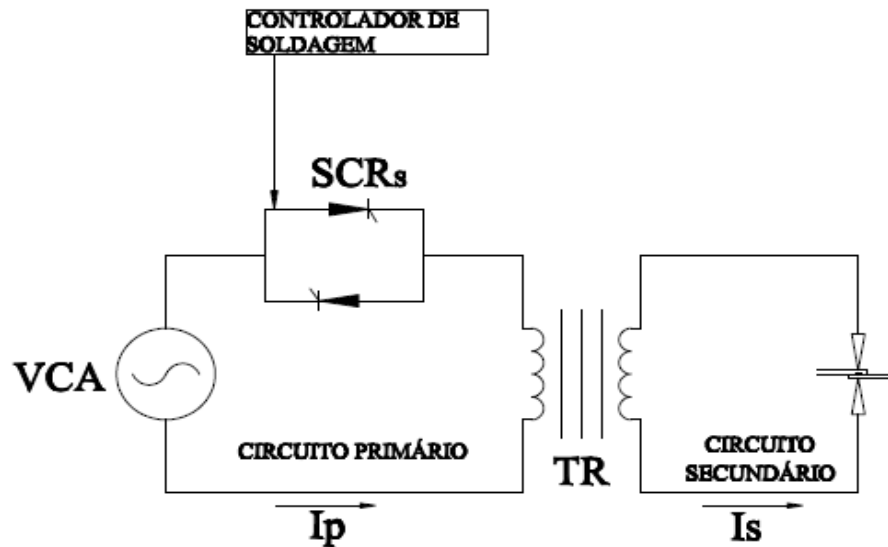
Nas equações 1 e 2, a corrente de soldagem tem um efeito muito maior na geração de calor do que a resistência ou o tempo, devido a sua influência quadrática e este efeito torna a corrente de soldagem um importante parâmetro a ser controlado no processo de soldagem a ponto por resistência elétrica. Durante o período de soldagem, a resistência elétrica de contato não permanece constante, em parte devido à variação de temperatura e pela alteração das resistências das interfaces das chapas, durante o período de formação da zona fundida (ROSSI, 2007).

## **2.2 Principais componentes de um equipamento de soldagem a ponto por resistência elétrica**

Conforme ilustrado na figura 2.2 o equipamento de soldagem por resistência elétrica é composto dos seguintes componentes:

- Transformador de soldagem (TR);
- Retificador Controlado de Silício, (Silicon Controlled Rectifier, SCR);
- Controlador de soldagem;

- Pinça de soldagem.

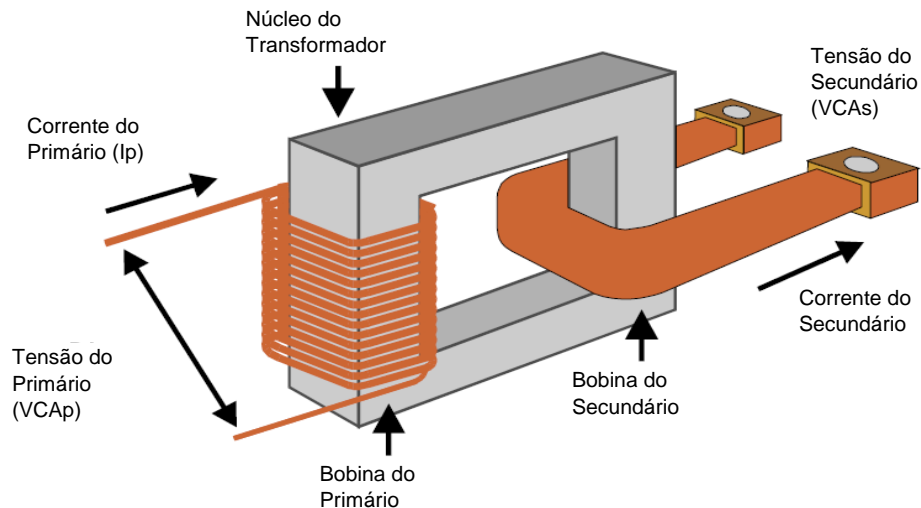


**Figura 2.2** – Representação esquemática dos principais componentes de um equipamento de soldagem por resistência elétrica.

### 2.2.1 Transformador de soldagem

O funcionamento do transformador é baseado no princípio da indução magnética descoberta por Faraday em 1831. Conforme demonstrado na Fig. (2.3), o transformador de soldagem, constitui de uma ou mais bobinas de fio no primário e uma ou mais bobinas de fio no secundário. As bobinas são enroladas em um núcleo, normalmente de silício ou hipersil, e não possuem nenhuma conexão elétrica entre o primário e secundário. Quando uma corrente alternada ( $I_p$ ) é aplicada no primário do transformador de soldagem, a passagem da corrente elétrica na bobina induz um fluxo magnético proporcional ao número de espiras do primário, este fluxo magnético induz uma tensão na bobina do secundário (VCAs) do transformador proporcional ao número de espiras. O primário do transformador de soldagem é conectado a uma fonte de potência (VCAp) que é ajustada pelo controlador de soldagem. Os transformadores de soldagem são fabricados em variados tamanhos, os quais estão intrinsecamente ligados as suas potências elétricas. Os transformadores são produzidos com potências de 5 a 500 kVA, normalmente acima de 15 kVA os transformadores são refrigerados a água nos enrolamentos primários e secundários,

pois devido à alta intensidade de corrente elétrica que circula nas bobinas, ocorre à elevação da temperatura no núcleo do transformador podendo causar danos nas bobinas (RWMA, 2003).



**Figura 2.3** - Representação de um transformador de um equipamento de soldagem por resistência elétrica ( adaptado de CMW, 2006)

### 2.2.2 Retificador controlado de silício (SCR)

O retificador controlado de silício (SCR) foi introduzido nos equipamentos de soldagem por resistência em 1960. É um componente eletrônico composto por três terminais, sendo o 1º e o 2º, denominados ânodo (A) e cátodo (K), e o terceiro terminal de gatilho, é através do qual se aplica um pulso de tensão que provoca o "disparo" do dispositivo, que análogo a uma chave elétrica, permite a passagem da corrente elétrica entre o catodo e anodo energizando o transformador de soldagem. Os SCRs para operarem em fontes de tensão alternada (VCA) são conectados em pares invertidos para conduzirem a tensão alternada de forma completa. Os gatilhos dos SCRs estão interligados ao controlador de soldagem, que sincronizado com a rede de alimentação, controla o exato tempo dos disparos dos SCRs de acordo com a potência programada no controlador de soldagem. Os SCRs em conjunto com o controlador de soldagem, têm a função de ajustar a intensidade de corrente de soldagem, por intermédio do ajuste da tensão no primário do transformador de soldagem. Para correntes acima de 100 A, os SCRs costumam ser refrigerados

a'água ou por ventilação forçada para evitar a queima devido ao aquecimento excessivo (ASM, 1993; RWMA, 2003).

### **2.2.3 Controlador de soldagem**

O controlador de soldagem é um dispositivo eletrônico, onde estão conectados todos os sinais de acionamentos e sinais de saídas do equipamento de soldagem. Os controladores de soldagem ajustam a intensidade de corrente de soldagem por intermédio do controle da variação do tempo do disparos dos gatilhos dos “SCRs”. O tempo de disparo dos SCR's é proporcional ao valor de corrente programado no controlador de soldagem e em função deste tempo préprogramado, os SCR's energizam o secundário do transformador de soldagem (TR) com a devida intensidade de tensão elétrica, promovendo uma corrente elétrica no primário ( $I_p$ ), que por indução magnética no transformador de soldagem, induzirá uma corrente de soldagem ( $I_s$ ) no secundário do equipamento. No início da década de 80, os fabricantes de equipamentos de soldagem começaram a incorporar os circuitos microprocessados nos controladores de soldagem. Com isto, os controladores de soldagem foram reduzindo de tamanho devido ao menor número de componentes, promovendo assim, a redução da probabilidade de falhas e os tornando mais confiáveis. Os microprocessadores, também permitiram que muitas funções avançadas de programação fossem incorporadas nos controladores de soldagem, melhorando significativamente a qualidade do ponto de solda. A tecnologia também permite que os controladores de soldagem se comuniquem por intermédio de redes de comunicação industriais, com outros dispositivos, robôs e demais equipamentos de automação, promovendo com isto mais flexibilidade ao processo de soldagem. Devido aos microprocessadores operarem com velocidades de processamento elevadíssimas, os tempos programados dos parâmetros de processo de soldagem, possuem alta precisão, tornando possível a monitoração e correção da corrente de soldagem, em tempo real. Adicionalmente a programação dos parâmetros de soldagem se tornou bastante flexível e amigável. Como a grande maioria dos controladores de soldagens se comunica por intermédio de redes industriais, um computador pessoal (PC) pode fazer parte desta rede, e a programação dos parâmetros de soldagem pode ser realizada por intermédio do PC, onde usualmente deverá conter um “software” dedicado para esta função (RWMA, 2003).

## **2.2.4 Configurações de montagem das fontes de soldagem**

Os equipamentos de soldagem são fabricados em diversas configurações de montagem para atenderem a necessidades específicas de determinados produtos, mas basicamente a grande maioria dos equipamentos de soldagem são fabricados em três configurações de montagem descritas a seguir:

- Fonte de soldagem fixo ou pedestal;
- Fonte de soldagem multiponto;
- Fonte de soldagem portátil.

### **2.2.4.a Fonte de soldagem fixo ou pedestal**

Os equipamentos de soldagem fixos também denominados de pedestais são usualmente utilizados em processo de soldagem a ponto ou de projeção. Normalmente são utilizadas para peças de pequeno porte, onde estas são manipuladas por operadores que transportam a peça, fixando entre os eletrodos do equipamento de soldagem. Como geralmente as peças, estão nas mãos dos operadores durante o processo de soldagem, o acionamento do equipamento de soldagem é realizado por um dispositivo denominado de pedal, o qual é acionado com o pé do operador (AWS, 1993).

### **2.2.4.b Fonte de soldagem multiponto**

Os equipamentos de soldagem multiponto são usualmente aplicados em peças de grande porte onde é necessário realizar uma grande quantidade de soldas e o processo exige um elevado nível de produção. O equipamento é composto de vários eletrodos de soldagem, e também pode possuir vários transformadores de soldagem, como as soldagens são realizadas simultaneamente, normalmente o equipamento consome uma elevada intensidade de energia elétrica (RWMA, 2003).

### 2.2.4.c Fonte de soldagem portátil

Os equipamentos portáteis que são utilizados para soldagem a ponto, também são denominados de pinças de soldagem. São equipamentos que podem ser manipulados por operadores ou ser instalados nos braços de robôs. Oposto ao conceito do equipamento estacionário, a pinça de soldagem é transportada até a peça na posição onde o ponto de solda será efetuado, e a pinça é deslocada para realizar os pontos de soldas subsequentes. Para permitir esta portabilidade, usualmente o transformador de soldagem é montado separado da pinça para o peso seja reduzido. Como a pinça está a certa distância do transformador de soldagem, a corrente de soldagem do secundário do transformador é transmitida por um cabo elétrico, denominado de cabo de soldagem. Estes cabos de soldagem são fabricados com baixa resistência elétrica para evitar perdas de energia durante o processo de soldagem, e para minimizar o efeito Joule, normalmente é refrigerado a água. As pinças de soldagem são fabricadas em diversos tipos de configuração para atenderem a determinada necessidade, mas basicamente são compostas dos seguintes componentes;

a) Pistões pneumáticos, que têm a função de exercer a força de compressão dos eletrodos durante o processo de soldagem;

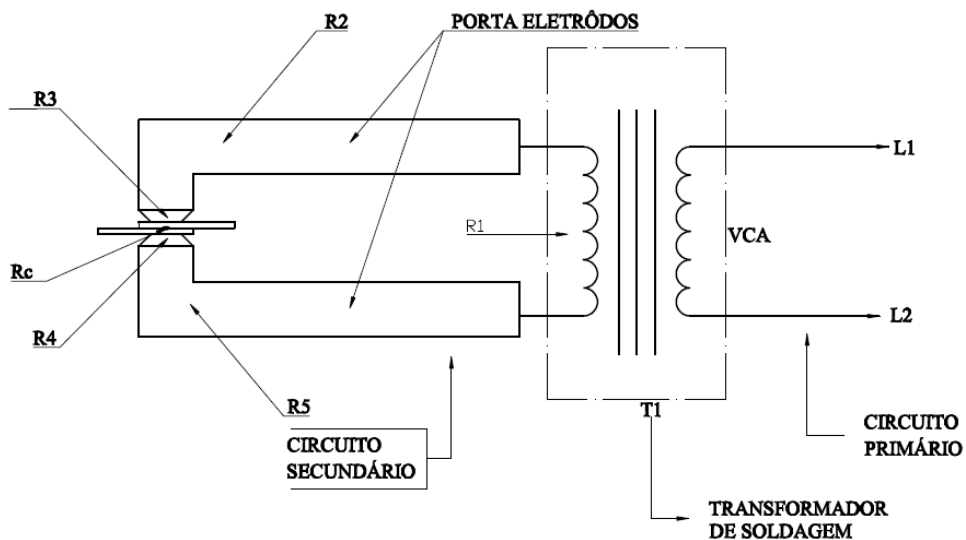
b) Braço de soldagem tem a função de transmitir o movimento do pistão e seu desenho deve ser adequado ao formato da peça para facilitar o acesso dos eletrodos;

c) Porta eletrodo tem a função de aproximar os eletrodos os mais próximos possíveis da peça, e também são suportes para a fixação dos eletrodos;

d) Eletrodo é por onde a corrente de soldagem é transmitida para a peça durante a conformação da zona fundida. Deve possuir alta condutividade, para minimizar as perdas de corrente elétrica, e suportar a alta temperatura que é produzida durante a soldagem. Devido à alta intensidade de corrente elétrica que circula pela pinça de soldagem, normalmente todos os seus componentes são refrigerados a água. Os materiais e desenhos dos eletrodos são normalizados pela RWMA e “International Standards Organization” (ISO), pelo “Standard” ISO 5182 (ASM, 1993; RWMA, 2003).

A figura 2.4 representa um circuito secundário de um típico equipamento de soldagem, onde se verifica uma série de resistências desde o transformador até a

interface entre as duas chapas metálicas a serem unidas. Assim, devido a todas as resistências elétricas estarem em série, à resistência total expressa na equação 1 representa a somatória de todas as resistências do circuito secundário do equipamento de soldagem. Como a resistência  $R_c$ , denominada de resistência de contato, tem um valor muito superior a todas as outras resistências, estas resistências podem ser consideradas como desprezíveis, desta forma, o calor gerado na superfície de contato das peças é maior do que em qualquer outro ponto localizado no circuito secundário, sendo a resistência de contato a principal responsável pela geração de calor na região da fusão do ponto de solda (BRANCO, 2004).



Onde:

- $R_1$  = Resistência do secundário do transformador de soldagem;
- $R_2$  e  $R_5$  = Resistência dos portas eletrodos;
- $R_3$  e  $R_4$  = Resistência dos eletrodos;
- $R_c$  = Resistência de contato.
- $L_1$  e  $L_2$  = Fonte de alimentação de energia elétrica.

**Figura 2.4** - Representação esquemática das resistências no secundário de um típico equipamento de soldagem por resistência elétrica.

### 2.2.5 Eletrodos

Segundo Vargas (2006), os eletrodos são para o processo de soldagem, uns dos componentes mais importantes. Por desempenharem um papel vital na geração de calor, por meio da condução da corrente de soldagem até o componente a ser soldado. Durante todo o processo de soldagem, os eletrodos exercem uma força de compressão no local da peça onde ocorrerá a formação do ponto de solda, com o objetivo de unir por soldagem as superfícies dos componentes, garantindo uma resistência de contato apropriada para que ocorra por efeito Joule uma fusão adequada. O cobre devido a sua alta condutividade, é o metal base utilizado na fabricação dos eletrodos, outros metais são adicionados com o objetivo de acrescentar dureza nos eletrodos, ou para induzir outras características mecânicas ou elétricas exigidas pelo processo, em função dos materiais a serem soldados (AWS, 1997).

Segundo a RWMA (2003) os eletrodos aplicados no processo de soldagem por resistência elétrica, são subdivididos em vinte classes, onde cada classe atende um determinado grupo de aplicação, e as divisões das classes são definidas em função das seguintes características: material a ser soldado, intensidade de corrente de soldagem, força de compressão e condutividade. Além do tipo de material, os eletrodos são fabricados em diversas formas geométricas, para atender a um abrangente número de componentes diferenciados, que são unidos pelo processo de soldagem por resistência elétrica, durante a produção da carroceria na indústria de automóvel.

O tempo de vida dos eletrodos normalmente é determinado em função do número de soldas que ele pode realizar. Durante o processo de soldagem, os eletrodos são submetidos a altas intensidades de correntes, forças de compressão e altas temperaturas. Estes fatores contribuem diretamente no tempo de vida dos eletrodos, alterando suas características físicas, mecânicas e geométricas (VARGAS, 2006). Alguns controladores de soldagem possuem contadores programáveis, que quantificam o número de soldas realizadas pelo eletrodo, onde internamente é programada uma curva de incremento de corrente elétrica, que acrescenta um valor pré-programado na corrente de soldagem, conforme ocorre o desgaste do eletrodo. Quando o contador de pontos atinge o final da curva de

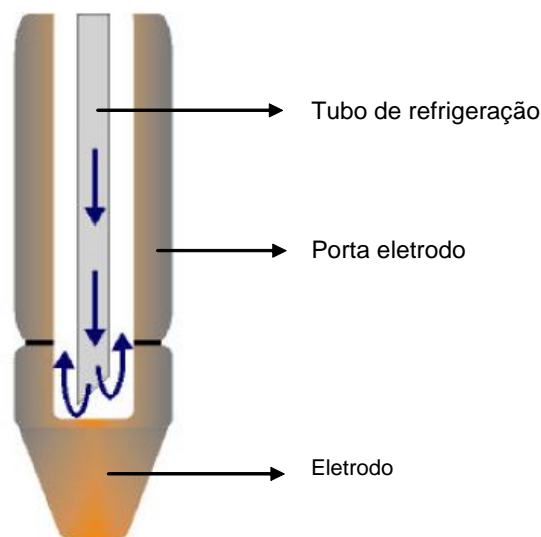


incremento de corrente, o controlador envia um sinal ao processo para que seja realizado o reparo ou a troca do eletrodo.

Nas indústrias de automóvel a utilização de aços galvanizados atraiu ampla atenção durante na última década, devido à sua boa resistência à corrosão e custo relativamente baixo. Isto resultou na dificuldade da soldagem, devido à baixa resistência elétrica superficial do aço galvanizado, o qual exige altas correntes de soldagem, reduzindo à vida útil dos eletrodos (CHEN, 2006).

A evolução das ligas utilizadas na fabricação dos eletrodos, acompanha e é induzida pelo desenvolvimento dos metais utilizados na construção dos automóveis. A utilização de aços de elevada resistência “Advanced High Strength Steel” (AHSS) na indústria de automóvel, registrou um aumento de cerca de 50% nas últimas décadas, grandes montadoras estão usando AHSS para melhorar o desempenho da estrutura em caso de impacto, reduzindo o peso e aumentando a rigidez estrutural. Na América do Norte, a utilização destes materiais tem sido impulsionada, em parte, pela necessidade de atender rigorosas normas de segurança para esmagamentos das carrocerias (KOGANTI, 2010).

Os eletrodos, devido à alta temperatura em que são submetidos, geralmente possuem um sistema de refrigeração a água, por intermédio de um circuito fechado, onde o fluido circula para que seja realizada a troca de calor. A figura 2.5 é uma representação de um sistema de refrigeração de eletrodos, observa-se nesta figura que água circula pelo interior do eletrodo, através de tubos de cobre, o qual deve estar o mais próximo possível do eletrodo, para se obtenha a máxima eficiência da refrigeração. O fluido refrigera primeiro o eletrodo, pois é o componente que realiza a troca térmica em contato com a peça na área de fusão, e retorna pelo lado externo do tubo refrigerando os demais componentes do equipamento de soldagem. Usualmente outros componentes da fonte de soldagem como: porta eletrodo, pinça de soldagem, SCRs e transformador de soldagem, são também refrigerados através da circulação da água (RWMA, 2003). O volume da vazão e a temperatura da água são de fundamental importância tanto para o tempo de vida do eletrodo quanto para qualidade da zona fundida. Temperaturas elevadas deformam os eletrodos alterando suas propriedades mecânicas e físicas, e como consequência aumenta a resistência de contato, reduzindo a intensidade da corrente de soldagem (VARGAS, 2006).



**Figura 2.5** - Representação de um sistema de refrigeração do eletrodo de um equipamento de soldagem por resistência elétrica (adaptado de CMW, 2006)

É recomendado pela RWMA (2003), para os equipamentos de soldagem por resistência elétrica, que a vazão da água de refrigeração seja de 3,8 l/min e a temperatura na faixa de 20 a 26 ° C. A condutividade elétrica do material do eletrodo, varia inversamente proporcional à temperatura, conforme demonstrado na tabela 2.1, logo, é importante, que o sistema de refrigeração dos eletrodos esteja em perfeito estado de funcionamento, mantendo os eletrodos na menor temperatura possível, evitando o sobre aquecimento dos mesmos e consequentemente a perda de energia durante o processo de soldagem.

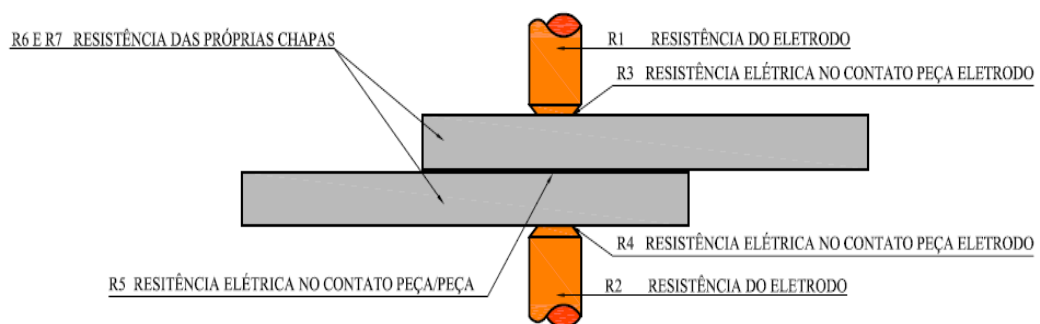
**Tabela 2.1** – Efeito da temperatura em relação à condutividade dos eletrodos, comparando o cobre e os eletrodos classe 1 e 2

Temperatura		Condutividade (% IACS)		
		Cobre	Eletrodo	
° C	° F		Classe 1	Classe 2
-45	-49	139	128	113
-40	-40	134	123	110
-35	-31	130	120	108
-30	-22	127	117	105
-25	-13	124	115	103
-20	-4	121	112	101
-15	5	118	110	99
-10	14	115	118	97
-5	23	113	106	95
0	32	111	104	94
5	41	108	102	92
10	50	106	99	90
15	59	103	97	88
20	68	101	95	87
25	77	98	93	85

### 2.3 Resistência de contato

A resistência de contato na interface das chapas é a fonte fundamental de aquecimento pelo efeito Joule para metais de alta condutibilidade elétrica, devido ao seu efeito direto na geração de calor. Conforme demonstrado na figura 2.6, a resistência de contato compõe a somatória de sete resistências. Observa-se a existência de três resistências de interfaces, onde a resistência  $R_5$  (denominada de interface “peça/peça”), é a que efetivamente contribui para a geração do calor para a formação da zona fundida, às outras duas resistências são representadas por  $R_3$  e  $R_4$ , denominadas de interface “eletrodo/peça”, como estas resistências não contribuem para a geração de calor, devem ter o valor o mais baixo possível para não induzirem perda de energia por efeito Joule, durante o processo de soldagem.

A força de compressão, que é aplicada pelos eletrodos nas chapas, possui um efeito inversamente proporcional em relação à resistência elétrica de contato, ou seja, quanto maior a força exercida pelos eletrodos menor será o efeito resistivo da interface peça/peça, pois o aumento da força de compressão dos eletrodos contribui para minimizar as irregularidades, deformações e rugosidades das superfícies das chapas, tornando mais eficiente o contato da interface peça/peça, e como consequência disto o valor de  $R_5$  sofre uma sensível redução (KAISER, 1982; STOCCO, 2003).



**Figura 2.6** – Representação da composição das resistências elétricas na área de contato entre os eletrodos e a peça (adaptado de STOCCO,2003)

## 2.4 Classificações dos processos de soldagem por resistência elétrica

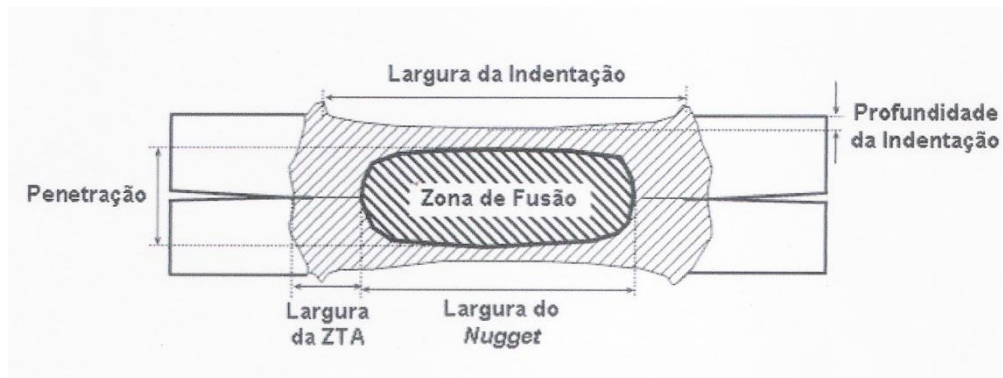
O processo de soldagem por resistência elétrica pode ser aplicado em diversos tipos de materiais, mas normalmente as aplicações industriais se concentram nas utilizações de aços carbono de baixa e média liga, aços inoxidáveis e alumínio.

Segundo Modenesi et al. (1996), existem diversos processos de soldagem por resistência elétrica, sendo os relacionados abaixo os mais utilizados pelas as indústrias metalúrgicas:

- Soldagem por ponto (Resistance Spot Welding – RSW)
- Soldagem por projeção (Resistance Projection Welding – RPW)
- Soldagem por costura (Resistance Seam Welding - RSEW)
- Soldagem por resistência em alta freqüência (High Frequency Resistance Welding – HFRW)
- Soldagem a topo
  - Por resistência (Upset Welding – UW)
  - Por centelhamento (Flash Welding – FW)

Observa-se que o processo de soldagem a ponto é utilizado em aproximadamente 95% das uniões adotadas na montagem de carrocerias, denominado de “carro popular”, em uma indústria automobilística. A soldagem por projeção também é utilizada, mas em quantidades reduzidas, principalmente na fixação de porcas e parafusos na chaparia dos automóveis.

Conforme demonstrado na figura 2.7, após o resfriamento do ponto de solda, duas regiões distintas são formadas, a primeira chamada de “nugget” ou “lentilha”, que representa propriamente a zona fundida (ZF), e a segunda denominada de zona termicamente afetada (ZTA). Assim o ponto de solda é composto por a ZT mais á região da ZTA (NAKANO, 2005). Outra consideração importante sobre o ponto de solda é a indentação, este efeito resulta da força de compressão que os eletrodos exercem sobre o material superaquecido durante o processo de soldagem. Adicionalmente poderá ocorrer a expulsão de parte do material fundido durante parte do período de soldagem, devido à força de compressão dos eletrodos, reduzindo o volume da lentilha (ROSSI,2007).



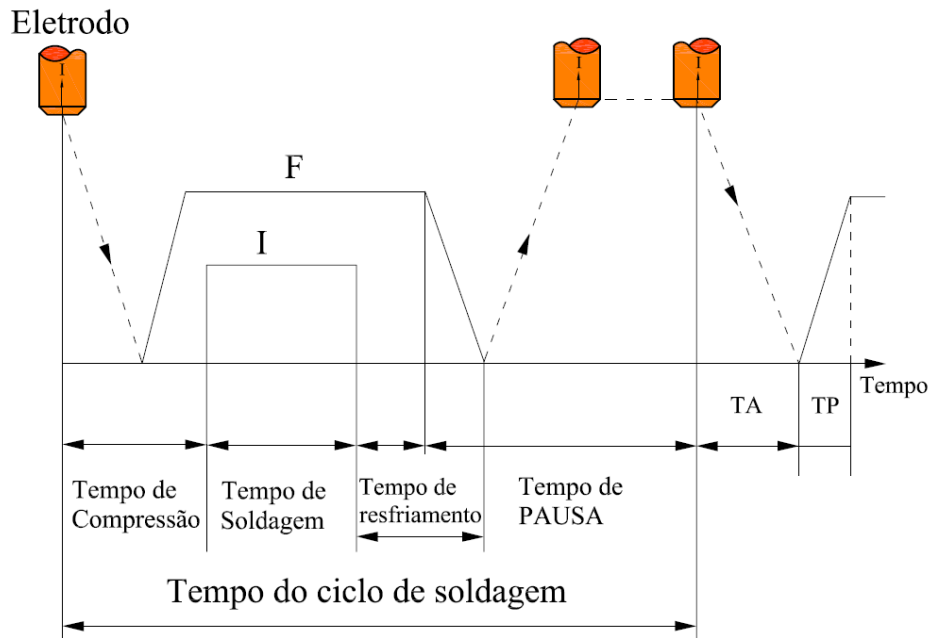
**Figura 2.7** - Detalhes das regiões do processo de soldagem a ponto (ROSSI, 2007)

A soldagem por resistência elétrica é utilizada na fabricação de peças e conjuntos, a partir de chapas metálicas finas, com espessura de até 3 mm. Em casos especiais, são usadas em peças de aço de até 6 mm, embora nestes casos, a soldagem a arco elétrico possa ser mais vantajosa, já que para chapas espessas o processo de soldagem por resistência elétrica exige equipamentos de soldagem com potência muito elevada e, conseqüentemente, com custos elevados e alto consumo de energia elétrica quando comparado com a soldagem á arco (MONDENESI et al., 1996).

## **2.5 Parâmetros de processo de soldagem por resistência elétrica programável nos controladores de soldagem**

Observa-se que os parâmetros de soldagem são variáveis de processo que podem ser programadas nos controladores dos equipamentos de soldagem, para realizarem a união conforme especificação do projeto. Os parâmetros de soldagem possuem uma forte integração entre si, portanto uma adequada combinação resultará em uma solda com qualidade. Com a evolução da eletrônica, os fabricantes de equipamento de soldagem incorporaram diversos parâmetros programáveis nos controladores dos equipamentos de soldagem por resistência, tornado a programação mais flexível e, consecutivamente, promovendo maior robustez no processo de soldagem. Na figura 2.8, estão representados os principais parâmetros envolvidos na soldagem a ponto por resistência elétrica. Estes são os parâmetros básicos compartilhados por grande parte dos fabricantes de equipamento de soldagem. Existem controladores de soldagem micro processados

que permitem que sejam programadas em torno de 50 diferentes parâmetros de soldagem para centenas de tarefas, esta flexibilidade proporciona um maior poder de controle das variáveis do processo de soldagem (PAES et al., 1989).



Onde:

- F = Força de compressão dos eletrodos (N);
- I = Corrente de soldagem (A);
- TA = Tempo de acostamento dos eletrodos (s);
- TP = Tempo de pré-pressão dos eletrodos (s).

**Figura 2.8** – Representação de um ciclo de soldagem por resistência elétrica a ponto (adaptado de ROSSI, 2007)

## 2.6 Base de tempo dos parâmetros de soldagem utilizada pelos fabricantes de equipamento de soldagem

Os controladores de soldagem incorporam em seus processadores, programas que simulam temporizadores internos para os diversos parâmetros de soldagem, isto permite que o equipamento de soldagem seja ajustado para uma determinada condição de união. A base de tempo dos parâmetros de soldagem, adotada pelos fabricantes, é denominada de “ciclo”, isto devido aos temporizadores internos dos controladores de potência utilizar o período (tempo) do ciclo da rede de energia elétrica, em que o equipamento de soldagem está instalado, como base de contagem para sua temporização. Considerando como exemplo que o equipamento

esteja instalado em uma rede elétrica de 60 Hz e sendo o período o inverso da frequência, conforme demonstrado na equação 3, neste caso, cada “ciclo” vai equivaler ao período de tempo aproximado de 0,017 segundos, esta será a base de tempo para os ajustes dos parâmetros de soldagem para o controlador. Para todos os parâmetros de soldagem programáveis neste controlador, o valor do tempo em segundos será o resultado do produto da base de tempo vezes o total de ciclos programado. Segue um método de conversão do parâmetro de soldagem ( $T_s$ ) de ciclo para segundo, como exemplo de aplicação genérica,  $T_s$  foi programado igual a 20 ciclos.

$$P = 1/f \quad (3)$$

Onde:

$P$  = período de tempo ( s );

$f$  = frequência ( Hz ).

Para o parâmetro de soldagem programado em 20 ciclos e considerando que o equipamento esteja instalado em uma rede elétrica de 60 Hz, conforme Eq. (3), o período em (s) será:

$$P = 1/60 = 0,017 \text{ s}$$

O tempo total de soldagem ( $T_s$ ) será o período do ciclo ( $P$ ) vezes o valor do ciclo de soldagem programado ( $cp$ ), conforme exemplo anterior igual a 20 ciclos:

$$T_s = cp \times P$$

$$T_s = 20 \times 0,017 = 0,34 \text{ s}$$

Pode-se verificar no exemplo anterior, que o tempo de soldagem programado em 20 ciclos, representa um período de tempo de soldagem equivalente a 0,34 s.

### **2.6.1 Tempo de compressão**

Considera-se como tempo de compressão o tempo em ciclos entre a aplicação inicial da força do eletrodo, que ocorre logo após a partida do equipamento, até o

início da aplicação da corrente de soldagem. Por sua vez o tempo de compressão se divide em duas etapas, tempo de acostamento e tempo de pré-pressão. Nesse caso o tempo de acostamento é o tempo que os eletrodos demoram desde a sua posição inicial, afastado das chapas, até entrar em contato com a peça. Finalmente o tempo de pré-pressão é o tempo que o eletrodo demora depois de entrar em contato com a peça para atingir a força de compressão necessária para realizar a soldagem. O tempo de pré-pressão é utilizado para atrasar a corrente até que o metal base tenha sido submetido ao valor de força do eletrodo determinada. Se a corrente de soldagem for ligada antes que esta força seja atingida, isto significará que o parâmetro de pré-pressão estará muito baixo, tendo como resultado a expulsão de metal fundido, também denominado de respingo de solda, tal instabilidade pode causar danos materiais e físicos dentro da área de abrangência da operação. Se a corrente de soldagem for iniciada logo após os eletrodos atingirem a pressão determinada, o resultado esperado é uma solda com qualidade.

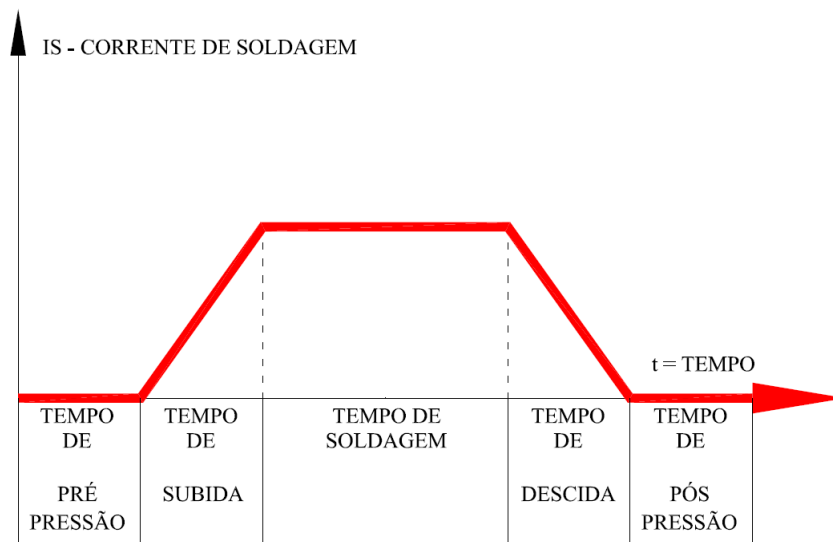
As pinças de soldagem são usualmente fabricadas com pistões pneumáticos acionados por circuito eletropneumáticos, estes componentes mecânicos não possuem uma grande precisão de repetitividade de tempo de acionamento e movimento. Portanto variações de tempo de acionamento em milissegundos, são intrínsecas nestes componentes, estas variações quando descontroladas, podem comprometer a qualidade do processo de soldagem. Normalmente estas variações de acionamento, são absorvidas no processo de soldagem com o incremento do tempo de compressão no controlador de soldagem. O excesso do tempo de pré-pressão pode tornar-se não adequado para o processo de soldagem, podendo comprometer sua capacidade produtiva, devido ao aumento do ciclo de soldagem, sem agregar valor na qualidade da zona fundida (ASM, 1993; BRANCO, 2004).

### **2.6.2 Tempo de soldagem**

Considera-se como tempo de soldagem o tempo em ciclos em que o sistema libera o fornecimento da corrente de soldagem para a realização do ponto de solda. Basicamente o tempo de soldagem orienta-se principalmente na espessura da chapa, tanto mais grossa a chapa, mais tempo devera ter a soldagem. As propriedades físicas e características metalúrgicas dos materiais a serem soldados, também influenciam diretamente no tempo de soldagem. Por exemplo, aços



inoxidáveis devem ter o tempo de soldagem curto para evitar a precipitação de carboneto. Ainda que tempos curtos de soldagem sejam aplicados, algumas características físicas, como a dureza do material e a resistência à corrosão, normalmente são comprometidas durante o processo de soldagem. Dentro deste tempo estão contidos outros parâmetros de soldagem denominados de tempo de subida de soldagem, tempo de descida de soldagem e corrente de soldagem, vide figura 2.9. A relação entre o tempo de soldagem e a corrente de soldagem é inversamente proporcional. Se forem utilizados tempos de soldagem muito curtos, a corrente de soldagem deveria ser alta o suficiente para gerar energia para fundir o material, e caso o tempo de soldagem seja elevado a corrente deve ser baixa para evitar a expulsão da solda (AWS, 1993; FARIA, 2004).



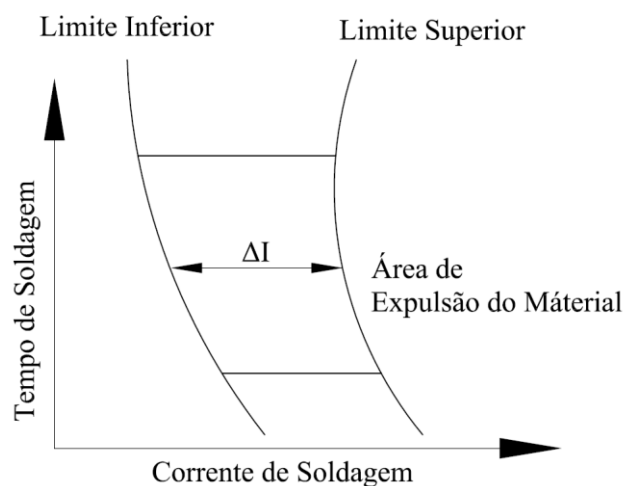
**Figura 2.9** – Representação do ciclo de soldagem (adaptado de FARIA,2004)

### 2.6.3 Corrente de soldagem

A fonte de potência dos equipamentos de soldagem por resistência é encontrada em duas formas, ou seja, com saídas de corrente alternada ou saídas de corrente contínua, em ambas as fontes de potência existem controladores de intensidade de energia que, por intermédio dos parâmetros de soldagem, controlam a densidade de corrente que será fornecida durante o tempo de soldagem. Uma intensidade de corrente suficiente deve ser gerada pela fonte de potência para compensar todas as perdas oriundas das resistências que estão em série com a resistência de contato na região do ponto de fusão. A figura 2.10 ilustra o diagrama do lóbulo de

soldabilidade de uma peça genérica, a janela compreendida entre as linhas do lóbulo, identificada como  $\Delta I$ , indica a região onde as soldas são aceitáveis. Na região abaixo do limite inferior do lóbulo a fusão da solda é considerada incompleta, nesta região não há energia suficiente para que ocorra a formação da zona fundida. Por sua vez, na região acima do limite superior do lóbulo ocorre a expulsão do material, comprometendo a qualidade do ponto de solda.

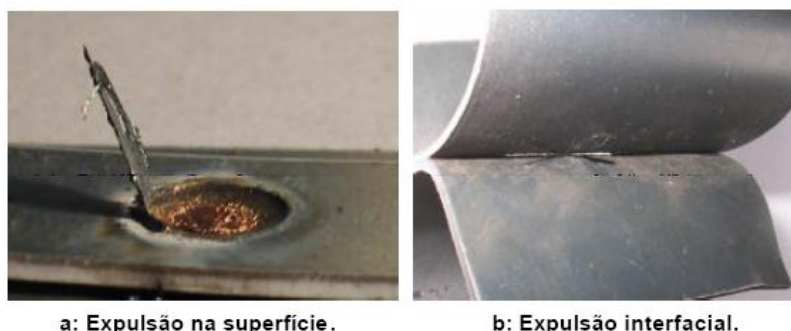
O desalinhamento angular e axial entre os eletrodos implica na redução da região de contato na interface entre os eletrodos e a peça. Assim devido à redução da área de contato, a intensidade de corrente de soldagem torna-se elevada, como consequência os eletrodos penetram profundamente nas chapas causando a expulsão do material fundido, reduzindo a vida útil dos eletrodos e, por fim, soldas com baixa qualidade (ROSSI, 2007; ZHANG et al., 2006).



**Figura 2.10** Lóbulo de soldabilidade, diagrama generalizado da janela de fusão da soldagem por resistência elétrica (adaptado de AWS, 1998)

A expulsão ou respingo de solda, é um importante fenômeno que pode ser observado frequentemente durante o processo de soldagem por resistência. É uma projeção de metal fundido durante a formação do ponto de solda. A expulsão um fenômeno indesejado no processo de soldagem, caso ocorra, resulta em perda de metal do ponto de solda líquido, o qual frequentemente implica em redução das forças de soldagem e efeitos indesejáveis nos equipamentos adjacentes. A expulsão pode ocorrer na superfície do material, conforme demonstrado na figura 2.11(a), em função do excesso de tempo de soldagem ou baixa força de compressão, ou devido a impurezas como óleo e outros contaminantes nas interfaces das superfícies,

conforme demonstrado na figura 2.11(b). É recomendável que estes contaminantes sejam retirados antes que seja realizado o processo de soldagem para que se obtenha uma solda mais uniforme. Tais contaminantes podem ainda permanecer aderido na face dos eletrodos, causando rápida deterioração dos mesmos (INTERMACHINERY, 2003, ZHANG et al., 2006).



a: Expulsão na superfície.

b: Expulsão interfacial.

**Figura 2.11** Exemplos de expulsão de material (BRANCO, 2004)

Há também uma relação entre a força do eletrodo e a densidade de corrente. Neste caso existe um limite superior de densidade de corrente sobre o qual a indentação e expulsão de material ocorrem nas superfícies de uma ou mais chapas, dando origem a soldas de baixa qualidade. A resistência máxima na região do ponto é obtida pela soldagem em densidade de corrente logo abaixo do valor no qual ocorre expulsão. A medida que a densidade de corrente aumenta, o tempo de soldagem deve ser diminuído suficientemente para produzir uma solda sem que haja aquecimento das superfícies de contato dos eletrodos (BRANCO, 2004; INTERMACHINERY, 2003).

#### **2.6.4 Tempo de subida de soldagem**

O tempo de subida de soldagem tem a função de prover um incremento gradual e linear na corrente de soldagem, sendo o mesmo programado em ciclos e contido dentro do tempo de soldagem. Como as condições metalúrgicas e a resistência elétrica de contato entre as chapas variam durante todo o processo de soldagem, é recomendado que a corrente de soldagem tenha um incremento gradual até que venha atingir a corrente total programada. Usualmente este tempo é utilizado para evitar sobre aquecimento dos eletrodos e expulsão do metal durante o

processo de soldagem quando a resistência da interface do metal base é mais elevada. Tempos elevados deste parâmetro além de não contribuir para o incremento da qualidade do ponto de solda, pode comprometer a produtividade devido ao excessivo tempo do ciclo de soldagem (ASM, 1993; AWS, 1998).

### **2.6.5 Tempo de descida da corrente de soldagem**

O tempo de descida da corrente de soldagem é um parâmetro analogamente inverso ao tempo de subida da corrente de soldagem e também está contido dentro do tempo de soldagem é programado em ciclos. Este tempo tem a função de realizar uma diminuição gradual e linear da intensidade da corrente no tempo final da soldagem. O mesmo é utilizado para controlar a solidificação da zona fundida, principalmente em metais que sofreram tratamento térmico (AWS, 1998).

### **2.6.6 Tempo de pós-pressão**

Segundo Branco (2004) e Vargas (2006), considera-se como tempo de pós-pressão, o tempo em que os eletrodos permanecem fechados exercendo uma pressão entre as chapas logo após a finalização da corrente de soldagem. O tempo de pós-pressão permite que o ponto de solda solidifique antes que os eletrodos sejam removidos. Quando este tempo é reduzido os eletrodos são removidos antes que o processo de solidificação seja completado, podendo ocorrer uma movimentação inesperada da chapa resultando num ponto de solda com diâmetro da zona fundida abaixo do especificado ou numa fusão sem união. Este efeito pode ser potencializado com a soldagem de chapas de espessuras finas ou em peças com problema de conformação entre as chapas, gerando esforços residuais no ponto de solda após o afastamento dos eletrodos. Adicionalmente, pode ocorrer a expulsão do material se a corrente ainda estiver fluindo enquanto os eletrodos são removidos. O tempo de pós-pressão deve ser o suficiente para solidificar a zona fundida ainda sob a pressão dos eletrodos, para que no momento em que a pressão dos eletrodos é retirada da peça, a solda resista às forças residuais impostas na peça devido ao processo de soldagem (AWS, 1998).

### 2.6.7 Tempo de pausa

Etapa posterior ao tempo de pós-pressão, é o tempo que inicia no encerramento da pós-pressão, e vai até o início do próximo ciclo de soldagem. Este tempo permite que com os eletrodos abertos, o equipamento ou a peça seja deslocado até a próxima posição de soldagem. Este parâmetro de soldagem não tem influência direta na qualidade do ponto de solda e esta normalmente relacionada com a distância física entre os pontos de solda e a velocidade de deslocamento da peça ou do equipamento de soldagem (NAKANO, 2005).

## 3. MEDIÇÃO DA RESISTÊNCIA DINÂMICA

Segundo Faria (2003), para aços de baixo carbono o valor da resistência elétrica na interface das peças esta grandeza pode variar entre 50 a 500  $\mu\Omega$ , mas para soldagem em matérias como o alumínio pode atingir valores mais reduzidos em torno de 10  $\mu\Omega$ .

Existem controladores eletrônicos de potência que monitoram a corrente de soldagem, por intermédio de bobinas especiais que, normalmente, são instalados no secundário do transformador de soldagem. Para a medição da tensão elétrica, são instaladas sondas o mais próximo possível dos eletrodos de soldagem e, por intermédio destas duas variáveis e do uso da lei de Ohm (demonstrada na equação 3), o controlador de soldagem calcula e registra a curva da resistência dinâmica durante a formação do ponto de solda, conforme demonstrado na figura 2.12.

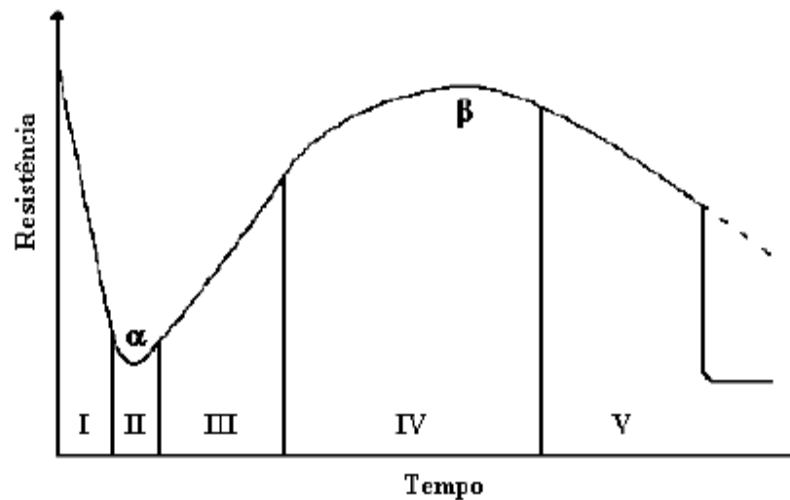
$$V = R \times I \quad (3)$$

Onde:

V = Tensão (V);

R = Resistência ( $\Omega$ );

I = Corrente (A).



**Figura 2.12** Representação da curva de resistência dinâmica (FONSECA, 1999)

A figura 2.12 representa a curva característica da resistência dinâmica de um ponto de solda obtido pelo processo de solda a ponto por resistência elétrica. A curva apresenta seis trechos distintos que estão diretamente ligados com a formação da zona fundida do ponto de solda.

No trecho (I), ocorre uma rápida queda da resistência dinâmica, isto ocorre porque no início do ciclo de soldagem a resistência de contato é alta (devido à presença de impurezas nas interfaces da peça e possíveis micro deformações) na superfície da chapa. Já no início do ciclo de soldagem as impurezas são fundidas e a rugosidade é reduzida devido ao aumento de temperatura das chapas, promovendo assim a diminuição da resistência elétrica entre as interfaces chapa/chapa (FARIA, 2003).

No início do trecho (II) ocorre, ainda, uma diminuição da resistência elétrica, mas de forma mais lenta que no trecho I. Devido à continuidade da passagem de corrente elétrica há um aumento da temperatura na região de contato, que é atribuída ao aumento da vibração dos átomos. Este aumento de temperatura resulta no aumento da resistividade elétrica ocorrendo à inflexão da curva após atingir o ponto mínimo denominado de  $\alpha$  (FONSECA, 1999).

No trecho (III), devido ao crescente aumento de temperatura do metal, ocorre o aumento da resistência elétrica durante todo o seu tempo.

No trecho (IV), a temperatura continua a subir e como consequência há o incremento da resistividade elétrica. É neste trecho que a resistência atinge o pico máximo onde ocorre a inflexão da curva no ponto  $\beta$ . Durante o processo de fusão do

metal, os eletrodos estão exercendo uma força de compressão em todo o ciclo de soldagem neste momento a distância entre os eletrodos é reduzida, esta penetração dos eletrodos (indentação), diminui gradativamente a resistência elétrica na região de contato (FARIA, 2003).

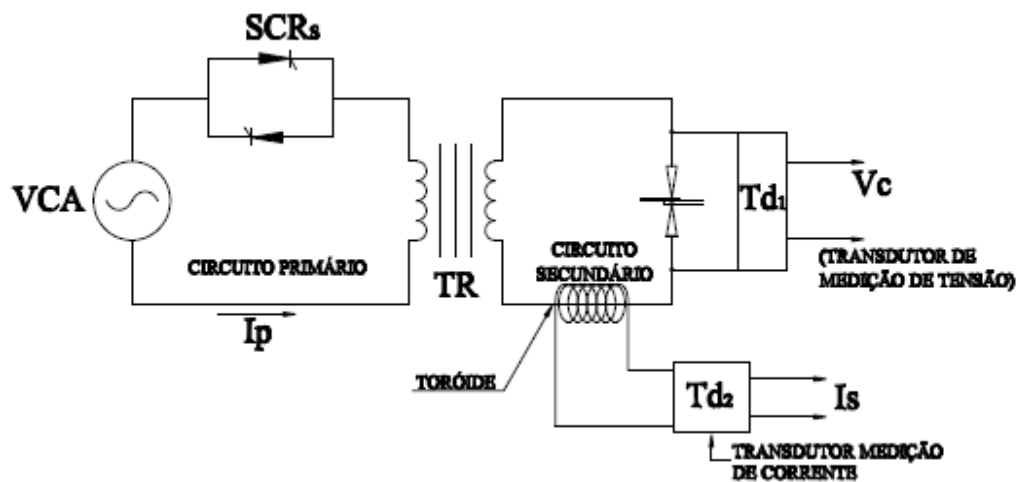
No trecho V, a resistência elétrica continua a tendência de redução por consequência da eliminação completa da interface peça/peça, devido à fusão total do material na região de contato. É neste momento que a zona fundida atinge seu tamanho máximo e a corrente de soldagem deve ser interrompida para evitar a “expulsão de material” (FONSECA, 1999).

Existem controladores de soldagem que monitoram e corrigem a tensão e a corrente do circuito secundário do transformador de soldagem para que estes parâmetros permaneçam constantes durante todo o período de soldagem com o objetivo de manter a intensidade de energia constante durante a formação da zona fundida. Como a resistência de contato varia durante todo o período de soldagem, mesmo mantendo a corrente e tensão constante durante o processo a intensidade de energia não será constante, pois não há um total controle da intensidade de energia durante o processo de soldagem decorrente da variação da resistência dinâmica. É importante ressaltar que valor da resistência dinâmica, por outro lado, tem informações precisas sobre a geração de energia durante todo o processo de soldagem (CHO, 2006; FARIA, 2003).

### **3.1 Formas de medição de resistência dinâmica (Rd)**

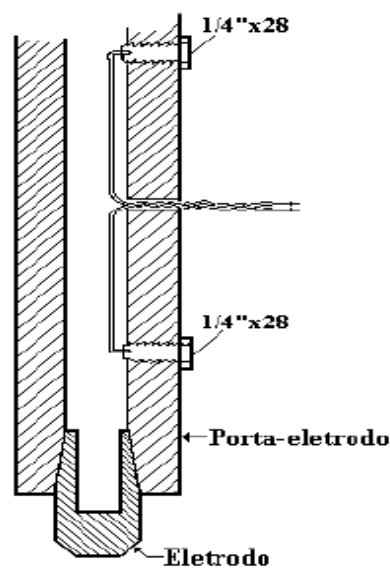
#### **3.1.1 Medição de resistência dinâmica pelo secundário do transformador de soldagem**

No experimento realizado por Gedeon et al. (1987), visando calcular a resistência dinâmica, os valores de corrente elétrica e tensão foram coletados por um sistema de aquisição de dados conectado ao secundário do transformador de soldagem conforme ilustrado na figura 3.1. No trabalho, os sensores foram conectados aos transdutores Td1 e Td2, os transdutores tem a função de adaptar os sinais coletados pelas sondas de medições, a um nível de tensão e corrente compatível com o sistema de aquisição de dados, que conectado a um computador realiza o cálculo da resistência dinâmica.



**Figura 3.1** – Representação esquemática das conexões das sondas de medições da corrente e tensão elétrica no secundário do equipamento de soldagem (adaptado de GEDEON, 1987)

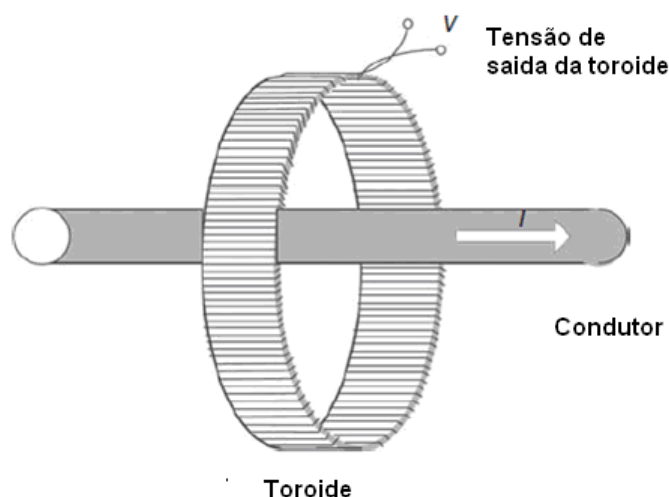
No estudo realizado por Gedeon et al. (1987) para que fosse realizada a medição da tensão elétrica do secundário, os portas eletrodos do equipamento de soldagem forma adaptados, conforme ilustrado na figura 3.2, e instalados neste um par de fios trançados (para minimizar o efeito do ruído elétrico devido ao campo magnético proveniente da fonte de soldagem) ligados a um sistema de aquisição de dados.



**Figura 3.2** – Corte transversal do porta eletrodo e a modificação para coletar a tensão elétrica da resistência de contato (adaptado de GEDEON et al. 1987)



A intensidade da corrente elétrica foi medida por meio de uma tiróide instalada no secundário do equipamento de soldagem. A toróide, vide figura 3.13, é um dispositivo em forma de bobina, constituído de varias espiras de fio condutor, usualmente de cobre, uniformemente enroladas sob uma base circular ou retangular. A toróide deve ser instalada envolvendo o condutor em que será realizada a medição da corrente elétrica. Durante todo o tempo em que ocorrer passagem de uma corrente elétrica ( $I$ ) pelo condutor, a toróide, devido ao campo magnético induzido pelo condutor, gera uma intensidade de tensão ( $V$ ) diretamente proporcional a ( $I$ ). Este dispositivo é utilizado para medir correntes alternadas e apresenta uma grande linearidade durante as medições, e devido a sua simplicidade construtiva e ao baixo custo de fabricação, é largamente utilizada como instrumento de medição de corrente elétrica nos equipamentos de soldagem por resistência (ZHANG, 2006).



**Figura 3.3** – Representação de uma toróide envolvendo um condutor. Durante a passagem de corrente elétrica ( $I$ ) no condutor induz, devido ao campo eletromagnético, uma tensão proporcional ( $V$ ) nos terminais de saída da toróide (adaptado de ZHANG, 2006)

As intensidades da tensão no secundário dos transformadores de soldagem por resistência elétrica são de valores baixos e estão em torno de 10 a 30 VCA. Já a intensidade da corrente elétrica possui valores elevados, situados entre 3 a 100 kA, contribuindo para que a medição de tensão no secundário do transformador de soldagem tenha algumas limitações e dificuldades para serem coletadas quando aplicadas em ambientes industriais. Nestes ambientes as condições de trabalho, as quais os equipamentos estão expostos, são bem mais agressivas que nos ensaios

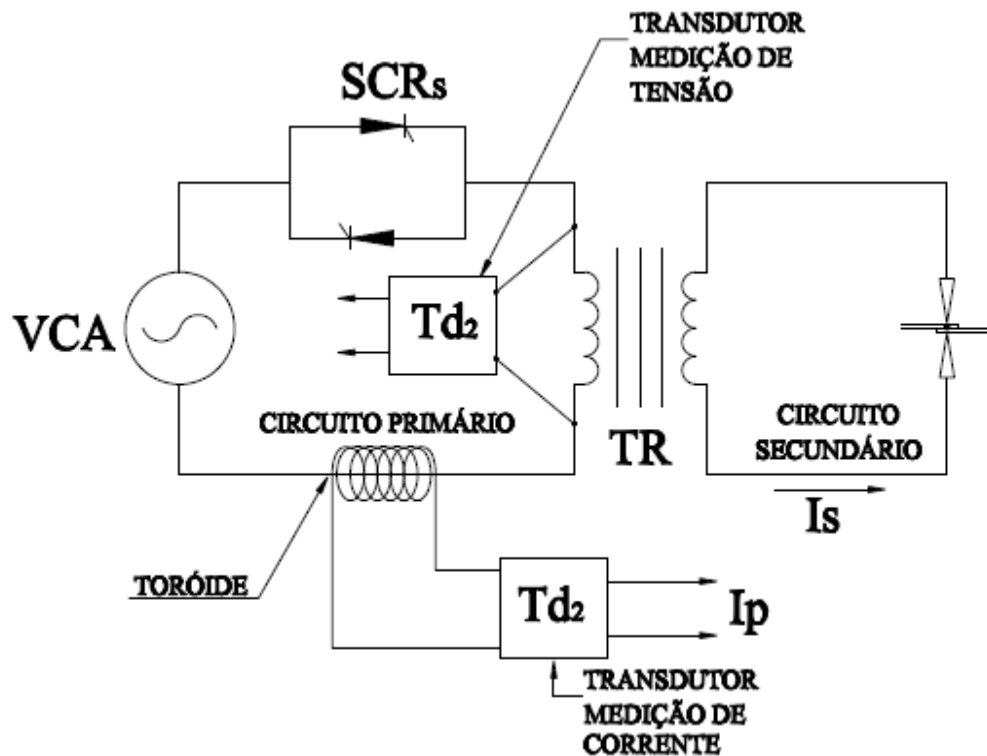
realizados em laboratórios. E entre as causas que influenciam no fenômeno, destacam-se duas, ou seja:

- a) A alta intensidade de corrente no secundário do transformador de soldagem induz interferências eletromagnéticas, denominadas de “ruídos”, nos sensores de tensão instalados próximos aos eletrodos. Isto tende a distorcer a forma dos sinais elétricos gerados pelas sondas, e com isso, induzindo erros nas medições de corrente e tensão, a adaptação de cabos com fios trançados ou blindados podem ser utilizados para atenuarem o efeito da interferência;
- b) O local físico da instalação das sondas da tensão elétrica da resistência de contato deve ser o mais próximo possível dos eletrodos de soldagem, para que se obtenha uma medição com precisão. Os conjuntos eletrodos/portas-eletrodo estão em constante movimento durante o processo de soldagem e possuem um tempo de vida útil reduzido, sofrendo constantes intervenções e trocas, estas condições operacionais intensificam a probabilidade de defeito nas sondas de medições. Contribuindo para o aumento da probabilidade de ocorrer as seguintes falhas: rompimento da sonda ou da fiação, colisão com a peça, contato com fagulhas de solda, entre outras condições inadequadas que podem causar interferências no processo de medição (CHO et al., 2006).

### **3.1.2 Medição da resistência dinâmica pelo primário do transformador de soldagem**

Cho et al. (2006) propuseram a medição da resistência dinâmica baseada na coleta de parâmetros de medição do circuito primário do equipamento de soldagem, como proposta de eliminar os problemas já apresentados das medições dos parâmetros no circuito secundário do equipamento de soldagem. Nos experimentos as conexões dos circuitos das sondas de medições foram interligadas conforme representado na figura 3.4. Para a medição da tensão elétrica foi instalado um transdutor de medição de tensão (Td1) no primário do transformador de soldagem. A medição da corrente elétrica foi realizada por uma toróide conectada no secundário do equipamento de soldagem a um transdutor. Os transdutores têm a função de adequarem os sinais elétricos captados pelos sensores, para serem enviados a um sistema de aquisição de dados. A verificação da correlação entre a resistência dinâmica do circuito secundário com o primário foi realizada por intermédio de uma

modelagem em uma rede neural, no qual se demonstrou que o coeficiente de correlação foi maior do que 0,92 e o erro máximo foi de apenas 7,6392  $\mu\Omega$ . Portanto, a resistência dinâmica do secundário, contém informações sobre o mecanismo da formação da zona fundida podendo ser utilizado para a medição da resistência dinâmica.

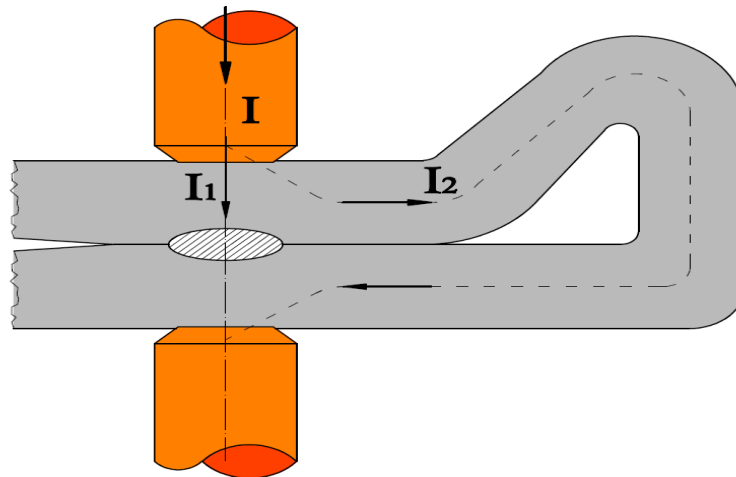


**Figura 3.4** – Diagrama esquemático simplificado representando equipamento de soldagem com sondas de medição de tensão e corrente no circuito

#### 4. EFEITO DA CORRENTE DE "SHUNT"

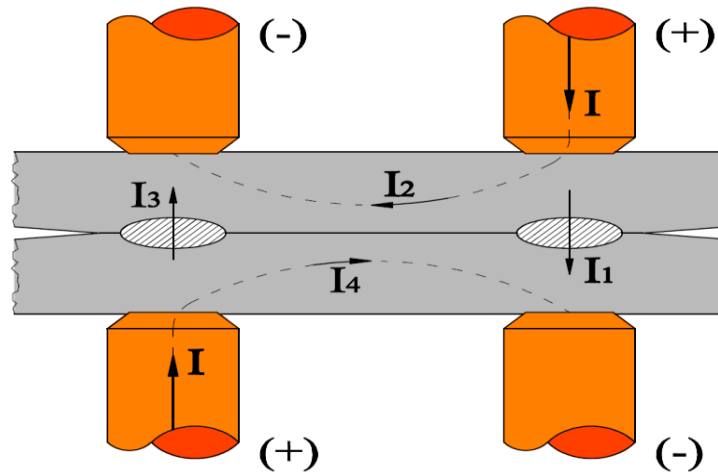
O efeito de circuitos derivados (Shunt) é um fenômeno segundo o qual apenas parte da corrente total de soldagem passa através do ponto desejado, fazendo que seja produzida uma solda de má qualidade (BRACARENSE 2000). Quando a resistência de contato entre as duas peças é grande ou quando a distância entre os pontos é bastante reduzida, parte da corrente de soldagem é desviada no percurso. A seguir serão descritos exemplos de correntes de "Shunt" que ocorrem no processo de soldagem por resistência elétrica. A figura 4.1, ilustra um processo de soldagem a ponto sendo executado no flange de uma peça genérica. Verifica-se que a corrente do secundário do equipamento de soldagem "I" é dividida em duas correntes ( $I_1$  e  $I_2$ ) durante o processo de soldagem. A corrente  $I_1$  é a que contribui para o aquecimento

da zona fundida, já por sua vez, a corrente  $I_2$  representa a perda de energia, decorrente da derivação da corrente e denominada de corrente de “shunt”. Neste exemplo, por ser uma única chapa dobrada e, adicionado pela união da peça estar sendo executada muito próximo à dobra da chapa, tem-se como consequência a existência de um circuito elétrico derivado, induzindo uma corrente elétrica  $I_2$ , que irá circular pela dobra da peça ao invés de gerar o efeito Joule no ponto de solda.



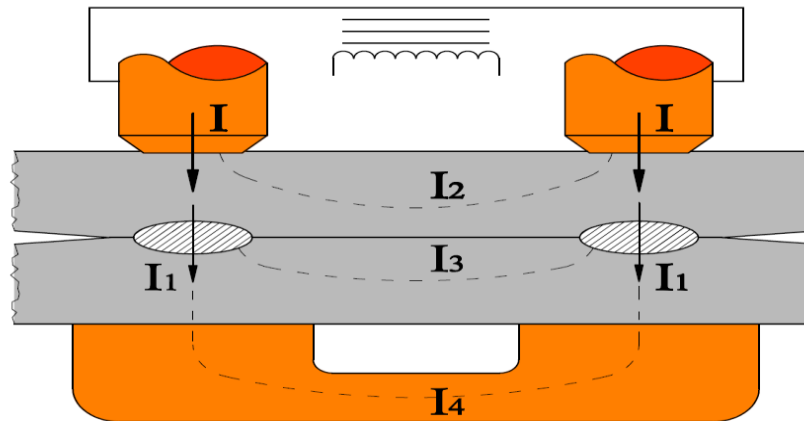
**Figura 4.1** Representação esquemática do efeito da corrente de “shunt” decorrente do desenho físico da peça (adaptado de EMILIO, 2001)

A figura 4,2 representa um processo de soldagem de múltiplos pontos. Este processo geralmente, é realizado por equipamentos automáticos onde vários pontos de solda são executados simultaneamente e as peças são complexas com vários componentes ou de dimensões grandes, necessitando de um grande número de soldas para estruturar a peça. Neste caso, a utilização de soldagens simultâneas, aumenta a produtividade, reduzindo o tempo total de processo de soldagem da peça. Cada par de eletrodos tem seu diferencial de tensão para gerar a corrente de soldagem, quando dois ou mais pares de eletrodo estão muito próximos, ocorre uma diferença de potencial entre eles gerando as correntes de fuga  $I_2$  e  $I_4$  que irão circular pela superfície da chapa. Portanto,  $I_2$  e  $I_4$  são correntes de “shunt” e não contribuem para o aquecimento da zona fundida na peça.



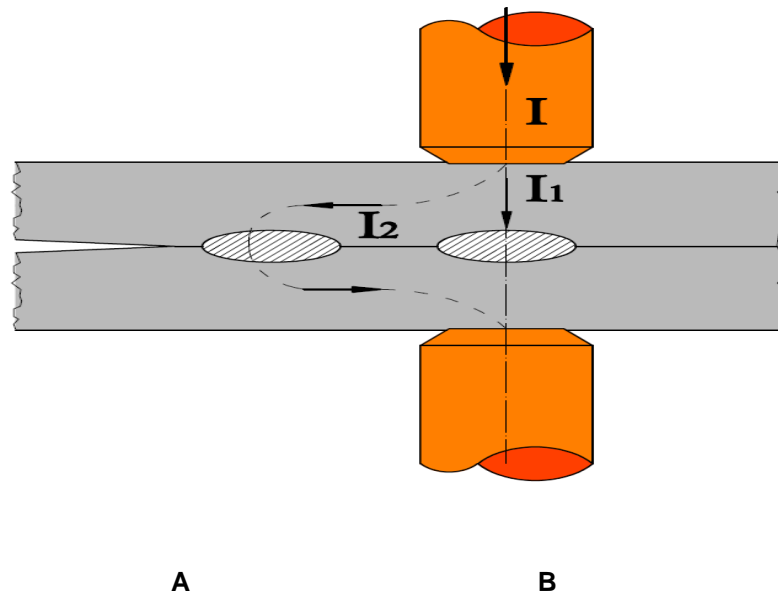
**Figura 4.2** Representação esquemática do efeito da corrente de “shunt” decorrente do processo de soldagem de pontos múltiplos. (adaptado de RWMA, 2003)

Na figura 4.3 é representado um processo de soldagem indireta. Este processo é normalmente utilizado em peças onde a pinça de soldagem tem problemas de acesso para os eletrodos atingirem os dois lados da peça a ser soldada. Na soldagem indireta, os eletrodos acessam a peça apenas por um lado, e no outro lado da peça existe um dispositivo posicionado na mesma direção dos eletrodos, que geralmente é do mesmo material dos eletrodos, por onde a corrente de soldagem irá circular. Nota-se que neste processo sempre serão executados dois pontos de solda simultâneos, isto exige que a potência do equipamento de soldagem seja elevada, pois a corrente de soldagem deve ser projetada para fundir dois pontos simultâneos e compensar as perdas relativas às correntes  $I_2$  e  $I_4$ , que devido às características físicas intrínsecas neste circuito, torna a corrente de “shunt” bastante elevada (EMILIO, 1998; RWMA, 2003).



**Figura 4.3** - Representação do efeito da corrente “shunt” decorrente ao processo de soldagem indireta (adaptado de EMILIO, 2001)

Na figura 4.4, é esquematizado um ponto de solda executado subsequente ao primeiro ponto. Nesta condição, a soldagem a ponto por resistência elétrica é denominada de ponto em serie. Devido às características intrínsecas no circuito entre as chapas, o primeiro ponto de solda forma uma resistência em paralelo com o segundo ponto. Durante o processo de soldagem, a corrente de soldagem ( $I$ ) é dividida em duas  $I_1$  e  $I_2$  pelos circuitos derivados, isto resulta que o segundo ponto tenha o diâmetro inferior ao primeiro. Segundo a Lei de Ohms a resistência elétrica tem o efeito inversamente proporcional à corrente elétrica e, portanto pode-se deduzir que quanto maior for a distância entre os pontos de solda, menor será a corrente de “shunt”, pois quando maior for a distância entre os pontos de solda, maior será a resistência elétrica relativa ao primeiro ponto de solda devido à resistência elétrica da peça. Outro parâmetro que não pode ser ignorado é a temperatura, pois durante a execução da soldagem a temperatura aumenta, aumentando conseqüentemente a resistência elétrica, devido ao efeito termoelétrico. Isto contribui para o incremento da corrente de shunt durante o processo de soldagem. O material da peça também influencia no efeito da corrente de "shunt" em função de a peça ser parte integrante do circuito derivado, como conseqüência, materiais com resistências mais baixas tenderão a ter a corrente de "shunt" com maior intensidade (RWMA, 2003).



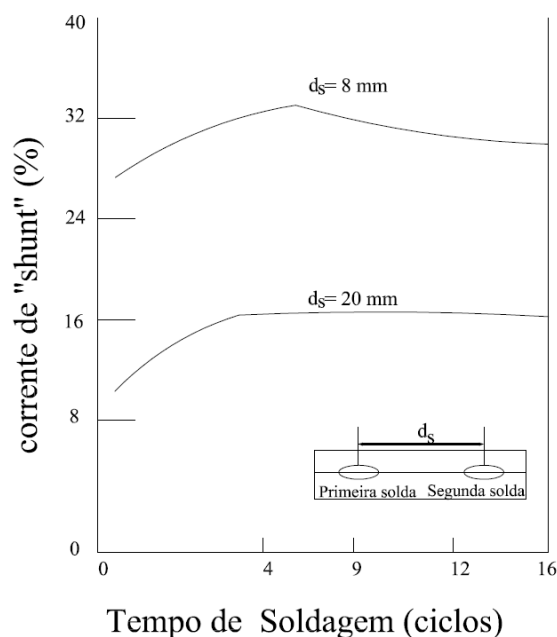
**Figura 4.4** - Representação da corrente de “shunt” devido ao processo de soldagem por resistência de pontos em série (adaptado de RWMA, 2003)

Como discutido, a corrente que é desviada denominada de corrente de “shunt” é um fenômeno indesejado no processo de soldagem, pois a mesma não contribui para a geração de calor do ponto de solda. Adicionalmente na ocorrência de corrente derivada muito elevada, a conformação da zona fundida pode ser comprometida, pois a quantidade de corrente elétrica de soldagem pode não ser o suficiente para a conformação do ponto (VARGAS, 2006).

#### **4.1 Comportamento da corrente de "shunt" em função do espaçamento entre os pontos de solda**

Chang et al. (1990) propuseram um modelo matemático para calcular a intensidade da corrente de shunt e o diâmetro da ZF por intermédio da distribuição da temperatura e da tensão elétrica na chapa. Para validar o método foram realizados experimentos em corpos de prova e comparados os resultados calculados conforme demonstrado na figura 4.5. Os experimentos em corpos de prova e os cálculos utilizados no modelo numérico proposto foram realizados em três condições específicas, com o espaçamento entre os pontos de solda de 8 mm, 12 mm e infinito.

A figura 4.5 mostra o percentual de corrente de "shunt" desviada durante o período de soldagem. Uma das observações deste gráfico é que o valor total a curva da corrente de "shunt", pelo ponto adjacente, para  $d_s = 8$  mm é superior em relação a  $d_s = 20$  mm, isto se deve porque quanto maior é a distância entre os pontos de solda, maior é a resistência elétrica do circuito derivado. Outra constatação é que a corrente de "shunt" aumenta até sétimo ciclo diminuindo em seguida. Este fenômeno ocorre devido ao fato de que, até o sétimo ciclo há um maior aumento do valor da resistência elétrica na região da solda, resultante do incremento da geração contínua de calor, causando o aumento da corrente de "shunt". Após o sétimo ciclo, a temperatura e a corrente de soldagem praticamente se estabilizam, conseqüentemente a dissipação de temperatura ao longo da chapa se mantém quase constante. A redução da resistência no contato da interface peça/peça causa um aumento da corrente de soldagem, promovendo uma progressiva diminuição da corrente de "shunt" até o final do processo de soldagem. A curva da corrente de "shunt" com  $d_s = 20$  mm apresenta semelhança a  $d_s = 8$  mm. Há uma diferença no valor da corrente de shunt, isto se deve ao aumento das resistências intrínsecas no circuito elétrico existente entre os pontos de soldas, potencializadas pelo aumento do espaçamento para 20 mm. Conseqüentemente o efeito da corrente de "shunt" com  $d_s =$  infinito, será nulo (CHANG, 1990).



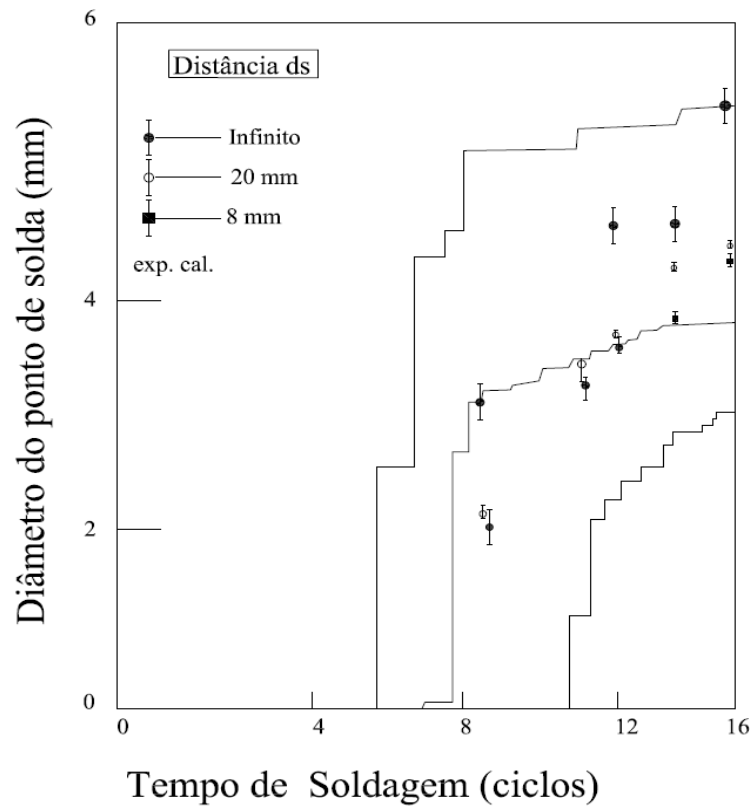
**Figura 4.5** – Percentual da corrente de "shunt" desviada no primeiro ponto de solda durante o período de soldagem (adaptado de CHANG, 1990)



## 4.2 Comportamento do diâmetro da zona fundida em função do espaçamento (ds)

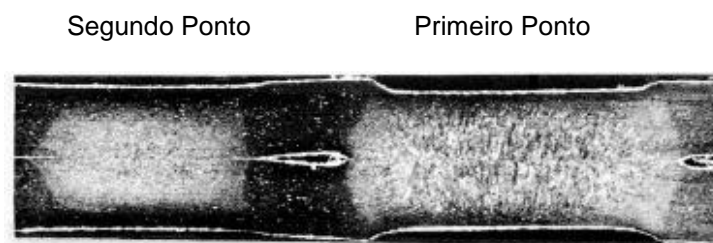
Para determinar o comportamento do diâmetro da zona fundida em função da variação do espaçamento entre os pontos (**ds**), CHANG et al. (1990) realizaram cálculos numéricos utilizando um modelo matemático baseado no efeito termoelétrico que é induzido nas chapas metálicas durante a soldagem a ponto. O modelo também contemplou a propagação que ocorre pela interface peça/peça até o ponto adjacente. Para comparação dos resultados teóricos e práticos, foram realizados ensaios em corpos de prova com todos os parâmetros de soldagem análogos ao ensaio da seção (4.6.1) com os valores de **ds** iguais a 8 e 20 mm. Foram produzidas 10 amostra para cada ponto de solda, os diâmetros utilizados foram a média aritmética das amostras. Posteriormente os corpos de prova foram seccionados e realizados ensaios macrográficos.

A figura 4.6 demonstra que **ds** tem um efeito diretamente proporcional ao diâmetro da zona fundida, os diâmetros das soldas realizadas com **ds** = 8 mm, são inferiores ao realizado com **ds**= 20 mm que conseqüentemente são inferiores ao realizados com **ds** = infinito. Isto já era esperado devido ao efeito análogo à corrente de soldagem. O modelo matemático termoelétrico também comprovou que a propriedade do efeito é inversamente proporcional entre o diâmetro de zona fundida e a distância entre os pontos de solda. Os diâmetros calculados por intermédio do modelo matemático proposto, não obtiveram uma forte correlação com os diâmetros coletados no ensaio com os corpos de prova. Várias causas são citadas no estudo como responsáveis por esta discrepância, entre elas estão as limitações da malha tridimensionais utilizadas no modelo matemático proposto. No modelo matemático utilizado, não foi previsto o alargamento do contato da interface peça/peça durante o período de soldagem. Também como limitante no estudo, foi citado baixa velocidade de processamento e capacidade limitada de memória do computador da época utilizado no experimento, contribuindo para a imprecisão dos resultados dos cálculos do diâmetro teórico.



**Figura 4.6** Comportamento dos diâmetros da zona fundida para distâncias de  $ds$  iguais 8, 20 mm e infinito, comparando os resultados dos ensaios em corpos de prova com modelo matemático (adaptado de CHANG e CHO, 1990)

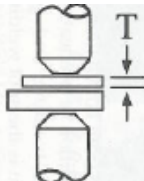
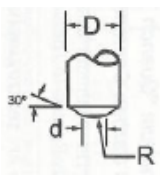

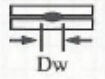
A figura 4.7 ilustra a macrografia de um corte transversal de dois pontos de solda por resistência que foram realizados com os mesmos parâmetros de soldagem a uma distancia de 8 mm entre eles, nesta imagem fica visível o efeito da corrente de “shunt” na geometria e conseqüentemente nas características metalúrgicas da zona fundida no segundo ponto de solda (CHANG, 1990).



**Figura 4.7** – Macrografia de um corte transversal de dois pontos de solda realizados a 8 mm de distância (CHANG, 1990)

Nas indústrias de automóvel, alguns valores de parâmetros de soldagem iniciais como corrente de soldagem, tempo de soldagem, pressão de soldagem, diâmetro mínimo da zona fundida do ponto de solda, dimensões dos eletrodos, e espaçamentos mínimos entre os pontos de solda, são definidos em princípio, orientando-se pela espessura da chapa mais fina da peça. A tabela 4.1 apresenta valores empíricos dos parâmetros de soldagem de “setup” iniciais, para aços de baixo teor de carbono recomendados pela RWMA (2003). Entre eles verifica-se que em função da espessura da chapa é recomendada uma distância mínima entre os pontos de solda, com o objetivo de minimizar os efeitos de corrente de “shunt” durante a soldagem. Verifica-se que quanto maior a espessura da chapa, maior deve ser o espaçamento entre os pontos. Estes parâmetros são orientativos e foram levantados por meio de testes realizados em laboratórios em corpos de prova, usualmente são utilizados no início dos ajustes dos parâmetros de soldagem, para uma peça ou componente com a espessura e material similar ao referenciado na tabela 4.1. A validação dos parâmetros de soldagem, usualmente, é orientada pelo diâmetro mínimo recomendado da zona fundida do ponto de solda, seguida de testes homologados que devem ser realizados conforme especificação do fabricante.

Tabela 4.1 – Valores referenciais do dimensional dos eletrodos, parâmetros de soldagem, espaçamento mínimo entre pontos e diâmetro mínimo da zona fundida para chapas de baixo teor de Carbono tipo SAE 1008-1010 (RWMA, 2003, adaptado)

Espessura da Chapa	d	D	R	Força de Compressão	Tempo de Soldagem	Corrente de Soldagem	Distância Mínima entre Pontos	Diâmetro Mínimo da Zona Fundida
								
(mm)	(mm)	(mm)	(°)	Libras	(60Hz)	(kA)	(mm)	(mm)
0,25	12	3	45	200	4	4,00	6,4	3,3
0,53	12	5	45	300	6	6,00	9,5	4,3
0,76	12	5	45	400	8	8,00	12,7	5,3
0,91	12	6	45	500	10	9,20	19,0	5,8
1,22	12	6	45	650	12	10,30	22,0	6,3
1,52	12	6	45	800	14	11,60	27,0	6,8
1,91	16	8	45	1100	21	13,30	35,0	7,8
2,29	16	8	45	1300	25	14,70	41,0	8,6
2,67	16	9	45	1600	29	16,10	46,0	9,3
3,05	16	9	45	1800	30	17,50	50,8	10,1

Observa-se na Tabela 4.2, com base no Ford Laboratory Test Method – BA 013-4, segundo experiências realizadas em laboratório, a determinação de uma distância mínima entre os pontos de solda, com o objetivo de minimizar o efeito da corrente de “shunt”. Neste caso as distâncias são determinadas em função da chapa de menor espessura do componente, a qual é denominada de “metal governante”. Quando em determinados componentes e processos estas distâncias não são atendidas, espera-se que ocorra perda de energia no processo de soldagem devido à corrente de “shunt”.

Tabela 4.2 – Valores referenciais da distância mínima entre pontos de solda em função da espessura da chapa governante (adaptado do Ford Laboratory Test Method – BA 013-4)

Espessura do metal governante (mm)	Distância mínima entre pontos (mm)
0,50 - 0,79	15
0,80 - 1,24	25
1,25 - 1,99	35
2,00 - 3,00	45

### 4.3 Tipos de ensaios para avaliação da qualidade da solda

Ensaio destrutivo e não destrutivo são aplicados para avaliação da qualidade da solda, os testes destrutivos tendem a ser onerosos e dependendo da complexidade das peças pode demandar uma grande quantidade de tempo e de recurso humano. Assim sempre que possível é recomendado que seja realizado testes não destrutivo em uma amostragem estatisticamente validada. Testes em corpos de provas são também amplamente utilizados nas indústrias automobilísticas, mas nem sempre representam fielmente o processo, pois as peças estampadas podem apresentar problemas de conformação e encaixes gerando condições especiais que influenciam no processo de soldagem e não podem ser replicadas nos testes com corpos de provas. (ASLANLAR, 2006).

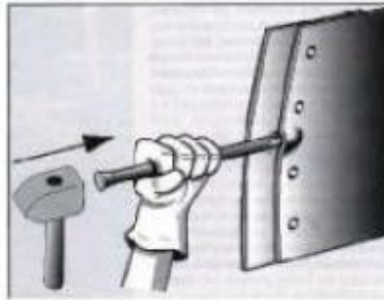
Atualmente, com a evolução dos controladores eletrônicos de soldagem, alguns parâmetros indiretos são monitorados e controlados como a corrente de soldagem, pressão de soldagem e resistência dinâmica trazendo robustez no processo e alarmes em caso de falhas.

### **4.3.1 Inspeção visual**

A inspeção visual embora simples, é um método bastante utilizado na indústria automobilística, mas a sua eficiência depende que o avaliador seja treinado nos modos de falhas do processo de soldagem, os critérios devem estar muito bem definidos e divulgado para todos os envolvidos no processo de inspeção da soldagem. Usualmente em estações de soldagem manual, esta atividade é exercida pelo próprio operador do equipamento de soldagem, que ao detectar a falha interrompe o processo e toma as primeiras ações corretivas evitando que o defeito seja passado adiante. Nos equipamentos automáticos, normalmente células automáticas, este tipo de inspeção visual em tempo real fica inviabilizada, nestes casos usualmente são criadas estações de inspeção da solda em pontos estratégicos da linha de produção, onde, por intermédio de um formulário pré-estabelecido, o auditor verifica os pontos de solda estabelecidos pela engenharia como críticos, nestas estações também usualmente podem ser realizados ensaios por flexão (SANTOS, 2006).

### **4.3.2 Ensaio de flexão ou arrancamento**

Embora não seja classificado com destrutivo, este ensaio pode causar algum dano na peça inspecionada. Em peças que necessitam de um acabamento de alta qualidade, este método não é recomendado. Conforme demonstrado na figura 4.8, estes testes normalmente são realizados com auxílio de ferramentas com talhadeira e martelos. Consiste em o avaliador introduza a talhadeira entre as chapas soldadas próximo ao ponto de solda, com o auxílio do martelo, e após a introdução da ferramenta a mesma é flexionada gerando um esforço no ponto de solda, o qual deve resistir ao esforço empregado, após o teste a peça é rebatida para voltar a sua forma original (NAKANO, 2005).



**Figura 4.8** – Representação ilustrativa de teste de flexão (STOCCO, 2006)

### **4.3.3 Ensaio de tração**

Este ensaio pode ser classificado ou não como destrutivo, podendo ser realizados em corpos de prova de chapas idênticas as utilizadas no processo, ou pode ser realizado com a própria peça que está sendo produzida, o que no caso vem a caracterizá-lo como destrutivo. É realizado com uma amostragem reduzida estatisticamente aprovada pela engenharia. Este ensaio é normalizado pela “Deutscher Verband für Schweißen” (DVS) 2904, mas as indústrias de automóvel costumam ter seus próprios padrões de aceitação e procedimentos, o que não altera a essência do método apresentado.

Com o uso de corpos de prova ou da peça, que deve ser recortada da carroceria no local onde o ponto de solda será analisado, a peça adaptada é colocada em um equipamento que fará um movimento de tração forçando a junção da solda, o equipamento tem um dinamômetro que mede a força que está sendo aplicada. Para o ponto ser previamente aprovado deve ocorrer o destacamento das chapas, mas não do ponto de solda, o resultado da intensidade de força aplicada e o diâmetro do ponto de solda destacado da peça no ensaio irão validar a qualidade do ponto de solda (SANTOS, 2006).

### **4.3.4 – Ensaio de ultrassom**

O ensaio de ultrassonografia, classificado com não destrutivo, consiste no uso de um equipamento de ultrassom específico para esta utilização, que através de uma sonda que é aplicada em cima do ponto de solda inspecionado, a sonda irá gerar um trem de pulso ultrassônico e a medição da velocidade deste pulso e as atenuações dos sinais serão analisados pelo equipamento que é conectado a um laptop, que por

intermédio de um software dedicado ira gerar um gráfico, a interpretação deste gráfico guiado pelos padrões de aceitação por um profissional qualificado vai determinar a qualidade do ponto de solda (NAKANO, 2004).

## **5. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL**

### **5.1 Introdução**

Encontram-se descritas a seguir, as etapas detalhadas envolvidas no planejamento e de execução dos experimentos. A realização sistemática dos experimentos é descrita com a preocupação de se enfatizar os procedimentos utilizados, tanto nos ensaios realizados com corpos de prova, quanto nos ensaios realizados para a medição de resistência dinâmica do ponto de solda. Em termos de ensaios, encontra-se detalhado o motivo da seleção do tipo do material utilizado nos corpos de prova. O procedimento experimental adotado baseia-se em determinar a correlação da corrente de “shunt”, em função da distância entre os pontos de solda. Sendo que os ensaios foram divididos em duas etapas conforme descritos a seguir.

Etapa1: Nesta etapa foi determinada à correlação da distância entre os pontos de solda e a corrente de “shunt”. Os ensaios foram realizados com os envelopes de trabalho fixo, procedimento denominado de “Método da Energia Especifica” (VARGAS, 2006).O método tem a finalidade de que a fonte de soldagem conserve a energia constante durante todo o processo de soldagem, com o objetivo de que o único parâmetro variável, seja a distância entre os pontos de solda. Considera-se a energia constante neste experimento como ideal, mas não factível, pois como a quantidade de energia depende da resistência elétrica (conforme demonstrado na equação 5.1), ainda que se mantenha constante durante o processo de soldagem, a resistência elétrica se altera em função da composição química do material, da variação da espessura da chapa, das impurezas na superfície, e da alteração da temperatura entre outras variáveis. Portanto há uma variação na intensidade de energia durante o processo de soldagem. Considerando os valores reduzidos de resistência elétrica, que usualmente os circuitos de soldagem possuem no secundário da fonte de soldagem são bastante reduzidos em relação à resistência de contato, pode-se ponderar esta variação como desprezível, sem significativa influência nos resultados deste experimento (CHO et al,2006).

$$Q = \int_0^t I^2 R dt \quad (5.1)$$

Onde:

Q = Calor em Joules (J);

I = Corrente elétrica em (A);

R = Resistência em ( $\Omega$ );

t = Tempo da duração da corrente em (s).

Para minimizar os efeitos da variação de resistência elétrica, algumas ações foram efetivadas durante os procedimentos experimentais, tais como a garantia de que todos os corpos de prova fossem de um mesmo lote de fabricação e a remoção adequada de todas as impurezas das superfícies das chapas.

Nesta etapa os procedimentos experimentais foram realizados no Complexo Industrial Ford Nordeste (CIFN), com o principal objetivo de aproximar os ensaios experimentais das condições ambientais do processo produtivo.

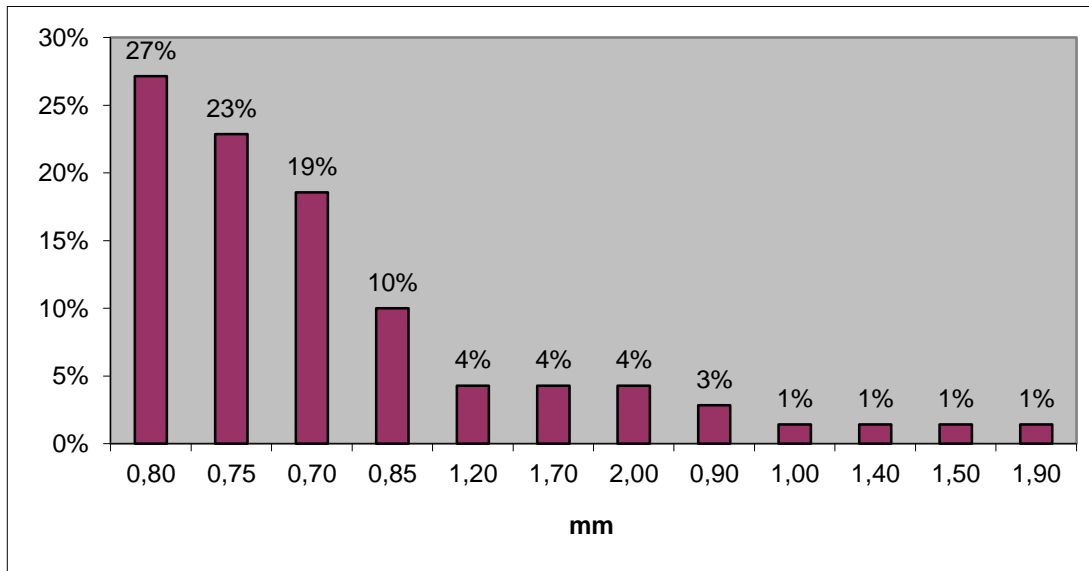
Etapa 2: Esta etapa objetivou validar por intermédio do procedimento experimental, a correlação entre a resistência dinâmica  $R_d$ , medida tanto no primário quanto no secundário do transformador de uma determinada fonte de soldagem. Segundo estudo realizado por CHO et al (2006), descrito no item 3, foi demonstrado através de um modelo matemático de uma rede neural, que a resistência dinâmica pode ser calculada com os dados dos parâmetros do primário de uma fonte de soldagem. Esta hipótese traz inúmeras vantagens para a aplicação de um sistema de medição de resistência dinâmica, quando utilizado em um ambiente industrial.

## 5.2 Definição do material dos corpos de prova

A determinação da espessura da chapa utilizada neste experimento como corpos de prova, foi definida pelo critério da chapa de maior utilização entre as peças estampadas. Esta deliberação tem como objetivo principal que os resultados obtidos no experimento possam vir a ser utilizado como base, ou seja, para introduzir possíveis melhorias no processo de soldagem a ponto por resistência elétrica, em um conjunto de peças que utilizam este material no pátio fabril. Observa-se na figura



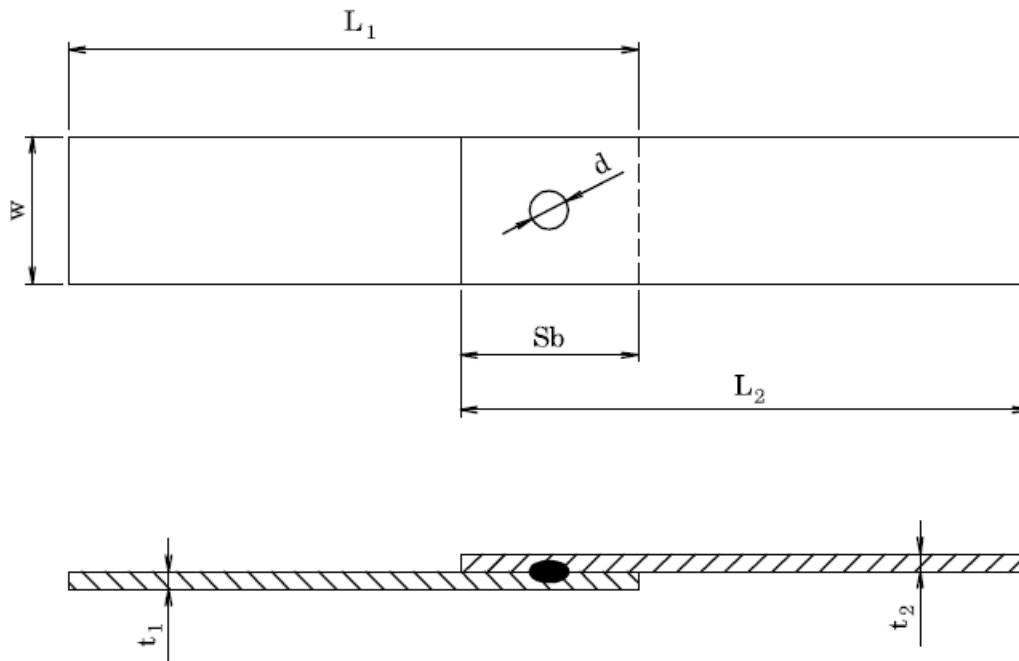
5.1 que a chapa de espessura 0,8 mm, é utilizada em 27% das peças estampadas em uma carroceria de um automóvel denominado de popular.



**Figura 5.1** Gráfico do percentual de utilização das chapas classificadas por espessuras, empregadas nas peças estampadas de um carro popular (Ford, 2009)

A especificação da chapa utilizada nos corpos de prova é a WSD-M1A333-A1/A4, conforme “Standard Requirements for Production Materials” (WSS-M99P1111-A) da Ford. Com as propriedades mecânicas conforme (ISO 6892/ASTM E 8M/EN 10002). Dimensões dos corpos de prova para os ensaios que serão realizados estão demonstradas na Fig. (5.2).

Espessura da chapa (t1 e t2) (mm)	Comprimento da chapa (L1 e L2) (mm)	Largura (W) (mm)	Sobreposição (Sb) (mm)	Diâmetro da zona fundida (mm)
0,8	100	50	70	4,6



**Figura 5.2** – Dimensões dos corpos de prova para os ensaios, conforme Ford Laboratory Test Method – BA 013-04

É de fundamental importância para que se obtenham resultados satisfatórios, com o mínimo de interferências possíveis, que as superfícies dos corpos de prova sejam devidamente limpas e removidas todas as impurezas contidas nas superfícies das chapas, como graxas e óleos, que normalmente são utilizadas para proteger o produto da oxidação, durante o processo produtivo, até que os componentes recebam os devidos tratamentos químicos anticorrosivos, que antecedem o processo de pintura. Estas variáveis supracitadas desvirtuam o valor da resistência de contato, comprometendo a precisão da medição do valor da resistência dinâmica, durante o processo de soldagem.

### **5.3 Procedimento experimental para levantamento da curva do diâmetro em função da corrente de soldagem**

#### **5.3.1 Equipamentos**

A seguir estão descritos todos os equipamentos utilizados nesta etapa e, para que o experimento obtivesse os resultados o mais próximo possível do ambiente

industrial, o equipamento de soldagem, os testes de qualidade dos pontos e os auditores de solda para avaliação do ponto de solda, foram os mesmos utilizados no processo produtivo das carrocerias fabricadas.

### **5.3.2 Dispositivo de fixação dos corpos de prova**

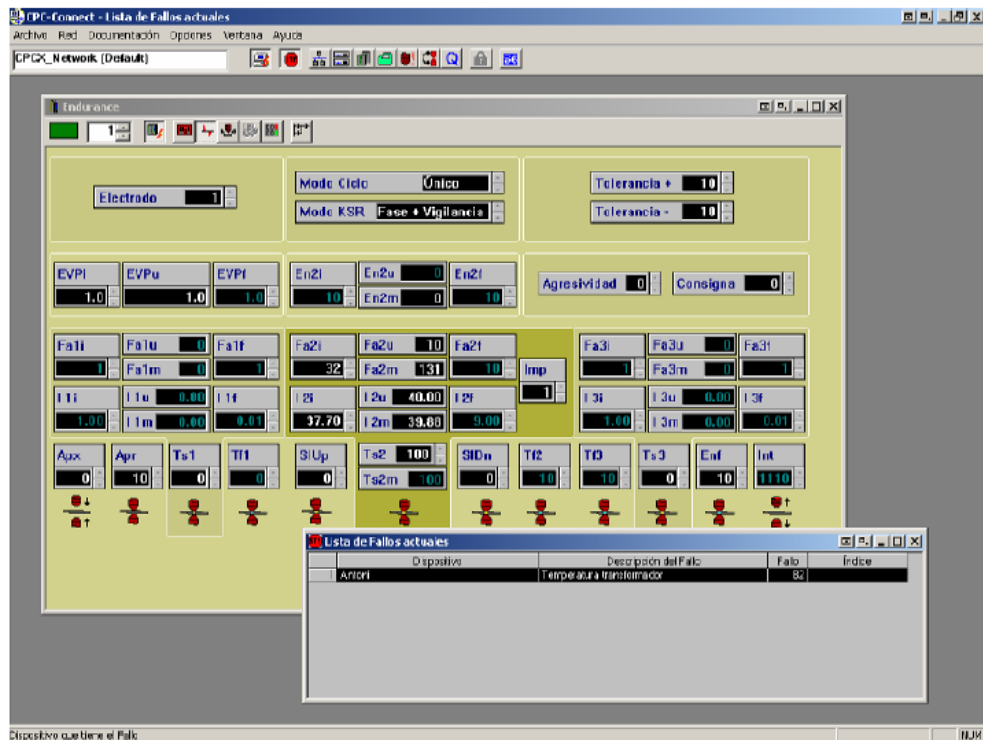
Adotou-se um dispositivo de fixação para os corpos de prova, com o objetivo de manter a posição do corpo de prova, durante todos os ensaios. Com isto, conseguir que uma possível variação posicionamento da pinça de solda, em relação aos corpos de prova, seja minimizada, para não influenciar nos resultados deste experimento. Este dispositivo também assegura que a distância entre os pontos de solda, mantenha a repetibilidade durante os ensaios, considerando que a correta distância entre os pontos de solda é, neste experimento, um parâmetro imprescindível para o adequado resultado dos ensaios nos corpos de prova.

### **5.3.3 Equipamento de soldagem**

O equipamento de soldagem utilizado no experimento é de fabricação comercial da Serra Bucker, segue de forma simplificada, a descrição dos principais componentes da fonte de soldagem:

- Fonte de potencia de media frequência com controlador de soldagem marca Serra Bucker modelo Serratron MFC 3000 incorporado à bancada de testes;
- Pinça de soldagem Serra Bucker tipo X-50, com acionamento pneumático e refrigerada a água;
- Transformador de soldagem Serra Bucker, com núcleo de hipersil, potência de 54 kVA, tensão de alimentação 440 VCA trifásico e refrigerado a água;
- Computador Pessoal (PC) com aplicativo de programação CPC Connect instalado, para parametrização do Controlador de Soldagem e coleta dos dados de parâmetros de soldagem. Na figura 5.3 é apresentada uma tela

do programa CPC Connect para programação de parâmetros de soldagem, adotado no experimento.



**Figura 5.3** – Tela de programação de parâmetros de soldagem do aplicativo CPC Connect (Manual do Serratron MFC 3000, 2009)

### 5.3.4 Controlador de soldagem

O controlador de soldagem utilizado neste experimento é o Serra Bucker modelo Serratron MFC 3000. Segundo Santos (2006), atualmente, vem se observando cada vez mais a utilização de comandos aplicados à soldagem que controlam a corrente elétrica através de dispositivos chamados de inversores. Estes controladores são denominados de Média Frequência. Esses dispositivos controlam mais precisamente a corrente, porque possuem configurações e componentes que ajustam os parâmetros de soldagem em intervalos de tempos muito menores que os comandos convencionais. Como comparação, pode-se dizer que nos sistemas convencionais, as intervenções são feitas a cada 8,33 ms, enquanto que sistemas de média frequência, as intervenções de correção são realizadas a cada 1 ms.

Conforme demonstrado na figura 5.4 os controladores de soldagem de média frequência podem ser divididos basicamente em quatro módulos, os quais são descritos a seguir.

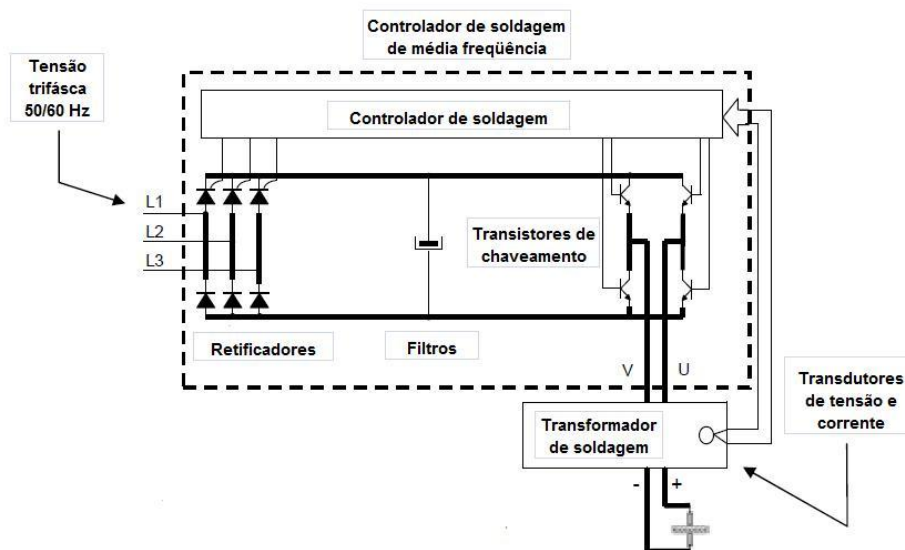
Módulo 1 - É composto por um retificador que converte a tensão alternada senoidal da entrada da rede trifásica de 60 Hz em uma onda contínua retificada.

Módulo 2 - Filtro composto basicamente por capacitores conectados aos retificadores, os quais têm a função de atenuar as oscilações de tensão, para que o rendimento da fonte de soldagem, obtenha valores elevados.

Módulo 3 - É composto por transistores de alta potência que recebem a tensão retificada e, por intermédio de chaveamentos controlados, convertem novamente em corrente alternada, porém com uma frequência de 1000 Hz.

Módulo 4- O sinal de 1kHz agora é enviado a um transformador especial, o qual reduzira a tensão elevando a corrente elétrica. A tensão alternada sai do transformador já rebaixada e passa novamente por um elemento retificador, que transformará esse sinal em uma forma pulsada e retangular de 1kHz.

Os sinais de tensão e corrente de soldagem são coletados através de transdutores específicos no primário do transformado de soldagem e enviados ao controlador de soldagem, o qual, entre varias outras funções de controle de processo, calcula a resistência dinâmica do ponto de solda, por intermédio de um algoritmo dedicado e processadores de alta velocidade. Este equipamento apresenta um grande diferencial em relação ao sistema convencional, pois proporciona uma redução considerável no tamanho do transformador, uma vez que, com a utilização de sinais de 1kHz, a variação de fluxo magnético é maior, portanto a geração de energia é também maior, usando tamanhos de núcleos e espiras menores, reduzindo conseqüentemente o peso.



**Figura 5.4** - Representação esquemática de um equipamento de soldagem por resistência de media frequência. (modificado do Manual do Serratron MFC 3000, 2009)

### 5.3.5 Definição do diâmetro do ponto de solda “setup”

O diâmetro mínimo aceitável do ponto de solda utilizado neste ensaio, atende o boletim da "Ford Laboratory Test Method" – BA 013-04, demonstrado na tabela 5.1. Onde o diâmetro do ponto de solda é o resultado do produto do metal governante (metal de menor espessura entre duas ou mais chapas a serem soldadas) e a raiz quadrada de sua espessura. Observa-se na tabela 5.1 que existem três diâmetros requeridos empregados, os quais são explanados a seguir. a) Diâmetro de “setup” é o diâmetro mínimo aceitável para ensaios realizados apenas em corpos de prova. b) Para os ensaios realizados com o produto utiliza-se a coluna do diâmetro denominado de satisfatório. c) O diâmetro inferior é utilizado somente quando são realizados testes destrutivos nos componentes, onde dentro de uma determinada quantidade de pontos que são especificados para um componente, durante os testes destrutivos, uma quantidade máxima de ponto inferior pode ser aceitável, sem comprometer a resistência mecânica do componente.

**Tabela 5.1** – Tabela para determinar o diâmetro do ponto de solda mínimo, satisfatório e de “setup” (Ford Laboratory Test Method – BA 013-04)



Min. per ES-YC15-1N260-AA		Required Diameter <sup>1</sup>		
Governing Metal Thickness <sup>2,3</sup>	English Units GMT (Approx.)	Setup Reference <sup>7</sup> (5*sqrt(GMT))	Minimum Satisfactory <sup>5</sup> (4*sqrt(GMT))	Minimum Undersize <sup>4</sup> (2*sqrt(GMT))
(mm)	(in.)	(mm)	(mm)	(mm)
0.60	0.024	3.9	3.1	1.5
0.75	0.030	4.3	3.5	1.7
0.90	0.035	4.7	3.8	1.9
1.10	0.043	5.2	4.2	2.1
1.40	0.055	5.9	4.7	2.4
1.60	0.063	6.3	5.1	2.5
1.90	0.075	6.9	5.5	2.8
2.40	0.094	7.7	6.2	3.1
Fused Nugget Diameter for Steels (point at which a button may not necessarily be pulled)				
2.80	0.110	8.4	6.7	3.3
3.20	0.126	8.9	7.2	3.6
3.60	0.142	9.5	7.6	3.8
4.00	0.157	10.0	8.0	4.0
4.40	0.174	10.5	8.4	4.2

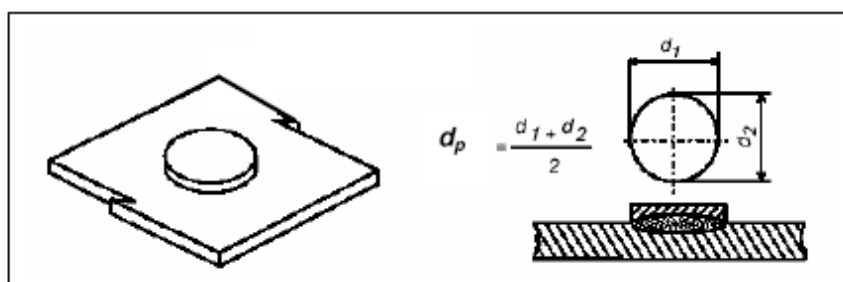
O diâmetro de “setup”, satisfatório e o mínimo que serão utilizados para os ensaios com os corpos de prova de espessura de 0.8 mm foram calculados conforme recomendações da tabela 5.1 estão descritos na tabela 5.2.

**Tabela 5.2** – Diâmetros de referência para ensaios nos corpos de prova para chapa de espessura de 0,8 mm

Espessura da chapa	"Setup"	Mínimo satisfatório	Abaixo do mínimo
0.8	4,6	3,6	1,8

### 5.3.6 Procedimento para avaliação do ponto de solda.

O procedimento para avaliação dos pontos será o ensaio de flexão citado no item 4.7.2, onde o corpo de prova é tensionado, até que ocorra o rompimento da chapa, ficando exposto o botão da zona fundida, conforme “Ford Laboratory Test Method” – BA 013-04, o procedimento recomenda que sejam realizadas duas medições da zona fundida do ponto de solda, conforme demonstrado na Fig. (5.5), o ponto deve ser medido duas vezes ( $d_1$  e  $d_2$ ), com uma defasagem de  $90^\circ$  em relação às duas medições, o diâmetro resultante será a média aritmética.



**Figura 5.5** – Representação do procedimento do cálculo do diâmetro do ponto de solda por resistência (Ford Laboratory Test Method – BA 013-04)

### 5.3.7 Levantamento da curva do diâmetro em função da corrente de soldagem

Nesta etapa foi determinada a curva  $y = f(x)$ , onde “y” é do diâmetro do ponto de solda e “x” a corrente de soldagem. Foi considerado  $ds = \infty$ , ou seja, foi

realizado apenas um ponto de solda nos corpos de prova e os parâmetros de pressão dos eletrodos, tempo de soldagem e os corpos de prova permanecerão fixos, o envelope de soldagem foi apresentado na Tab. (5.3), para o levantamento desta curva, apenas a intensidade de corrente de soldagem será a variável de eixo “X”.

**Tabela 5.3** – Envelope operacional de soldagem para a chapa de 0,8 mm, com baixo teor de carbono (Ford Laboratory Test Method – BA 013-04)

Espessura da chapa (mm)	Diâmetro mínimo do ponto de solda (mm)	Corrente de soldagem (KA)	Pressão (kgf/cm <sup>2</sup> )	Tempo de soldagem (ciclos)
0,8	3,6	8	10,2	10

Conforme demonstrado na Tab. (5.4) foram produzidos três corpos de prova para cada "setup" de corrente de soldagem. A intensidade da corrente de soldagem para a chapa de 0.8 mm é de 8,00 kA conforme Tab. (5.2), sendo esta corrente de soldagem o valor intermediário da tabela, com intervalo de 0,50 kA entre os “setups” de soldagem, forma produzidos corpos de provas com correntes de 6 a 10 kA. Os corpos de provas estão representados na tabela como “C”, e os índices representam a seqüência do ensaio referente a cada corrente de soldagem respectiva. Os diâmetros dos corpos de prova foram avaliados conforme Standard Ford BA-013-4, sendo o valor resultante a média aritmética dos três corpos de prova.

**Tabela 5.4** – Matriz de experimento para o ensaio referente ao levantamento da curva do diâmetro da zona fundada em função da corrente de soldagem

Corrente de soldagem (kA)	Diâmetro (mm)			Diâmetro médio (mm)
	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	
10,00	C1	C2	C3	d1
9,50	C4	C5	C6	d2
9,00	C4	C5	C6	d3
8,50	C4	C5	C6	d4
8,00	C7	C8	C9	d5
7,50	C10	C11	C12	d6
7,00	C13	C14	C15	d7
6,50	C16	C17	C18	d8
6,00	C19	C20	C21	d9



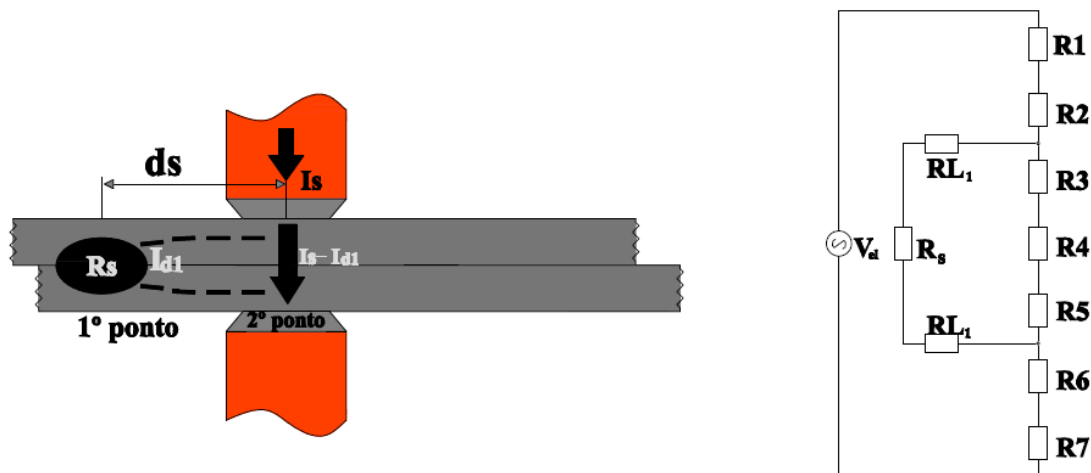
#### 5.4 Mapeamento da curva do diâmetro de ponto de solda em função da variação da distância entre pontos

Nesta etapa será determinada a curva  $y = f(x)$ , onde “y” é o diâmetro do ponto de solda e “x” é a distância entre os pontos de solda. Como resultado pretende-se mensurar a relação direta da corrente de fuga com a resistência dinâmica do ponto de solda em função da variação da distancia **ds**. Nesta etapa, o envelope operacional, durante todo o processo de soldagem dos corpos de prova, permanecerá fixo, utilizando o envelope de soldagem pré-definidos na Tab. (5.3), sendo que a distância **ds** será variada conforme Tab. (5.4). Onde serão produzidos três corpos de prova para cada ensaio da distância **ds**, o diâmetro considerado será a média aritmética do diâmetro dos três corpos de prova. Durante a execução das soldagens, será medida e calculada, a resistência dinâmica dos pontos de soldo, com o objetivo de convalidar a resistência dinâmica, com o diâmetro de solda conforme já descrito no item.

**Tabela 5.5** – Matriz experimental para coleta do diâmetro da zona fundida e resistência dinâmica em função da variação da distância entre os pontos de solda

Distância ds (mm)	Corpos de prova				Amplitude (mm)	Corrente de shunt estimada (kA)
	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Diâmetro médio (mm)		
10	C1	C1	C1	Ø1	S1	kA1
15	C4	C5	C6	Ø2	S2	kA2
20	C7	C8	C9	Ø3	S3	kA3
25	C10	C11	C12	Ø4	S4	kA4
30	C13	C14	C15	Ø5	S5	kA5
35	C16	C17	C18	Ø6	S6	kA6
40	C19	C20	C21	Ø7	S7	kA7
45	C20	C21	C22	Ø8	S8	kA8

Conforme demonstrado na Fig. (5.6) observa-se que parte da corrente de soldagem  $I_s$ , é desviada pelo 1º ponto de solda resistência dinâmica do 2º ponto de solda, ocorrendo que a resistência dinâmica do 2º ponto de solda, é composta do valor intrínseco do valor de  $R_s$  conforme demonstrado a seguir.



Onde:

- R1 a R7 = Resistência dinâmica do 2º ponto de solda ( $R_{d2}$ , determinada na Eq. 5.1);
- RL1 = Resistência da chapa superior;
- RL2 = Resistência da chapa inferior;
- Rs = Resistência do 1º ponto de solda;
- Is = Corrente de soldagem;
- Id = Corrente de "shunt";

**Figura 5.6** - Levantamento da curva do diâmetro de ponto de solda em função da variação da distância entre pontos.

### 5.5 Procedimento experimental para averiguar o coeficiente de correlação da resistência dinâmica medida com os dados do circuito primário e o secundário da fonte de soldagem

Segundo estudo realizado por Cho et al. (2006) a medição da resistência dinâmica baseada na coleta de parâmetros de medição do circuito primário do equipamento de soldagem, pode ser realizada com considerável precisão, com os dados do primário da fonte de soldagem. A verificação da correlação entre a resistência dinâmica do circuito secundário com o primário foi realizada por intermédio de uma modelagem em uma rede neural, no qual se demonstrou que o coeficiente de correlação foi maior do que 0,92. É objetivo desta etapa, por intermédio de procedimento experimental, determinar o coeficiente de correlação da resistência dinâmica  $R_d$ , entre o primário e o secundário de uma determinada fonte de soldagem. Para tornar exequível esta etapa, este experimento foi realizado no laboratório de um fabricante de equipamento de soldagem, onde foi necessário

realizar algumas alterações nos circuitos elétricos da fonte de soldagem e no algoritmo do programa do controlador de soldagem, ações que seriam de grande complexidade em equipamentos instalados em áreas produtivas.

### 5.5.1 Equipamentos utilizados

Seguem descritos a seguir todos os equipamentos que foram utilizados nesta etapa, os corpos de prova e método de avaliação da qualidade do ponto de solda, são os mesmos utilizados na etapa 1.

#### 5.5.1.a Fonte de soldagem

Equipamento de soldagem tipo pedestal conforme demonstrado na Fig.(5.7), com transformador de soldagem de 45 kVA e tensão de 380 VAC refrigerado a água. Foi utilizado eletrodo de solda tipo E código E-26 conforme “Standard” RWMA. Equipamento articulado com pistão pneumático de 6" com regulador de pressão na entrada da linha de 6 bar.



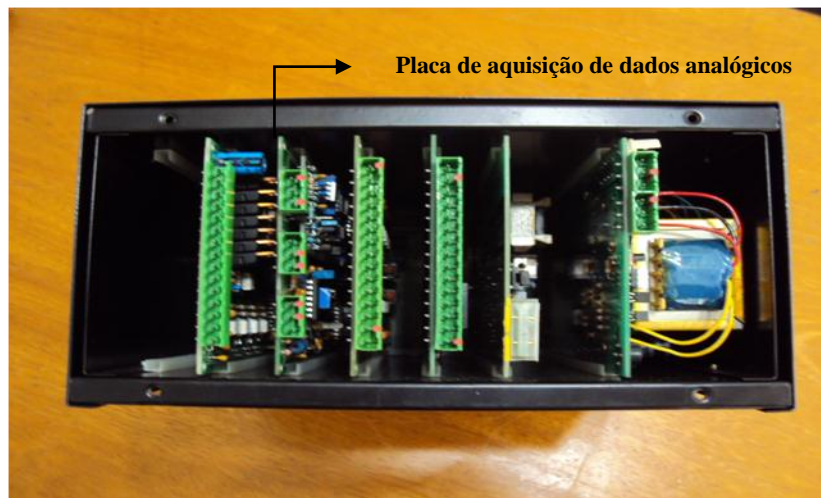
**Figura 5.7** – Fonte de soldagem de 45kVA adaptada para a medição da resistência dinâmica no primário e secundário simultaneamente

### 5.5.1.b Controlador de soldagem

O Controlador de soldagem modelo CCPT100 de marca DENCO conforme demonstrado na Fig. (5.8a) possui regulagem de potencia por intermédio de ajuste de fase e corrente de soldagem constante, com correção realizada através de “loop” fechado, pelo secundário da fonte de soldagem. O CCPT100 utiliza para controle dos parâmetros de processo de soldagem, processadores com alta velocidade de processamento, o que resulta em um grande poder de tratamento de dados e informações do processo simultaneamente, o que permite que funções como condicionamento de sinal e placa de aquisição de dados, sejam absorvidas pelo controlador de soldagem, por meio de inserções de placa dedicada em seu barramento de comunicação no bastidor de controlador conforme ilustrado na Fig., (5.8.b). Isto torna o processo de aquisição e tratamento de sinais, mais estável e robusto, em parte devido ao menor numero de peças e de interconexões externas.



**Figura 5.8a** – Controlador de soldagem de corrente constante para equipamento de soldagem monofásico por solda de resistência



**Figura 5.8b** – Visão da parte trazeira do controlador de soldagem ilustrando a placa de aquisição de dados e condicionamento de sinal incorporado ao controlador de soldagem

Segundo Cho et al (2002), a quando realizamos a medição da tensão e da corrente elétrica em uma carga puramente indutiva, a corrente elétrica esta defasada em  $90^\circ$  em relação à tensão elétrica, para minimizar este efeito durante o calculo da resistência dinâmica, a corrente e a tensão foram divididas pelo valor do pico. O algoritmo do controlador CCPT 100, foi programado para detectar e registrar os valores de pico em cada semiciclo da onda senoidal da corrente e tensão, do primário e do secundário simultaneamente, com quatro conversores analógicos de 12 bits com frequência de amostragem de 8kHz. Para que realize a medição da resistência dinâmica, o controlador de soldagem deve estar programado para operar como “Controle de Tensão Constante”, nesse modo de operação, o controlador mantém durante todo o ciclo de soldagem, o ângulo de disparo dos SCRs fixos, deste modo a tendência seria que a tensão do primário permaneça constante o período de soldagem, o que não ocorre na pratica, deste modo podemos assegurar, que toda variação de tensão e corrente que ocorrer, será em função da variação da resistência elétrica intrínseca no circuito de soldagem.

### **5.5.1.c Transformador de corrente (Tc1 e Tc2)**

Segundo Zhang (2006), os transformadores de correntes têm a finalidade de medir a corrente elétrica que circula em um cabo elétrico ou barra de alimentação, e

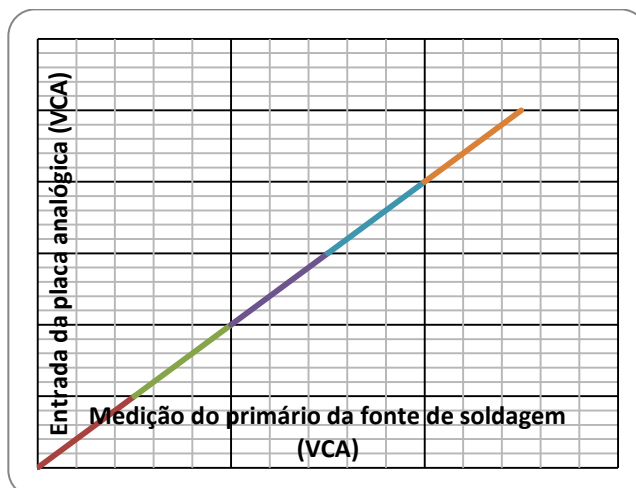
transformá-la em outra corrente de valor menor, para ser transmitida a um instrumento de medição ou circuito eletrônico. O transformador de corrente utilizado neste experimento demonstrado na Fig. (5.9), é um dispositivo confeccionado com uma bobina de varias camadas de fio de cobre de diâmetro de 0.10 mm, em núcleo de ar. A produção deste componente tem um grau de dificuldade elevado, devido à reduzida espessura do fio e da necessidade de uniformidade na distribuição das camadas, que por ser um dispositivo de medição, alterações nestas características, influenciam na precisão da medição. Este componente é produzido para medições de corrente de intensidade com fundo de escala em 100 kA, com precisão entre 1 a 3% do fundo de escala conforme demonstrado no anexo IV. Transformadores de corrente para estes níveis de intensidade, não são encontrados no mercado, por esta razão são projetados e produzidos pelo fabricante do equipamento de soldagem. Por ser uma bobina com núcleo de ar, tem como principal característica a linearidade, através de um amperímetro précalibrado ligado ao mesmo circuito do Tc, a fonte de soldagem gera uma intensidade de corrente, esta intensidade de corrente fica registrada no amperímetro, onde por intermédio de ajuste de ganho na placa de aquisição de dados, o controlador de soldagem é aferido para registrar o mesmo valor do amperímetro. Devido à linearidade do Tc, apenas um único ponto da curva necessita ser calibrado, as faixas de medição de corrente, que são de 0 a 10 kA e de 0 a 100 kA, é automaticamente calibrada e integrada pelo controlador em função da variação do fluxo magnético durante a passagem da corrente elétrica de soldagem pelo Tc.



**Figura 5.9** – Transformador de corrente de medição em núcleo de ar da fonte de soldagem do controlador CCPT 100

### 5.5.1.d Medição da tensão

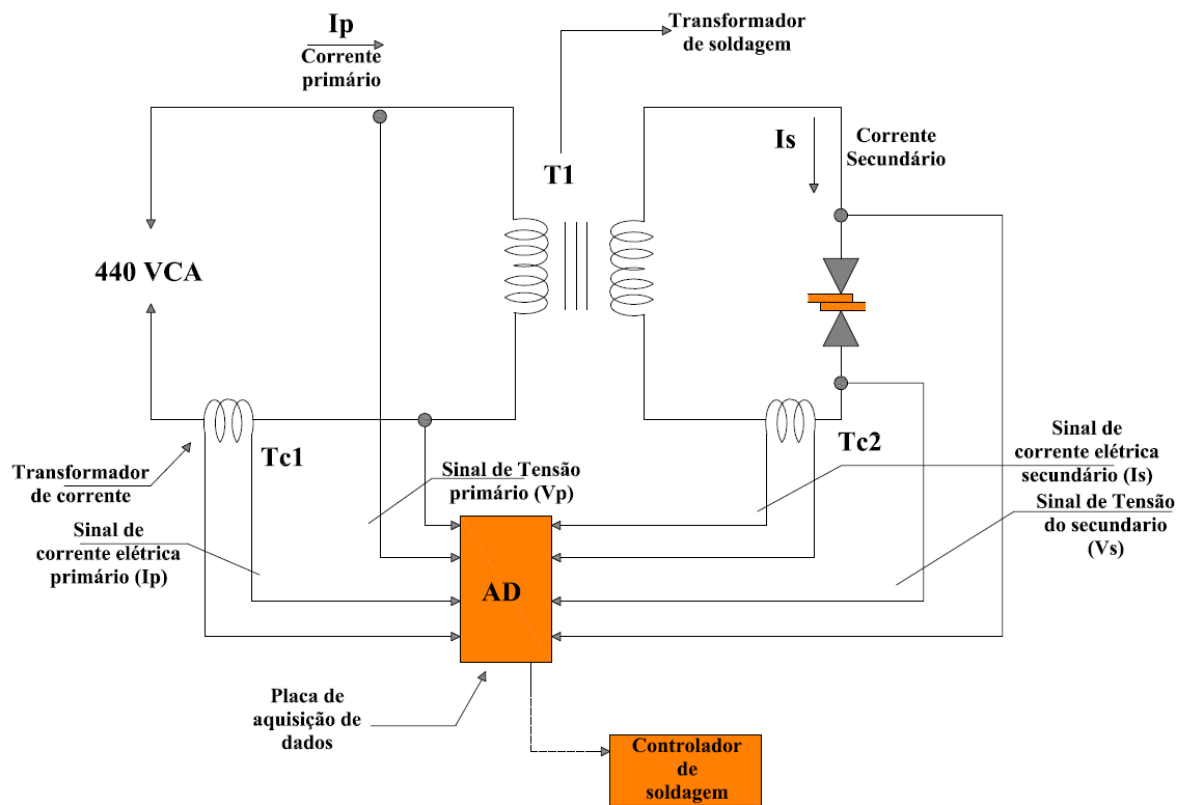
As medições das tensões da fonte de soldagem são realizadas pelo conversor analógico digital de doze bits pertencente à placa de aquisição de dados. A entrada deste conversor é limitada a 5 Volts. Para a medição da tensão do secundário da fonte de soldagem, que durante os ensaios os limites máximos ficaram abaixo desta faixa, os cabos de medições foram conectados diretamente na placa do conversor. A tensão do primário da fonte de soldagem, em que os níveis de tensão estão próximos a 400 VAC, foi conectada em um divisor de tensão com resistores de precisão, onde o ganho do amplificador de medição foi calibrado para atender a curva da figura 5.10 com equipamento de medição marca Fluke modelo 335 pré calibrado conforme certificado no anexo 6.



**Figura 5.10** – Curva de calibração do conversor analógico digital para a medição da tensão do primário da fonte de soldagem

### 5.5.1.e Bancada de testes

A bancada de teste utilizada neste experimento foi montada conforme circuito elétrico demonstrado na figura 5.11, observa-se que os valores das correntes de soldagem do primário ( $I_p$ ) e do secundário ( $I_s$ ), foram coletados pelos respectivos transformadores de corrente  $T_{c1}$  e  $T_{c2}$ , e as tensões do primário ( $V_p$ ) e secundário ( $V_s$ ) sendo que estes quatro sinais foram conectados por dois pares de cabos de cobre flexível trançados de  $0.75 \text{ mm}^2$ , até a placa analógica de condicionamento de sinal, incorporada ao controlador de soldagem CCPT 100.



**Figura 5.11** – Diagrama esquemático da bancada de teste adaptada para medição da resistência dinâmica ( $R_d$ ) do primário e secundário da fonte de soldagem

### 5.5.1.f Procedimento experimental para a correlação da resistência dinâmica do primário com o secundário de uma fonte de soldagem

Segundo RWMA (2002) em um transformador ideal, o produto do número de espiras que compõem o enrolamento primário ( $N_1$ ) pelo secundário ( $N_2$ ), determina a relação de transformação do transformador, sendo esta relação correlacionada diretamente com as tensões e corrente do primário e secundário conforme demonstrada na equação 5.6.

$$Rt = \frac{N_1}{N_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad (5.6)$$



Onde:

Rt= Relação de transformação;

N1= Numero de espiras do primário;

N2= Numero de espiras do secundário;

V1= Tensão do primário (VCA);

V2= Tensão do secundário (VCA);

I1= Corrente do primário (A);

I2= Corrente do secundário (A)

O calculo da resistência dinâmica Rd com os valores de tensão e corrente do primário, segundo a lei de Ohm é demonstrado da Eq. (5.7).

$$Rd = \frac{V2}{I2} \quad (5.7)$$

O calculo da resistência dinâmica com os valores de tensão e corrente do primário da fonte de soldagem, é composta pela lei de Ohm e a Eq. (5.6), onde na tensão e corrente elétrica são aplicadas o fator de transformação conforme demonstrado na Eq. (5.8).

$$Rd = \frac{\frac{V1}{Rt}}{(I1 \times Rt)} \quad (5.8)$$

É compulsório neste experimento para que o cálculo de Rd demonstrado na Eq. (5.8) obtenha uma forte correlação com a Eq.(5.7), que a fonte de soldagem se comporte próxima ao transformador ideal, onde as perdas térmicas na fonte de soldagem, possam ser consideradas desprezíveis, isto permite que a relação de transformação (Rt), esteja próximo ao valor teórico, validando a equação. Para isto a corrente máxima de soldagem utilizada para o levantamento de Rd, foi limitada a 60% da capacidade da fonte de soldagem, para evitar sobreaquecimentos no transformador de soldagem e demais componentes (RWMA, 2002).

Conforme demonstrado na tabela 5.6, os corpos de prova foram soldados com as correntes de soldagem variando as distâncias de 10 a 45 mm, o envelope de soldagem permaneceu constante durante esta etapa. Os valores de tensão e corrente do primário e secundário são representados respectivamente por (V1, I1) e (V2, I2).

**Tabela 5.6** – Matriz experimental para coleta da resistência dinâmica do primário e secundário de uma fonte de soldagem

Distância entre pontos ds (mm)	$Rd = \frac{V2}{I2}$			$Rd = \frac{V1}{I1} (I1 \times Rt)$		
	V2	I2	Rd Secundário	V1	I1	Rd Primário
10,0	V2 <sub>1</sub>	I2 <sub>1</sub>	Rd <sub>1</sub>	V1 <sub>1</sub>	I1 <sub>1</sub>	Rd <sub>1</sub>
15,0	V2 <sub>2</sub>	I2 <sub>2</sub>	Rd <sub>2</sub>	V1 <sub>2</sub>	I1 <sub>2</sub>	Rd <sub>2</sub>
20,0	V2 <sub>3</sub>	I2 <sub>3</sub>	Rd <sub>3</sub>	V1 <sub>3</sub>	I1 <sub>3</sub>	Rd <sub>3</sub>
25,0	V2 <sub>4</sub>	I2 <sub>4</sub>	Rd <sub>4</sub>	V1 <sub>4</sub>	I1 <sub>4</sub>	Rd <sub>4</sub>
30,0	V2 <sub>5</sub>	I2 <sub>5</sub>	Rd <sub>5</sub>	V1 <sub>5</sub>	I1 <sub>5</sub>	Rd <sub>5</sub>
35,0	V2 <sub>6</sub>	I2 <sub>6</sub>	Rd <sub>6</sub>	V1 <sub>6</sub>	I1 <sub>6</sub>	Rd <sub>6</sub>
40,0	V2 <sub>7</sub>	I2 <sub>7</sub>	Rd <sub>7</sub>	V1 <sub>7</sub>	I1 <sub>7</sub>	Rd <sub>7</sub>
45,0	V2 <sub>8</sub>	I2 <sub>8</sub>	Rd <sub>8</sub>	V1 <sub>8</sub>	I1 <sub>8</sub>	Rd <sub>8</sub>

Os sinais de tensão e corrente elétrica, são enviados para placa de aquisição de dados, que mensura e registra na memória interna do controlador de soldagem, os valores de pico da corrente e tensão em cada 1/2 ciclo da onda senoidal, conforme ilustrado na tabela 5.7, são geradas duas tabelas respectivamente com os valores do primário de secundário da fonte de soldagem, observa-se que no envelope de soldagem utilizado nesta etapa, o tempo de soldagem é de dez ciclos, conseqüentemente, obtêm-se dez valores de tensão e corrente para cada ciclo de soldagem. Onde estes dados são exportados para um PC sendo calculados os valores de Rd a cada ciclo do tempo total de soldagem, onde o Rd resultante é a média aritmética das resistências dinâmicas de todos os ciclos do período de soldagem.

**Tabela 5.7** – Tabela representativa dos parâmetros coletados pelo controlador de soldagem durante o ciclo de soldagem para o calculo da resistência dinâmica

Ciclo de Soldagem	Parâmetros do Primário			Parâmetros do Secundário		
	Tensão de pico	Corrente de pico	Resistência dinâmica	Tensão de pico	Corrente de pico	Resistência dinâmica
1	Vp1	Ip1	Rd1	Vp1	Ip1	Rd1
2	Vp2	Ip2	Rd2	Vp2	Ip2	Rd2
3	Vp3	Ip3	Rd3	Vp3	Ip3	Rd3
4	Vp4	Ip4	Rd4	Vp4	Ip4	Rd4
5	Vp5	Ip5	Rd5	Vp5	Ip5	Rd5
6	Vp6	Ip6	Rd6	Vp6	Ip6	Rd6
7	Vp7	Ip7	Rd7	Vp7	Ip7	Rd7
8	Vp8	Ip8	Rd8	Vp8	Ip8	Rd8
9	Vp9	Ip9	Rd9	Vp9	Ip9	Rd9
10	Vp10	Ip10	Rd10	Vp10	Ip10	Rd10

## **6. RESULTADOS E DISCUSSÕES**

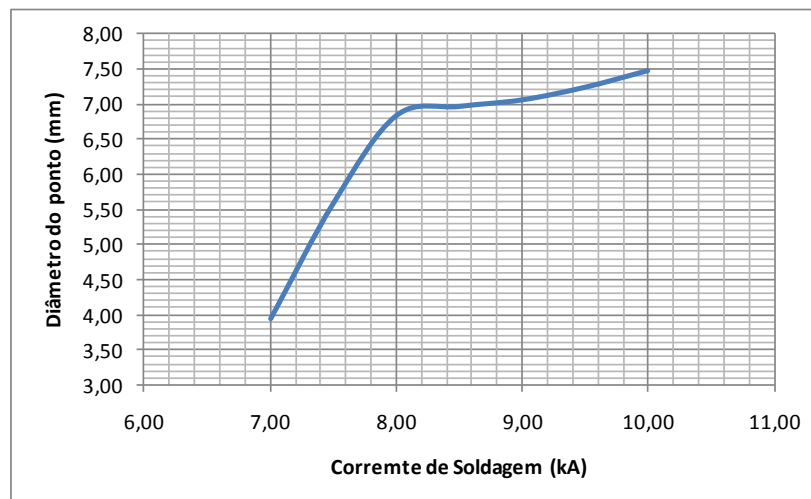
Com base na metodologia apresentada no capítulo V, serão apresentados e discutidos os resultados proveniente das duas etapas dos planejamentos experimentais realizados.

### **6.1 Mapeamento da curva do diâmetro do ponto de solda em função da corrente de soldagem**

Nesta etapa do experimento foi levantada a curva do diâmetro do ponto de solda em função da corrente de soldagem. Nesta etapa houve problemas nos primeiros ensaios realizados, sendo que os diâmetros encontrados entre os corpos de prova em um mesmo "setup" de corrente de soldagem, obteve uma variação de amplitude do diâmetro muito alta. E após análises realizadas com a equipe, verificou-se que os corpos de prova necessitavam de uma limpeza mais profunda, o que foi realizado, sendo que os ensaios realizados após esta ação, obtiveram resultados aderentes. O "setup" de corrente de soldagem para este material conforme "Standard" Ford BA 013-04 é de 8 kA, para o levantamento da curva foram quatro "setup" de corrente de soldagem superiores e inferiores, com intervalo de 0,50 kA, foram produzidos três corpos de prova para cada "setup" de corrente. Observa-se que para os valores de 6,0 e 6,5 kA de corrente de soldagem, não ocorreram fusões nos corpos de prova, pois a energia produzida foi muito inferior à necessária para soldagem deste material. Na Fig. (6.1) verifica-se que a partir de 8 kA, não há acréscimo significativo no diâmetro da zona fundida, onde podemos constatar como mencionado no item 2.6.3, que este é o valor máximo de corrente na curva do lóbulo de soldabilidade deste material, onde a qualidade da solda pode ser comprometida, devido a elevada profundidade da indentação, respingos ou fusão inadequado do ponto de solda.

**Tabela 6.1** Tabela do diâmetro do ponto de solda em função da variação da corrente de soldagem

Corrente (kA)	Diâmetro 1 (mm)	Diâmetro 2 (mm)	Diâmetro 3 (mm)	$\Delta$ (mm)	Diâmetro médio (mm)
6,00	Solto	Solto	Solto	-	-
6,50	Solto	Solto	Solto	-	-
7,00	3,90	3,95	3,99	0,09	3,95
7,50	5,50	5,59	5,70	0,20	5,60
8,00	6,90	6,80	6,83	0,10	6,84
8,50	6,95	7,00	6,97	0,05	6,97
9,00	7,05	7,15	7,00	0,15	7,07
9,50	7,30	7,29	7,15	0,15	7,25
10,00	7,45	7,60	7,40	0,20	7,48



**Figura 6.1** Gráfico do diâmetro do ponto de solda em função da corrente de soldagem

## 6.2 Mapeamento da perda da corrente de “shunt” em função da distância entre os pontos de solda

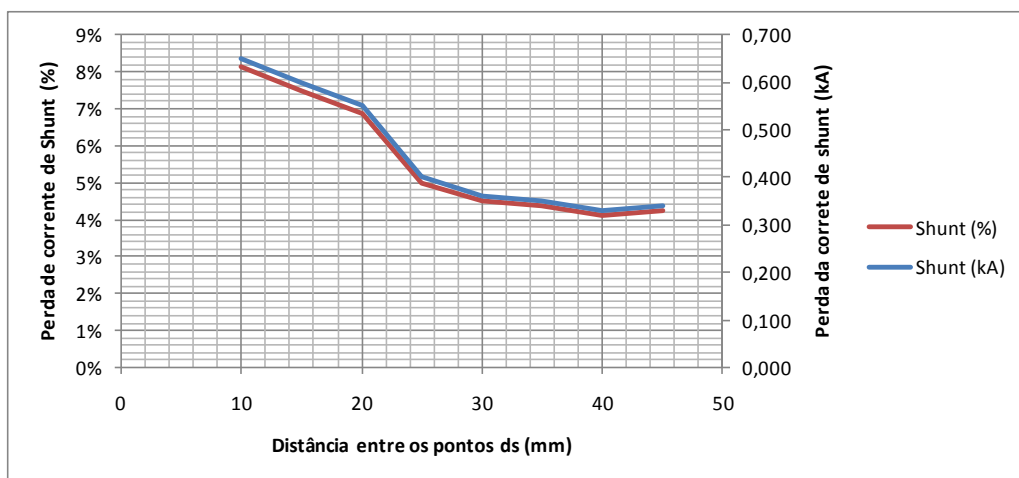
Nesta etapa do experimento foi levantada a curva da perda da corrente de “shunt” pela variação da distância entre os pontos de solda. Para que a curva da fosse obtida, foram soldados três copos de prova para cada valor de  $d_s$ , o qual variou de 10 a 45 mm com intervalo de 5 mm. Observa-se na tabela 6.2 que para cada valor de corrente, são coletados os diâmetros da zona fundida dos corpos de prova, onde são calculadas a média dos três diâmetros, o valor é interpolado com a curva da figura 6.1 onde obtemos o valor real da intensidade de corrente de soldagem que

passou pela zona fundida, subtraindo o valor obtido na curva do valor de corrente de soldagem programada na fonte de soldagem, que foi de 8 kA e constante durante toda etapa deste experimento, obtêm-se a corrente de “shunt” em kA e % para cada intervalo de **ds**.

**Tabela 6.2** – Tabela do levantamento do diâmetro do ponto de solda em função da variação da distância entre os pontos de soldagem (ds)

ds (mm)	Diâmetro 1 (mm)	Diâmetro 2 (mm)	Diâmetro 3 (mm)	$\Delta$ (mm)	Diâmetro médio (mm)	Corrente Shunt (kA)	Corrente Shunt (%)
10	4,95	4,90	4,87	0,08	4,91	0,650	8%
15	5,10	5,15	5,00	0,15	5,08	0,600	8%
20	5,32	5,44	5,60	0,28	5,45	0,550	7%
25	5,56	5,60	5,80	0,24	5,65	0,400	5%
30	5,68	5,67	5,72	0,05	5,69	0,360	5%
35	5,91	5,95	6,00	0,09	5,95	0,350	4%
40	6,00	6,30	6,01	0,30	6,10	0,330	4%
45	5,99	6,00	6,30	0,31	6,10	0,340	4%

Observa-se na figura 6.2 como já demonstrado no estudo de Chang (1990), que **ds** é inversamente proporcional em relação à corrente de “shunt”, no valor mínimo de **ds** recomendado pelo Standard Ford Laboratory Test Method – BA 013-04, onde para esta espessura de chapa é de 20 mm, onde a perda de corrente de “shunt” esta em torno de 7% ou de 0,500 kA, quando o valor de **ds** incrementa acima de 30 mm verifica-se que a corrente de “shunt” estabiliza em uma perda em torno de 4%.



**Figura 6.2** – Curva da corrente de shunt em kA e % em função da variação de **ds** nos corpos de prova

### 6.3 Mapeamento da correlação da resistência dinâmica (Rd) do primário e secundário da fonte de soldagem

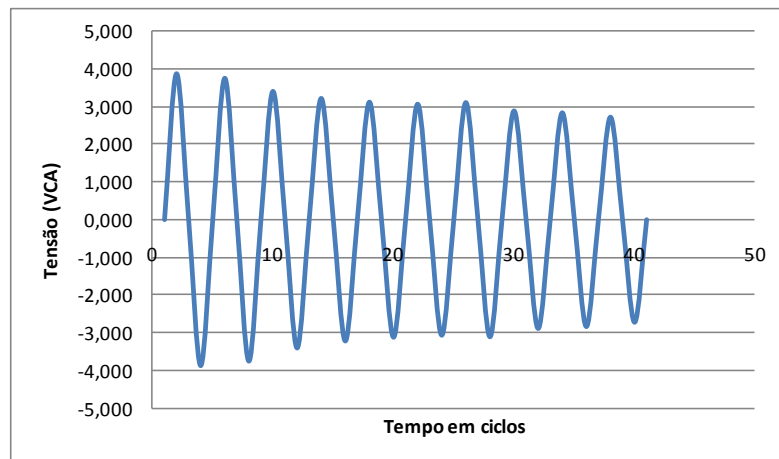
Através da placa de conversão analógica/digital (A/D) conjugada ao controlador de soldagem, foi realizada a medição da tensão e corrente elétrica de pico para cada  $\frac{1}{2}$  ciclo de soldagem. Para que fossem alteradas as resistências dinâmicas dos corpos de prova durante esta etapa, as distâncias **ds** foram variadas de 10 a 45 mm conforme ensaio realizado na etapa I. Como demonstrado na Tab. (6.1) o controlador de soldagem registrou em um banco de dados os valores de tensão e corrente elétrica durante os dez ciclos de soldagem. Para cada valor de **ds** foram realizados três ensaios em corpos de prova, onde respectivamente estão demonstrados como Tensão e Corrente com os índices correspondentes a (1,2 e 3). Esta tabela foi exportada para o P.C. através de um cabo de comunicação serial conectado no controlador de soldagem, o arquivo foi posteriormente carregado em uma planilha Excel, conforme demonstrado na Tab. (6.3), onde são calculados os valores de Rd para cada ciclo de solda, sendo o Rd final a média aritmética de todo o período de soldagem, com estes dados foram geraram as curvas de tensão, corrente elétrica e resistência dinâmica (Rd) conforme demonstrado respectivamente nas Fig. (6.3, 6.4 e 6.5). As medições de tensão e corrente do primário e do secundário foram coletadas simultaneamente durante todo o processo de soldagem, onde para o primário foram geradas informações, tabelas e gráficos análogos aos do secundário conforme demonstradas nas tabelas 6.4 e 6.5 e figuras 6.6, 6.7 e 6.8.

**Tabela 6.3** – Tabela dos valores registrados pelo controlador de soldagem dos valores de tensão e corrente elétrica do secundário para  $d_s = 45 \text{ mm}$

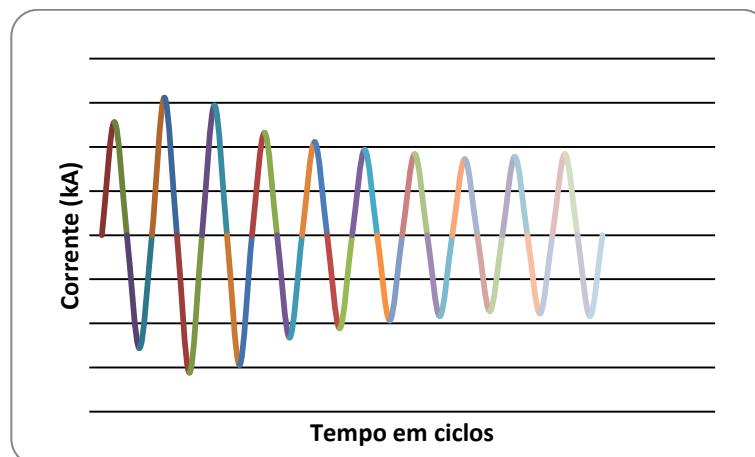
Ciclo	Tensão 1	Corrente 1	Tensão 2	Corrente 2	Tensão 3	Corrente 3
	VCA	kA	VCA	kA	VCA	kA
0,0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,3	3,890	5,120	3,870	5,130	3,890	5,211
0,5	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,8	-3,890	-5,120	-3,870	-5,130	-3,890	-5,211
1,0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1,3	3,770	6,230	3,780	6,330	3,770	6,244
1,5	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1,8	-3,770	-6,230	-3,780	-6,330	-3,770	-6,244
2,0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2,3	3,420	5,880	3,323	5,750	3,320	5,790
2,5	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2,8	-3,420	-5,880	-3,323	-5,750	-3,320	-5,790
3,0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
3,3	3,233	4,640	3,160	4,764	3,200	4,640
3,5	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
3,8	-3,233	-4,640	-3,160	-4,764	-3,200	-4,640
4,0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
4,3	3,134	4,220	3,133	4,342	3,122	4,298
4,5	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
4,8	-3,134	-4,220	-3,133	-4,342	-3,122	-4,298
5,0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
5,3	3,080	3,865	3,000	3,908	3,433	3,997
5,5	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
5,8	-3,080	-3,865	-3,000	-3,908	-3,433	-3,997
6,0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
6,3	3,122	3,670	3,112	3,720	3,100	3,680
6,5	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
6,8	-3,122	-3,670	-3,112	-3,720	-3,100	-3,680
7,0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
7,3	2,900	3,443	2,998	3,520	2,999	3,423
7,5	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
7,8	-2,900	-3,443	-2,998	-3,520	-2,999	-3,423
8,0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
8,3	2,850	3,553	2,844	3,760	2,876	3,565
8,5	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
8,8	-2,850	-3,553	-2,844	-3,760	-2,876	-3,565
9,0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
9,3	2,734	3,674	2,700	3,675	2,788	3,698
9,5	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
9,8	-2,734	-3,674	-2,700	-3,675	-2,788	-3,698
10,0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

**Tabela 6.4** – Tabela do cálculo da resistência dinâmica (Rd) do secundário para cada ciclo de solda e a média total do período de soldagem

Ciclo	Rd1	Rd2	Rd3	Rd(m)
1	7,60E-04	7,54E-04	7,46E-04	7,54E-04
2	6,05E-04	5,97E-04	6,04E-04	6,02E-04
3	5,82E-04	5,78E-04	5,73E-04	5,78E-04
4	6,97E-04	6,63E-04	6,90E-04	6,83E-04
5	7,43E-04	7,22E-04	7,26E-04	7,30E-04
6	7,97E-04	7,68E-04	8,59E-04	8,08E-04
7	8,51E-04	8,37E-04	8,42E-04	8,43E-04
8	8,42E-04	8,52E-04	8,76E-04	8,57E-04
9	8,02E-04	7,56E-04	8,07E-04	7,88E-04
10	7,44E-04	7,35E-04	7,54E-04	7,44E-04
Sec	7,422E-04	7,261E-04	7,478E-04	7,387E-04

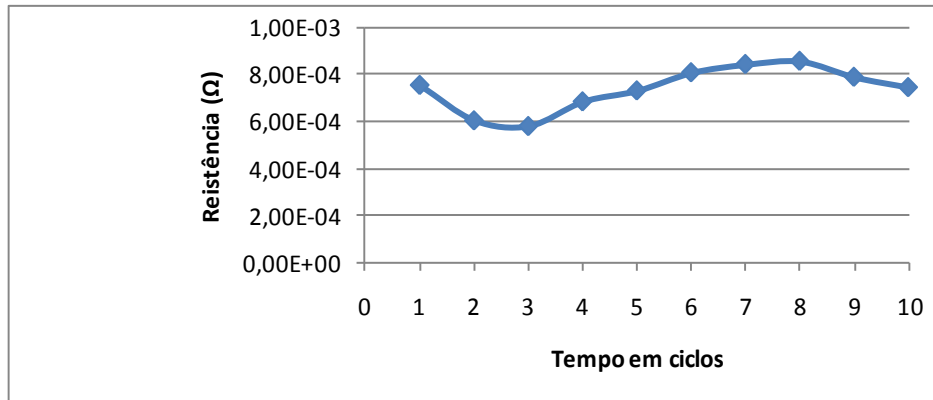


**Figura 6.3** – Curva da tensão elétrica do circuito secundário para  $d_s = 45$  mm



**Figura 6.4** – Curva da corrente elétrica do circuito secundário para  $d_s = 45$  mm





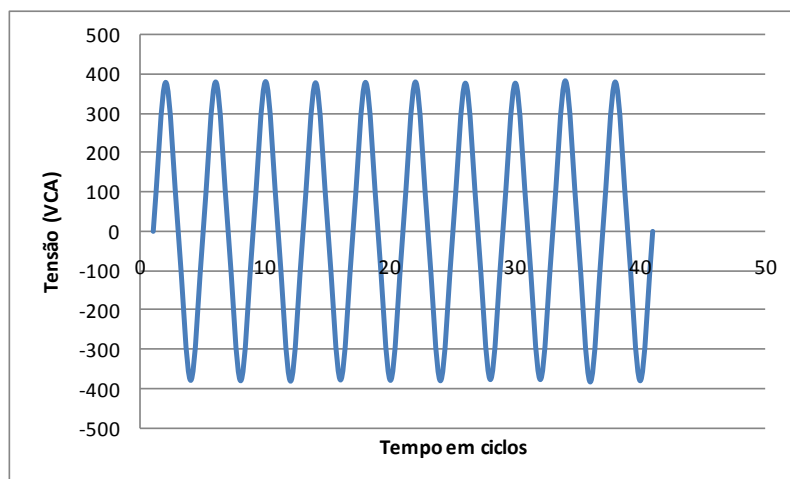
**Figura 6.5** – Curva da resistência elétrica ( $R_d$ ) do circuito secundário para  $d_s = 45$  mm

**Tabela 6.5** – Tabela dos valores registrados pelo controlador de soldagem dos valores de tensão e corrente elétrica do primário para ds= 45 mm

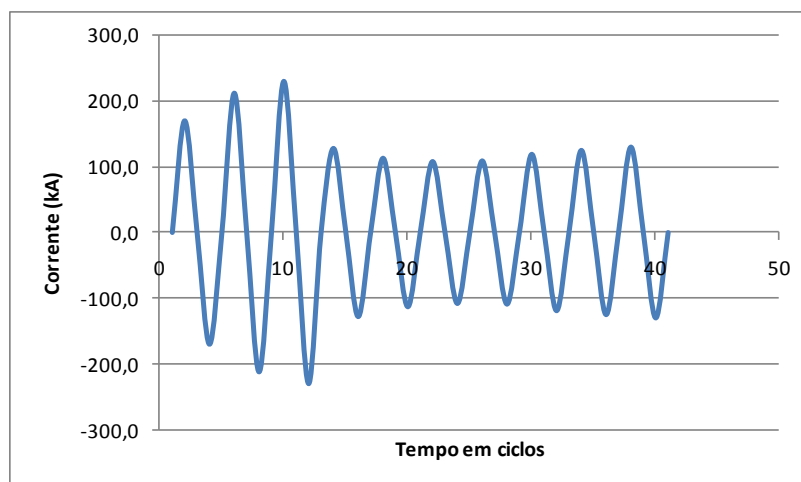
Ciclo	Tensão 1	Corrente 1	Tensão 2	Corrente 2	Tensão 3	Corrente 3
	VCA	A	VCA	A	VCA	A
0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0
0,3	380	170,0	382	172,0	378	169,0
0,5	0	0,0	0	0,0	0	0,0
0,8	-380	-170,0	-382	-172,0	-378	-169,0
1,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0
1,3	381	212,0	381	210,0	381	211,0
1,5	0	0,0	0	0,0	0	0,0
1,8	-381	-212,0	-381	-210,0	-381	-211,0
2,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0
2,3	382	230,0	382	233,0	393	230,0
2,5	0	0,0	0	0,0	0	0,0
2,8	-382	-230,0	-382	-233,0	-393	-230,0
3,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0
3,3	379	128,0	379	127,0	380	128,0
3,5	0	0,0	0	0,0	0	0,0
3,8	-379	-128,0	-379	-127,0	-380	-128,0
4,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0
4,3	380	113,0	380	112,0	392	112,0
4,5	0	0,0	0	0,0	0	0,0
4,8	-380	-113,0	-380	-112,0	-392	-112,0
5,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0
5,3	381	108,0	381	115,0	378	108,0
5,5	0	0,0	0	0,0	0	0,0
5,8	-381	-108,0	-381	-115,0	-378	-108,0
6,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0
6,3	378	109,0	378	112,0	378	110,0
6,5	0	0,0	0	0,0	0	0,0
6,8	-378	-109,0	-378	-112,0	-378	-110,0
7,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0
7,3	378	119,0	377	120,0	380	117,0
7,5	0	0,0	0	0,0	0	0,0
7,8	-378	-119,0	-377	-120,0	-380	-117,0
8,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0
8,3	384	125,0	386	123,0	384	124,0
8,5	0	0,0	0	0,0	0	0,0
8,8	-384	-125,0	-386	-123,0	-384	-124,0
9,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0
9,3	381	130,0	382	123,0	383	124,0
9,5	0	0,0	0	0,0	0	0,0
9,8	-381	-130,0	-382	-123,0	-383	-124,0
10,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0

**Tabela 6.6** – Tabela do cálculo da resistência dinâmica ( $R_d$ ) do primário para cada ciclo de solda e a média total do período de soldagem

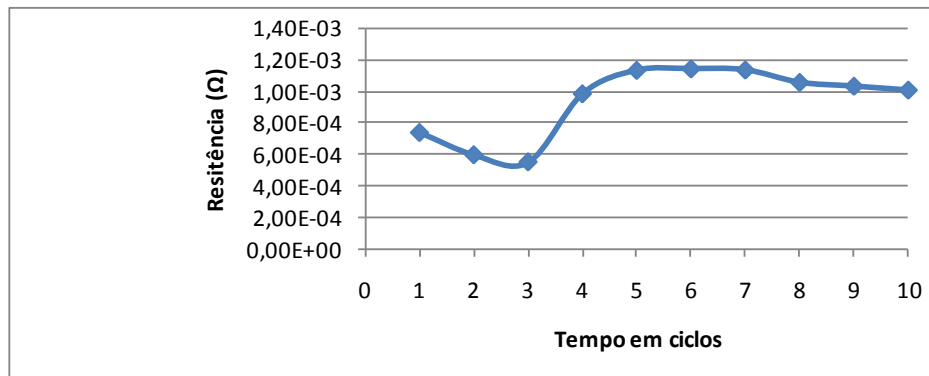
Ciclo	Rd1	Rd2	Rd3	Rd(m)
1	7,39E-04	7,34E-04	7,39E-04	7,38E-04
2	5,94E-04	6,00E-04	5,97E-04	5,97E-04
3	5,49E-04	5,42E-04	5,65E-04	5,52E-04
4	9,79E-04	9,87E-04	9,81E-04	9,82E-04
5	1,11E-03	1,12E-03	1,16E-03	1,13E-03
6	1,17E-03	1,10E-03	1,16E-03	1,14E-03
7	1,15E-03	1,12E-03	1,14E-03	1,13E-03
8	1,05E-03	1,04E-03	1,07E-03	1,05E-03
9	1,02E-03	1,04E-03	1,04E-03	1,03E-03
10	9,69E-04	1,03E-03	1,02E-03	1,01E-03
RD	9,32E-04	9,30E-04	9,46E-04	9,36E-04



**Figura 6.6** – Curva da tensão elétrica do circuito primário para  $d_s = 45$  mm



**Figura 6.7** – Curva da corrente elétrica do circuito primário para  $d_s = 45$  mm



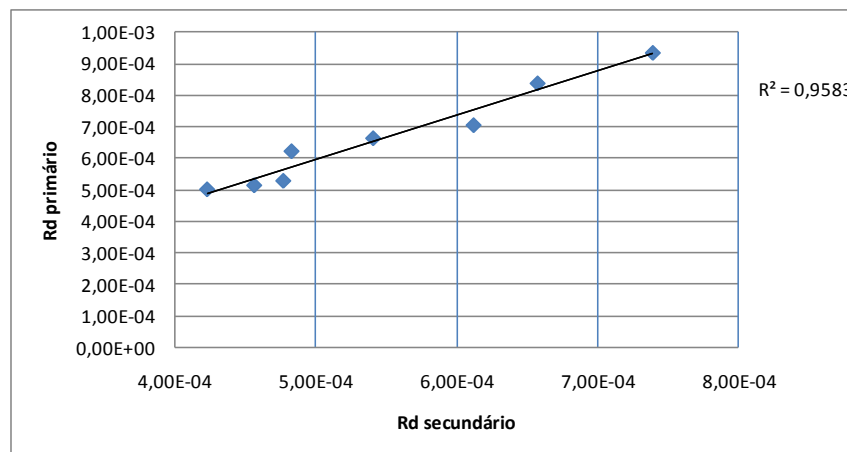
**Figura 6.8** – Curva da resistência elétrica ( $R_d$ ) do circuito secundário para  $d_s = 45$  mm

A relação de transformação ( $rt$ ) é um dado de fundamental importância para que a resistência dinâmica calculada com os parâmetros do primário, venha a refletir os valores de  $R_d$  do secundário, portanto houve uma atenção especial durante os experimentos para o levantamento deste dado. Usualmente as fontes de soldagens para equipamentos de solda por resistência, os valores de  $rt$  são bastante elevados, e estão em torno de 50 a 100, em relação aos transformadores aplicados na área de distribuição de energia, os quais normalmente trabalham na ordem de ( $1 \leq rt \leq 10$ ). Devido às variações no processo de manufatura dos transformadores de soldagem, os valores de  $rt$  também variam entre os transformadores da mesma especificação, o que na prática não afeta o desempenho do equipamento, mas há uma forte influência na precisão dos resultados do experimento. Sendo assim foi recomendado pelos engenheiros da empresa DENCO, que o ideal para este experimento, era que a relação de transformação fosse medida por um equipamento especial para esta função, denominado de medidor de relação de transformação, para confrontarmos com o valor teórico. Consultamos alguns fabricantes de transformadores sobre a possibilidade de empréstimo deste equipamento, mas todos os fabricantes consultados informaram que não possuíam este equipamento, e quando é necessário realizar esta medição, o serviço é terceirizado e comprado de laboratórios credenciados. Os resultados apresentados foram realizados com o valor teórico de  $rt$ , sendo a medição do mesmo uma oportunidade de melhoria para trabalhos futuros. Conforme

demonstrado na Tab. (6.7) é apresentado os resultados dos cálculos de Rd do primário e do secundário para **ds** com intervalo de 10 a 45 mm. Observa-se na Fig. (6.9) que os valores foram correlacionados em uma curva de dispersão (x,y) onde verificamos que o valor de  $R^2 = 0.9583$  demonstra uma forte correlação entre a resistência dinâmica do primário e do secundário.

**Tabela 6.7** – Tabela dos valores de Rd do secundário e primário para corpos de prova com ds de 10 a 45 mm

dS (mm)	Rd (médio)		$\Delta$ Rd
	Secundário	Primário	
45	7,39E-04	9,36E-04	-1,97E-04
40	6,57E-04	8,39E-04	-1,82E-04
35	6,12E-04	7,06E-04	-9,39E-05
30	5,41E-04	6,64E-04	-1,23E-04
25	4,83E-04	6,23E-04	-1,40E-04
20	4,77E-04	5,29E-04	-5,14E-05
15	4,57E-04	5,14E-04	-5,76E-05
10	4,23E-04	5,01E-04	-7,82E-05



**Figura 6.9** – Curva de dispersão para os valores de Rd do primário e secundario

## **6.4 Considerações finais**

### **6.4.1 Proposta de redução de consumo de energia elétrica fundamentado na redução de corrente de “shunt” durante o processo de soldagem de uma carroceria de um automóvel**

De acordo com o estudo realizado pela FGV (2010), até 2030 ocorrerá um aumento no custo da energia elétrica estimado em 30%. No período de 2001 a 2007 os custos com energia elétrica subiram 170% na indústria, percentual três vezes superiores à taxa do IPCA, dado que ampara essa previsão. Nos países Europeus são aplicados esforços na redução do consumo de energia elétrica desde o início dos anos 80. Com a aceleração do processo de globalização e constante necessidade de redução de custos, é de vital importância a diminuição do consumo de energia elétrica, item que geralmente corresponde à grande parte dos custos de produção. A eficiência na administração e consequente redução no consumo de energia elétrica são essenciais para o aumento da competitividade no mercado internacional.

De acordo com dados da Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2010), o setor industrial é responsável por 46% de todo o consumo de energia elétrica no Brasil sendo que 28,5% por sistemas motrizes industriais. A eficiência no consumo de energia elétrica reduz a necessidade de investimentos em infraestrutura, capacidade as empresas utilizarem dos recursos para investirem em outras áreas, e em conjunto contribuindo para o meio ambiente.

É um dos objetivos deste trabalho, propor diretrizes para redução de consumo de energia elétrica, com a redução do efeito da corrente de “shunt” conforme mapeamento do fenômeno com base no estudo experimental. Conforme demonstrado na tabela 6.8, foi realizado um cálculo estimado da perda de energia em kW/h, gerada pela corrente de “shunt”. Este estudo foi fundamento na fabricação de um carro popular, onde em média são realizados 3500 pontos de solda, tendo com base o material utilizado neste experimento, estimou-se uma redução de 2% para a distância mínima de 30 mm para a chapa de espessura de 0,8 mm. Os parâmetros de soldagem, corrente elétrica e tempo de soldagem, que serviram como base para o cálculo de consumo em kW/h do ponto de soldagem, foram adotados conforme recomendação do Ford Laboratory Test Method – BA 013-04. Verifica-se

que nestas condições, é estimado que ocorra uma perda de energia de 800 000 kW/h ao ano.

**Tabela 6.8** Cálculo estimado da perda de energia elétrica em kW/h ao ano na fabricação de uma carroceria de um automóvel

Cálculo teórico da corrente de "Shunt" baseado na chapa de espessura de 0.8 mm						
Numero de pontos de solda	Corrente média (kA)	Tempo de soldagem (ciclos)	Número de carros/ano	% estimado de perda de corrente de "shunt"	Perda estimada em kW/ano	Perda estimada em (R\$*)/ano
3500	8	10	250000	20%	793.333	R\$ 269.733,33
*OBS: Custo da tarifa residencial publicada pela ANATEL Jul/2010.						

#### 6.4.2 Proposta de método de gestão de qualidade da solda em tempo real de uma carroceira de automóvel

##### 6.4.2.1 Sistema de “Supervisory Control And Data Acquisition” (SCADA)

A utilização de sistemas de supervisão nos processos produtivos tem se tornado uma ferramenta indispensável para o acesso, gerenciamento e obtenção de dados dos processos industriais, devido ao constante e freqüente desenvolvimento tecnológico, e ao aumento da complexidade dos equipamentos de automação industrial. Softwares Supervisórios industriais, usualmente denominados de “Supervisory Control and Data Acquisition” (SCADA), têm sido amplamente utilizados em diversos ambientes industriais para armazenar dados do processo e controlá-lo de acordo com alguma estratégia adotada. O hardware de controle de um sistema SCADA é o conjunto de equipamentos responsáveis pela execução desta tarefa. O software de supervisão SCADA acessa os dados dos processos por intermédio de redes industriais, os tornados disponíveis para os usuários (SOUZA, R. B., 2007).

Observa-se que nas ultimas décadas, os controladores de soldagem fabricados pelos principais fornecedores de equipamentos de soldagem, são manufaturados

com circuitos eletrônicos micro processados, os quais incorporaram maior precisão no controle do processo de soldagem, bem como, acrescentaram recursos avançados de programação e monitoração de parâmetros de processo de soldagem. Usualmente os controladores de soldagem possuem algum tipo de conexão, ou porta de comunicação, que permite a conexão com redes de comunicação industrial, nas quais estão conectados equipamentos de controle de processos automatizados, normalmente utilizados nas áreas de manufatura. A conexão dos controladores de soldagem com as redes de comunicação industrial, promove a interação dos equipamentos de soldagem, com outros equipamentos e dispositivos. Troca de dados com robôs, transportadores de peças, manipuladores, medidores de fluxo de fluidos, computadores entre outros dispositivos e equipamentos, hoje são realizadas por intermédio de redes de comunicação industrial. Ao estabelecer a integração dos dados digitalmente, por meio de uma rede de comunicação entre os mais diferentes níveis hierárquicos dentro de uma indústria, reduz-se o custo de fabricação, aumentando a produtividade e se estabelece um novo conceito em automação industrial e a integrabilidade de seus componentes nos mais diferentes níveis (SOUZA, C.A., 2000).

A integração dos controladores de soldagem com a rede industrial, congregou no processo, uma poderosa ferramenta de administração e controle de processo. Por intermédio desta estrutura de hardware e software, os Supervisórios SCADA, permitem que os parâmetros dos processos sejam monitorados e controlados em tempo real. Outras funções como registro de alarmes, geração de gráficos de tendências, registro dos parâmetros de processo, controle de acesso de usuários, controle de mudança dos parâmetros, usualmente são funções pré-definidas destes softwares, e são armazenadas em bancos de dados nos P.C.s. para possíveis Estudos realizados por autores como GEDEON, S. A. et al (1987), Cho, Y. RHEE, S. (2002) e Bracarense, A. Q. (1999), demonstraram que a resistência dinâmica, tem uma forte correlação com a geometria da zona fundida do ponto de solda, podendo ser um parâmetro de processo bastante robusto, para monitorar e controlar a qualidade do ponto de solda, as informações dos cálculos de  $R_d$  dos pontos de solda das carrocerias, deve ser armazenada em um banco de dados central, usualmente em um servidor de dados central, para serem disponibilizadas para o Supervisório SCADA.



Para incorporar um sistema de gestão da qualidade dos pontos de solda no sistema Supervisório SCADA, é desejável que o mesmo deva conter, entre outros recursos, o desenho da carroceria com o mapa de todos os pontos de solda, que são realizados no processo produtivo. Os pontos de solda devem ser identificados com seus respectivos endereços, mapeados por componentes ou conjuntos, onde este mapeamento, sincronizado com o equipamento de soldagem, irá gerar um banco de dados com as informações da resistência dinâmica de todos os pontos de solda em tempo real, de todas as carrocerias produzidas por um período de tempo, limitado pela capacidade do banco de dados. Como cada carroceria hoje possui um código de identificação durante o processo de produtivo, a mesma poderá ser rastreada no banco de dados, e deverá conter as informações de todos os pontos de solda aprovados e rejeitados, baseado na curva padrão de resistência dinâmica de um ponto de solda aprovado armazenada no controlador de soldagem. Este controle permite que a qualidade e o controle da zona fundida sejam realizados em tempo real, sem a necessidade de utilização de testes destrutivos que costumam demandar tempo, terem um custo elevado, e também são controles de qualidade caracterizados como reativo, (Rossi, G. P. 2007).

As indústrias de automóvel e petroquímica podem ser classificadas como exemplo de empresas com alto nível de investimento, tanto em automação como integração nos processos de produção com foco na produtividade. A figura 6.10 representa uma estrutura da topologia dos principais elementos que compõem usualmente um processo automatizado de uma indústria. Iniciando na camada dos processos físicos, temos os sensores e atuadores monitorando as informações de processo, e usualmente convertendo em sinais elétricos, nos níveis de controle os sinais do processo são tratados em algoritmos pré-determinados, usualmente são utilizados equipamentos denominados de Controlador Lógico Programável (C.L.P.) para esta aplicação, os Controladores de Soldagem, podem também, estarem classificados nesta camada, a camada de nível de rede de comunicação, é onde esta contida a rede industrial a qual se comunicam os equipamentos industriais. Na camada supervisão é onde atuam os Supervisórios SCADA, na camada Gerência é onde usualmente operam os sistemas de gestão denominados de “Enterprise Resource Planning” (E.R.P), (GAMBÔA, 2004, SOUZA, R. B., 2007).



**Figura 6.10** Representação das camadas de elementos na Automação Industrial (adaptado de SOUZA, 2007)

#### **6.4.2.2 Sistemas ERP**

Durante os anos 90, a implementação dos sistemas integrados de gestão empresarial “Enterprise Resource Planning” (ERP), surge como um dos principais focos de investimento relacionados à utilização de tecnologia de informação nas empresas, que visavam obter vantagens competitivas por meio de redução de custo e diferenciação de produtos com a utilização destes sistemas. Uma das vantagens destes sistemas é a possibilidade de integrar diversos departamentos da empresa, como produção, contabilidade, sistemas de qualidade, logística, recursos humanos, interação com os sistemas SCADA entre outros (SOUZA, C.A., 2000).

Os sistemas ERP, podem ser definidos como sistemas de informação integrados, que usualmente são adquiridos na forma de módulos ou pacotes de softwares comerciais. Uma das características dos ERP, é que os diferentes módulos de software, compartilham da mesma base de dados central, possibilitando que, informações alimentadas por um módulo, são imediatamente disponibilizadas para os demais módulos. Os sistemas ERP permitem também que sejam utilizadas ferramentas gerenciais de planejamento, as quais auxiliam nas decisões das áreas de manufatura, finanças, recursos humanos e demais áreas (GAMBÔA, 2004).

Segundo Norris et al. (2001), o sistema ERP não é exclusivamente um sistema estratégico e sim, uma tecnologia de suporte, com a finalidade de integrar e controlar toda a informação trocada dentro das empresas. No cenário atual, isto tem sido modificado de dois modos: O primeiro, com o ERP deixando de ser somente transacional e passando a ser um sistema de gestão e suporte às decisões, através da integração com os sistemas de Gerenciamento de Relacionamento com o Cliente “Customer Relationship Management” (CRM), Gerenciamento da Cadeia de Fornecedores “Supply Chain Management” (SCM), “Quality Function Deployment” (QFD) e “Business Intelligence” (BI). A segunda forma vem da necessidade das empresas aumentarem a troca de informações, e colaborarem mais entre si, buscando reduções de custos e aumento de produtividade nas cadeias de fornecimento, onde o ERP tem o papel de viabilizar e tornar mais eficiente esta colaboração.

Observa-se que nas indústrias automobilísticas Brasileira, a aplicação dos sistemas Supervisórios SCADA, hoje é uma forte realidade abrangendo praticamente todos os processos produtivos automatizados. O sistema ERP, que devido a fatores como alto custo, demandando grande período de implementação e necessitar de envolvimento e planejamento de varias áreas da empresa, esta presente nas empresas automobilísticas, mas com o nível diferenciado de integração e aplicação, devido aos fatores já citados.

A oportunidade de integração das informações mapeadas da qualidade da zona fundida de cada ponto de solda, obtidas pela medição da corrente dinâmica (Rd), e armazenadas em um banco de dados compartilhados com o sistema de gestão ERP, além da possibilidade da aplicação direta do módulo de qualidade, pode também fornecer diversas informações em tempo reais ou históricas, para suportar decisões gerenciais, não apenas baseado no processo, mas também com dados de custos, desperdício de peças, energia elétrica e retrabalhos entre outros. A oportunidade do tratamento das informações em um banco de dados centralizados, compartilhados por vários módulos de gestão, torna este sistema quando perfeitamente aplicado e implementado, um poderoso sistema de gestão da informação.

## 8 - CONCLUSÕES

Algumas conclusões podem ser consideradas com a realização deste trabalhos:

- Para o valor mínimo de  $d_s = 20$  mm, recomendado pelo Standard BA 013-04 obtivemos uma perda de 7% de corrente de "shunt", para o material utilizado neste experimento;
- Adotando uma distância mínima de  $d_s = 30$  mm para o material utilizado no experimento, podemos reduzir a perda de corrente de "shunt" para 5%, obtendo ganhos no consumo de energia elétrica;
- É possível monitorar a resistência dinâmica  $R_d$ , através dos parâmetros do primário da fonte de soldagem, o procedimento experimental demonstrou uma forte correlação com os valores do secundário, obtendo-se  $R^2 = 0.9583$ ;
- A medição da resistência dinâmica com os parâmetros do primário apresenta inúmeras vantagens tornando o processo de medição mais robusto e viável no ambiente industrial;

## 9 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Outros tópicos que podem ser estudados futuramente e que se enquadram no contexto deste trabalho:

- Realizar estudo da corrente de "shunt" considerando outros tipos de materiais como o aço galvanizado e o alumínio, os quais a aplicação na fabricação de carroceiras de automóveis vem aumentando nos últimos anos;
- Realizar estudos de perda de corrente de "shunt" para distância entre três ou mais pontos de solda em um mesmo corpos de prova;
- Realizar estudo da influência da relação de transformação  $r_t$ , no calculo da resistência dinâmica com os parâmetros do primário, para diferentes intensidades de corrente de soldagem;
- Estudar a influência do desgaste dos eletrodos na alteração da resistência dinâmica na solda por resistência elétrica.

## 10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASM (1993). ASM Handbook. **Welding Braserenig and Soldering**, Volume 8 .

AWS (1997). **American Welding Society**. International Standard Book Number: 0-87 17 1-506-6

Aslanlar, S., 2006, **The effect of Nucleus Size on Mechanical Properties in electrical Resistance Spot Welding of Sheets used in Automotive Industry, Materials and Design**. vol. 25, pp. 125-131.

Branco, H. L. O, (2004). **Avaliação de Capas de Eletrodos Utilizadas na Soldagem de Chapas Galvanizadas na Indústria Automobilística**. Dissertação de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Paraná, PR, 113p.

Chang H. S., Cho H. S (1990). **A Study on the Shunt Effect in Resistance Spot Welding**. Article published sorce: Welding Research Supplement, August 1990.

CWA, (2006). CMW Automative. **Resistance Weld Maintenace Manual Automotive**. Manual published 2006.

Chen, Y., Zhou, Y. (2006). Coatings on Resistance Welding Electrodes to Extend Life. Article published sorce: SAE International

Cho, Y., RHEE, S. (2002).**Primary Circuit Dynamlic Resistance Monitoring and its Application to Quality Estimation during Resistance Spot Welding**. Welding Journal 81 no6 Je 2002

Cho, Y., Chang, I., Lee, H. (2006). **Single-Sided Resistance Spot Welding for Auto Body Assembly**. Article published sorce: Weld Journal 85 no8 Ag 2006

EWI (2002). **Magnesium Joining for Automotive Aplications**. EWI CRP Report no.217, July 30, p. 50.

Intermachinery (2002). **Manual de Soldagem por Resistência a Ponto**, p. 41.

Faria, P. E. (2003). **Monitoramento do Ponto de Solda Através da Resistência Dinâmica da Soldagem a Ponto por Resistência Elétrica**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, UFMG, 118p.

Ford Laboratory Test Metthod – BA 013-04. **Resistance Spot Weldability Testes for High Srenght Steels**.

Fonseca, E. O. T., Bracarense, A. Q. (1999). **Resumo do Desenvolvimento de um Sistema Para Monitoração da Resistência Dinâmica e da Força na Soldagem a Ponto por Resistência Elétrica.** Artigo publicado no XXV Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem Belo Horizonte – MG De 08 a 10 de Setembro de 1999, 10p.

Gambôa, F. A. R. (2004). **Método para Gestão de Riscos em Implementações de Sistemas ERP baseado em Fatores Críticos de Sucesso.** Publicado na Revista de Gestão da Tecnologia e Sistemas de Informação “Journal of Information Systems and Technology Management” Vol. 1, No. 1, 2004, pp. 46-63

GEDEON, S. A. et al., **Measurement of Dynamic Electrical and Mechanical Properties of Resistance Spot Welds,** Welding Journal, USA, v. 66(12): p. 378-385, dez. 1987. (6) AWS, The Professional’s Advisor on Resistance Welding, USA, Edited by B. J. Bastian, 1998.

Kaiser, J. G., Dung, G. J. e Eagnar, T. W. (1982). **The Effect of Electrical Resistance on Nugget Formation During Spot Welding.** Welding Journal, June, 167p – 174 p.

Koganti R., Elliott A. (2010). **Resistance Spot Welding (RSW) Evaluation of Electro Galvanized (EG) 1.0 mm Dual Phase 780 (DP780) to Uncoated 1.0 mm Boron Steel for Automotive Body Structure Applications.** Published in 2010 SAE International.

Machado, Ivan Guerra (1996). **"Soldagem & técnicas conexas."** p. 257.

Mondenese, P. J., Bracarense, A. Q. e Marques, P. Q. (1996). **Soldagem Fundamentos e Tecnologia.** ( ed) Editora UFMG pp. 293 – 296.

Nakano, R. K., (2005). **Influencia da Taxa de Deformação na Falha de Uniões por Solda a Ponto.** Dissertação de Mestrado da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 73p.

Norris, G., Hurley, J. R., Hatley, K. M., Dunleavy, J. R., Balls, J. D. **E-Business e ERP: Transformando as Organizações.** Rio de Janeiro: Qualitymark Ed, 2001.

Paes, M.T. P., Guimarães, A. S. e Rebello, J. M. A., 1989, **Significância da Expulsão e do Tipo de Fratura em Soldagem por Pontos, Soldagem e Materiais.** Publicado na Revista Soldagem e Materiais em Junho 1989, pp 51-57.

Posse, A. A. (1998). **Competitividade, automação e Nível de Emprego na Indústria Automobilística Nacional e Mundial.** Dissertação de Mestrado em Economia na UFPB.

Planejamento Governo Portal de Noticias. Disponível em URL:  
<https://conteudoclippingmp.planejamento.gov.br/cadastros/noticias/2010/1/8/producao-de-automoveis-cai-em-2009> Acessado em 06/04/10.

Rossi, G. P. (2007), **Estudo de Correlação do Comportamento de Pontos de Solda em Corpos de Prova pelo Método dos Elementos Finitos**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, USP 129p.

Serratron (2009), **Manual do Controlador de Soldagem Serratron MFC 3000**. Versão 1.14

Souza, Rodrigo Barbosa (2007), **Uma Arquitetura para Sistemas Supervisórios Industriais e sua Aplicação em Processos de Elevação Artificial de Petróleo**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, UFRN.

Souza, Cezar Alexandre (2000), **Sistema Integrado de Gestão Empresarial: Estudo de Caso de Implementação de Sistema ERP**. Dissertação de Mestrado em Economia, USP.

RWMA, (2003), **Resistance Welding Manual**, Resistance Welder Manufacturing Association, U.S.A.

Santos, F. B. S. (2006), **Estudo da Eficiência do Processo de Soldagem de Pontos por Resistência Elétrica Utilizada na Indústria Automotiva**. Dissertação de Mestrado em Sistema de Gestão, Universidade Federal Fluminense, RJ, 104p.

Shi, G., Westgate S. A. (2005), **Techniques for Improving the Resistance Spot Weldability of 1.6-2.0mm ultra-high strength steels for automotive applications**. Article published SORCE: Welding Institute, Cranta Park, 64p.

Stocco, D., Gonçalves, R. (2006), **Caracterização dos Defeitos Encontrados em Solda a Ponto Utilizando Técnica do Ultra-Som, Apoiado a Exames Metalográfico**. Artigo apresentado na "III Pan American Conference for Nondestructive" Test, Rio de Janeiro, RJ, 9p.

Vargas, J. E. (2006). **Estudo da Formação, Geometria e Resistência do Ponto na Soldagem por Resistências**. Dissertação de Mestrado em Sistemas Mecatrônicos. Universidade de Brasília, Brasília, DF, 143p.

Zhang, Y. (2008). **Real Time Welding Monitoring**. Woodhead Publishing on behalf of The Institute of Materials, Minerals & Mining, CRC Press, Washington, DC.

Zhang, H., Senkara J. (2006). **Resistance Welding Fundamentals and Applications**. Published in 2006 by CRC Press Taylor & Francis Group 6000 Broken Sound Parkway NW, Suite 300 Boca Raton, FL 33487-2742.

## APÊNDICES

---

### 1 – DADOS TÉCNICOS DO CONTROLADOR DE SOLDAGEM DENCO



#### DEN CCTP 100

#### Manual do Controlador de Soldagem com corrente constante

##### Principais características:

- 32 programas com 4 pedais independentes em cada programa.
- Pedal de acionamento de retração.
- As entradas digitais são isoladas galvanicamente e trabalham com 24V.
- 2 Saídas para válvulas (+1 saída para válvula de retração) com opção para 110V/220V, 24V ou contato seco.
- 2 entradas para pressostatos analógicos e 2 entradas para pressostatos digitais.
- Controle de demanda (NBS).
- Contadores de solda individuais por programa e válvulas.
- Nome com até 10 caracteres alfanuméricos para cada programa.
- Solda tipo ponto único, ponto em série ou costura.
- Opção de trabalhar em modo de **monitorar corrente** ou em modo de **corrente constante**.
- Monitoramento da tensão de alimentação e correção da potencia de solda baseado na tensão de entrada.
- Módulo de memória removível.
- Opção de copiar parâmetros de um programa a outro.



### Capítulo 1 INTRODUCCIÓN

#### Convertidor de Media Frecuencia con control incorporado

Los convertidores de media frecuencia con control incorporado SERRATRON MFC-3000 son equipos de soldadura por resistencia capaces de aportar la correcta energía a un transformador-rectificador de soldadura que, a su vez, suministrará la precisa energía al punto de soldadura en forma de corriente continua.

Aparte de las ventajas de la soldadura en corriente continua con respecto a la soldadura en corriente alterna, como puede ser la dosificación más uniforme de la energía en el punto a soldar, o la práctica eliminación del efecto inductivo de la carga que permite aumentar los escotes de las pinzas, pueden citarse otras ventajas, si cabe más importantes:

- La mayor frecuencia de trabajo del transformador (1000 Hz en vez de 50 ó 60 Hz) permite reducir drásticamente el peso y el tamaño del mismo para una misma potencia de soldadura, aumentando su manejabilidad en caso de pinzas de soldadura manuales, o permitiendo su montaje directamente en el brazo del robot de soldadura.
- El convertidor se conecta a la red trifásica, por lo que la potencia utilizada se reparte por igual entre las tres fases de la red y no solamente en una, como en el caso de soldadura en corriente alterna.

El usuario tiene la posibilidad de utilizar una interfaz de 32 entradas y 16 salidas digitales, o bien utilizar diferentes interfaces serie también opcionales (InterBus-S, DeviceNet, Profibus-DP, IOEX, Ethernet con TCP/IP y V24/RS-232), que simplifican la instalación y puesta a punto del **SERRATRON MFC-3000**. InterBus-S, DeviceNet o Profibus-DP operan como interfaces remotas (esclavas) de Entradas/Salidas, mientras que IOEX actúa como interfaz maestra de módulos de expansión de E/S. El interfaz Ethernet se utiliza para la programación en red por el usuario, mientras que el canal V24 sirve para la programación de usuario punto-a-punto, bien por medio de PC portátil o por medio de la unidad de programación portátil SERRA TP-10. El equipo incorpora la funcionalidad de PLC (Autómata programable), que aumenta sus posibilidades de uso muy por encima de lo esperable en un control de soldadura, permitiendo al **SERRATRON MFC-3000** controlar (en gran número de aplicaciones) no sólo las funciones propias del control sino la totalidad del automatismo de soldadura.

El conjunto del equipo va montado en una envolvente de fácil instalación y mantenimiento. El amplio uso de componentes electrónicos de montaje superficial (SMD) aumenta la fiabilidad, mientras que reduce la superficie de la electrónica involucrada.

Los convertidores SERRATRON MFC-3000 incorporan uno de los más potentes microprocesadores de Freescale \_ encargado de coordinar las múltiples tareas del equipo, mientras que un DSP de última generación de Texas Instruments \_ está específicamente dedicado al preciso gobierno de la soldadura. El programa básico de funcionamiento (firmware) se ubica en una memoria no volátil, reprogramable, de alta capacidad (Flash-EPROM), lo que permite su rápida actualización (vía Ethernet) sin necesidad de desmontar el módulo. Los parámetros de configuración de la unidad se almacenan en una memoria EEPROM que los hace inmunes a alteraciones por pulsos transitorios indeseados.

#### Capítulo 1 INTRODUCCIÓN

##### 1-2 SERRA

#### Características principales

- 255 Programas de **3 tiempos** de soldadura con número de impulsos programable
- Funciones de PLC para la libre programación en lógica de relés de todas las entradas y salidas digitales.
- Interfaz de E/S a elegir entre **3 Buses de Campo: InterBus-S, DeviceNet ó Profibus-DP**.
- Interfaz **Ethernet 10/100 Base T** con protocolo **TCP/IP** para programación centralizada
- Canal serie **V24/RS-232** para PC portátil o unidad de programación manual (TP-10)
- 1** salida para **Válvula Proporcional**: 0-10 V / 4-20 mA / 0-20 mA (configurable por hardware)
- Posibilidad de gobernar **272 entradas / 256 salidas** (usando módulos de expansión externos)

- Modos de control de potencia: Control de fase, Supervisión, **Corriente Constante, Tensión Constante, Energía Constante-Tiempo Constante, Energía Constante-Corriente Constante y WiseAdapt.**
  - Tiempo de **subida y/o bajada (Up y Down-slope)** programable durante Soldadura 2 (dependiendo del modo de control de potencia)
  - Compensación de **Desgaste de electrodo** por curvas editables o por función automática
  - Funciones optimizadas de **Fresado de electrodo**
  - Programación de los tiempos de soldadura en milisegundos
  - **Compensación** de variaciones de la tensión de red (Control de fase y Supervisión)
  - Puerto USB para conexión de memoria externa con la que poder realizar múltiples funciones (control de acceso a parámetros, salvaguarda de datos, transporte de programas, ...)
- Otras características:  
 Frecuencia de red 50/60Hz (conmutación automática)  
 Histórico de los últimos 128 fallos con fecha/hora  
 Histórico de las últimas 32 soldaduras

## Capítulo 2 DATOS TÉCNICOS

### 2-4 SERRA

**Red de comunicaciones** Ethernet 10/100 BaseT con protocolo TCP/IP

**Puerto serie** V24/RS-232 a 9600..57600 baud

**Puerto USB** Interfaz estándar de bus serie para conexión de memoria externa

**Puerto IOEX** Puerto expansión de entradas/salidas digitales

**Entradas digitales** Opcional. 32 entradas señalizadas por LED. Consumo: 10 mA @ 24V

**Salidas digitales** Opcional. 16 salidas señalizadas por LED, protegidas contra cortocircuito

Consumo máximo por salida: 800 mA @ 24 Vcc

Consumo máximo total: 1.6 A @ 24 Vcc

**Entrada analógica** 1 entrada diferencial. Margen: 0-10 V

**Salida analógica** 1 salida 0-10 V / 4-20 mA / 0-20 mA (configurable por hardware)

**Contacto para disyuntor** Contacto de relé conmutado, de 3A @ 30 Vcc / 250 Vca

### Características del entorno

**Emplazamiento** En armario de distribución con grado de protección IP 54.

**Posición de montaje** Vertical.

**Refrigeración**

**MFC-3007CN**

**MFC-3007CF**

**Aire.** Convección natural. El aire debe de estar libre de concentraciones ácidas y salinas, así como de vapores metálicos. Para garantizar el cumplimiento de las condiciones de carga, debe asegurarse una libre circulación de aire por el radiador de refrigeración

**MFC-3007W**

**MFC-3015W**

**Agua:** 4l/min. Temperatura máxima a la entrada: 30°C. Conexión por rácor de M16x150

La no-circulación de agua durante el funcionamiento normal, PUEDE DAÑAR GRAVEMENTE AL EQUIPO!

**Temperaturas** De almacenamiento: -25 a 70 °C. Ambiental de trabajo: 0 a 40 °C

**Grado de humedad** Grado de humedad F según norma DIN 40040; 20°C con humedad relativa del 90%, 40°C con humedad relativa del 50% según VDE 0113.

No se permite la formación de rocío en el módulo.

**Grado de protección** IP 20.

### Características mecánicas

**Peso SERRATRON MFC-3007CN/CF/W:** 21 kg

**SERRATRON MFC-3015W:** 26 kg

**Dimensiones (Alto x Ancho x Profundidad)**

**SERRATRON MFC-3007CN:** 400 x 250 x 280 mm

**SERRATRON MFC-3007CF:** 400 x 300 x 280 mm

**SERRATRON MFC-3007W:** 400 x 230 x 280 mm  
**SERRATRON MFC-3015W:** 500 x 230 x 280 mm

## 4- CÁLCULO DE INCERTEZA DAS MEDIÇÕES

### 4.1 Cálculo da incerteza da medição de tensão

A medição de tensão para o primário a escala calibrada para o conversor foi de 0 a 5 VCA, considerando o fundo de escala e a resolução do conversor A/D de 12 bits, onde obtêm-se o total de 4095 divisões temos o valor da incerteza calculado na Eq. (4.1):

$$u(v) = \frac{Vf}{N} = \frac{5}{4095} = 0,0012 \quad (4.1)$$

Onde:

U(V) = Incerteza da medição;

Vf = Tensão de fundo de escala;

N = Resolução do conversor A/D.

Para o cálculo da incerteza da medição de tensão para o primário, a escala calibrada para o conversor foi de 0 a 500 VCA, onde se obtêm a seguinte incerteza demonstrada na Eq. (4.2):

$$u(v) = \frac{Vf}{N} = \frac{500}{4095} = 0,12 \quad (4.2)$$

O cálculo da incerteza da medição da corrente do primário, o fundo de escala do conversor foi calibrado de 0 a 10 kA, onde se obtêm a seguinte incerteza:

$$u(I) = \frac{If}{N} = \frac{10000}{4095} = 2,44 \quad (4.3)$$

O cálculo da incerteza da medição da corrente do secundário, o fundo de escala do conversor foi calibrado de 0 a 100 kA, onde se obtêm a seguinte incerteza:

$$u(I) = \frac{If}{N} = \frac{100000}{4095} = 24,44 \quad (4.3)$$

O cálculo da incerteza da medição para a resistência dinâmica (Rd) do primário e secundário é respectivamente demonstrado na Eq. (4.4 e 4.5).

$$\left(\frac{u(Rd)}{0,0008}\right)^2 = \left(\frac{u(V)}{Vf}\right)^2 + \left(\frac{u(I)}{If}\right)^2 = \left(\frac{2,44}{10000}\right)^2 + \left(\frac{0,0012}{5}\right)^2 = 0,00012 \quad (4.4)$$

$$\left(\frac{u(Rd)}{0,0008}\right)^2 = \left(\frac{u(V)}{Vf}\right)^2 + \left(\frac{u(I)}{If}\right)^2 = \left(\frac{24,44}{100000}\right)^2 + \left(\frac{0,12}{500}\right)^2 = 0,012 \quad (4.5)$$

## 6- CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DO INSTRUMENTO DE MEDIÇÃO DE TENSÃO (MULTIMETRO)

**MEC-Q** Metrologia, Engenharia e Consultoria da Qualidade

Calibração  
NBR ISO/IEC  
17025

Laboratório de calibração acreditado pela CGCRE/INMETRO  
de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob o nº0079

Certificado de Calibração Nº1895/2010 Página: 1/4

**1. CLIENTE:** ABB-Ford  
Av. Henry Ford, 2000 - COPEC Camaçari - BA

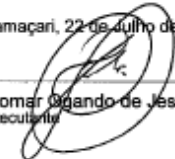
**2. INSTRUMENTO CALIBRADO:** Alicete Volt-Amperímetro Digital  
Identificação: **FU-AMP-0045**  
Fabricante: FLUKE  
Modelo: 335  
Nº Serie: 10750029  
Funções: Medição de tensão, corrente e resistência.


**3. IDENTIFICAÇÃO DA CALIBRAÇÃO:**  
Data: 15 de Julho de 2010  
Temperatura Ambiente:  $(21,1 \pm 0,1)^\circ\text{C}$   
Umidade Relativa do Ar:  $(59 \pm 4)\%$   
Procedimento: M-046 Rev.: 6: Calibração de Medidores Elétricos  
Síntese do Procedimento: A calibração foi realizada conforme método citado comparando-se o instrumento com o padrão listado no item 5.

**4. OBSERVAÇÕES:**

- Os resultados deste certificado referem-se exclusivamente ao instrumento submetido à calibração nas condições especificadas, não sendo extensivo a quaisquer lotes.
- Este certificado atende aos requisitos de acreditação do CGCRE/INMETRO de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, o qual avaliou a competência de medição do Laboratório e comprovou sua rastreabilidade a padrões nacionais de medida.
- A reprodução deste certificado só poderá ser total e depende de aprovação, por escrito, deste Laboratório.
- As incertezas estimadas referem-se ao instrumento sob teste e foram obtidas combinando a incerteza deste laboratório com aquela referente ao desempenho do instrumento, calculada com base em 3 replicações. A incerteza expandida declarada é baseada na incerteza combinada multiplicada por um fator de abrangência k, para um nível de confiança de 95,45%.
- Legenda para Tabela de Calibração: V.I. => Valor do Instrumento; V.V.C. => Valor Verdadeiro Convencional.

Camaçari, 22 de Julho de 2010

  
Riomar Augusto de Jesus  
Executivo

  
Leonardo Almeida de Cerqueira  
Signatário autorizado

Cl. Rua Francisco Romão, 18 - Vila Príncipe de Goiás - Santo André - SP - 09090-130 - Fone (11) 3463-8211 - Fax (11) 3463-8224 - [meq@meq.com.br](mailto:meq@meq.com.br) Cl. Rua D. 516 - Distrito Industrial do Uru - Indaial - SC - 13072-200 - Fone (11) 3123-8190 - Fax (11) 3123-8196 - [meq@meq.com.br](mailto:meq@meq.com.br) Cl. Rua Depesa, 15 - Jardim Loureiro - Sorocaba - SP - 13045-100 - Fone (11) 3122-4089 - Fax (11) 3128-7893 - [meq@meq.com.br](mailto:meq@meq.com.br) Cl. Avenida Lemos, Km 2,3 - Rodovia BR 512 - Camaçari - BA - 47851-178 - Fone (71) 3627-6441 - Fax (71) 3627-5168 - [meq@meq.com.br](mailto:meq@meq.com.br) Cl. Rua Sábido Leite, 80 A - Arraial d'Água - Recife - PE - 52048-190 - Fone (51) 3331-1213 - Fax (51) 3331-3748 - [meq@meq.com.br](mailto:meq@meq.com.br) Cl. Rua Rui Barbosa, 2014 - Itaipava - Petrópolis - RJ - 25060-806 - Fone (24) 2244-8539 - Fax (24) 2244-8539 - [meq@meq.com.br](mailto:meq@meq.com.br)

**Faixa: 600 Vcc**  
Valores Encontrados:

V.I. (V)	V.V.C. (V)	Erro (V)	Incerteza (V)	Fator de Abrangencia (k)
60,0	60,200	-0,200	0,059	2,00
300,0	299,798	0,202	0,065	2,00
540,0	538,793	1,207	0,084	2,00

**Faixa: 600 Vca/60 Hz**  
Valores Encontrados:

V.I. (V)	V.V.C. (V)	Erro (V)	Incerteza (V)	Fator de Abrangencia (k)
60,0	60,068	-0,068	0,083	2,00
300,0	299,80	0,20	0,27	2,00
540,0	539,60	0,40	0,54	2,00

**Faixa: 600 Aca/60 Hz**  
Valores Encontrados:

V.I. (A)	V.V.C. (A)	Erro (A)	Incerteza (A)	Fator de Abrangencia (k)
60,0	60,12	-0,12	0,13	2,00
300,0	297,56	2,44	0,73	2,00
540,0	535,0	5,0	1,4	2,00

**Faixa: 600 Ω**  
Valores Encontrados:

V.I. (Ω)	V.V.C. (Ω)	Erro (Ω)	Incerteza (Ω)	Fator de Abrangencia (k)
60,0	59,400	0,600	0,069	2,00

Laboratório de calibração acreditado pela CGCRE/INMETRO de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob o nº0079

Certificado de Calibração Nº1895/2010

Página: 4/4

V.I. (Ω)	V.V.C. (Ω)	Erro (Ω)	Incerteza (Ω)	Fator de Abrangência (k)
300,0	298,89	1,11	0,11	2,00
640,0	539,00	1,00	0,20	2,00

Faixa: 6000 Ω  
Valores Encontrados:

V.I. (Ω)	V.V.C. (Ω)	Erro (Ω)	Incerteza (Ω)	Fator de Abrangência (k)
600	600,00	0,00	0,61	2,00
3000	2996,92	3,08	0,85	2,00
5400	5394,6	5,4	2,6	2,00

