

EDSON LUIZ NAKAMURA

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE DOIS
ELETRODOS COM MATERIAIS DIFERENTES NA
SOLDAGEM A PONTO POR RESISTÊNCIA**

Monografia apresentada ao Programa de
Educação Continuada em Engenharia da Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo para
conclusão de curso de Especialização.

São Paulo

Outubro / 2012

Edson Luiz Nakamura

(Engenheiro Industrial Mecânico, Universidade Santa Cecília dos
Bandeirantes 1998 Santos SP)

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE DOIS
ELETRODOS COM MATERIAIS DIFERENTES NA
SOLDAGEM A PONTO POR RESISTÊNCIA**

Monografia apresentada ao Programa de Educação
Continuada em Engenharia da Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para conclusão de curso de
Especialização.

Área de Concentração: Engenharia da Soldagem

Orientador: Prof. MSc. Márcio Batista

São Paulo

Outubro/2012

"No meio da dificuldade encontra-se a oportunidade."

Albert Einstein

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a meus pais, Jitsuo Nakamura "In memorian" e a Dirce Alves Nakamura por me darem educação com base no trabalho, estudo e honestidade, e a minha esposa Sheila C. Bertoni Nakamura e ao meu filho Gabriel Nakamura pela motivação que me deram para realizar este trabalho.

AGRADECIMENTOS

Ao professor MSc. Márcio Batista pelas orientações valiosas na realização deste trabalho.

Aos meus colegas de trabalho, em especial ao Engenheiro Ronaldo Baptistella pelo incentivo em realizar este curso.

Ao Engenheiro Valdir Furlanetto da empresa Welding Science, pela grande ajuda nas orientações.

Aos funcionários da Aethra AKC - Man Latin América pela colaboração e atenção que deram na realização prática deste trabalho.

Ao laboratório de análise de materiais - Man Latin América.

Aos meus colegas de classe, em especial ao Cleber Sousa Lima Junior.

Aos meus amigos: Wilson de Paula, Paulo Akira Yonemura e Roberto Covacevice, pela contribuição na realização deste trabalho.

A todos, que direta ou indiretamente ajudaram na realização do presente trabalho.

CURRICULUM VITAE

Resumo

Carreira construída em empresas multinacionais e nacionais nas áreas de projeto, no desenvolvimento de produto automotivo, dispositivos em geral, equipamentos e estrutura metálica.

Formação

Especialização em Engenharia de Soldagem – Politécnica da USP-2012.

Superior: Engenharia Industrial Mecânica – Universidade Santa Cecília dos Bandeirantes -1998.

Cursos de aperfeiçoamento

- **Inglês – CELLEP SBC** – 02/2005 a 11/2005
- **Autoform** – Workshop (estamparia) – 2004 CCS Consultoria e sistemas.
- **Estampagem dos aços ao carbono**- 2008 AMB MAN.
- **Catia V5 Fundamentos**–2009 MAN.
- **FMEA** – Análise dos modos da falha e efeitos – 2010 MAN.
- **Aços estruturais** – Work shop Usiminas 2011 MAN.
- **Welding** – Congresso 2011 MAN.

Histórico de experiências adquiridas

MAN Latin América Ltda. – Resende- RJ

Função: Engenheiro de Produto.

Departamento: Engenharia de Cabinas.

Período: fevereiro de 2008 até os dias de hoje.

PSA Peugeot Citroen – Porto Real - RJ

Função: Engenheiro de Produto (PJ).

Área: Desenvolvimento do produto (carroçaria).

Período: dezembro 2006 até janeiro de 2008 (Contratado pela **Promax Engenharia Ltda.**)

Rucker do Brasil Ltda – São Bernardo do Campo – SP

Função: Engenheiro Projetista Mecânico (PJ).

Área: Desenvolvimento do produto automotivo.

Período: Agosto 2003 até novembro 2005.

EDAG-Projetos e Comercio Ltda. – São Bernardo do Campo – SP.

Função: Engenheiro mecânico (CLT).

Área: Desenvolvimento do produto automotivo e dispositivo.

Período: dezembro 2000 até julho 2003.

SEI – Engenharia Ltda. – São Bernardo do Campo – SP.

Função: Consultor técnico – sócio da empresa (PJ).

Área: Instalações Industriais.

Período: Novembro 1995 até novembro 2000.

Mercedes Benz do Brasil S.A. – São Bernardo do Campo – SP.

Função: Projetista mecânico sênior (CLT).

Área: Instalações Industriais (banco de provas de motores).

Período: Setembro 1986 até setembro 1995.

CBC- Companhia Brasileira de Cartuchos – Ribeirão Pires – SP.

Função: Projetista mecânico (CLT).

Área: Instalações Industriais (Equipamentos).

Período: Dezembro 1983 até setembro 1986.

RESUMO

Na indústria automotiva, vem sendo utilizadas chapas revestidas de zinco com dupla face de revestimento na construção de carroçarias podendo chegar até cinco anos de garantia contra a corrosão. A área de manufatura enfrenta grande desafio na soldagem por resistência a ponto em chapas zincadas, citando uma das peculiaridades, é obter características de materiais de eletrodos com maior vida útil. A formação do latão na superfície de contato do eletrodo é devido o contato da liga de cobre do eletrodo com o zinco do revestimento da chapa, promovendo o seu desgaste. Neste trabalho foi avaliado o desempenho de dois eletrodos com igual geometria e materiais diferentes, CuAl₂O₃ e CuZr na soldagem de duas chapas revestidas de zinco nas duas faces, ambas com 0,85mm de espessura. Os eletrodos foram testados em uma máquina tipo estacionária de CA. Foi feito o diagrama de soldabilidade para encontrar os parâmetros de soldagem, de forma atender o critério do diâmetro mínimo do ponto de solda, conforme a norma VW 01105-1. Os resultados mostraram maior deformação do eletrodo A (CuAl₂O₃) se comparado ao eletrodo B (CuZr), no decorrer dos 1300 pontos executados por cada um deles. Em contra partida, o eletrodo A (CuAl₂O₃), teve o melhor desempenho quanto ao número de pontos executados até o limite mínimo do ponto de solda conforme norma.

ABSTRACT

In the automotive industry, sheet steel blanks with double-sided zinc plating have been utilized in the production of vehicle bodies with up to five years of warranty against corrosion. The manufacturing area is faced with a big challenge in the resistance spot welding of zinc-plated sheet steel as far as it concerns to finding out electrode materials with such characteristics that will allow them to have a longer useful life. The formation of brass on the surface area of contact of the electrode is due to the contact of the electrode copper alloy with the zinc in the sheet steel plating, whereby the wear and tear of the electrode is made possible. In this work, the performance of two electrodes with equal geometry but different materials (Cu-Al₂O₃ and CuZr) has been evaluated in the spot welding of two double-sided, zinc-plated sheet steel blanks, each with a thickness of 0.85mm. The electrodes were tested on a stationary-type CA machine. A solderability diagram was created to identify the parameters that would allow meeting the minimum welding spot diameter criterion as per norm VW 01105-1. The results pointed out at a larger deformation of electrode A (Cu-Al₂O₃) as compared to electrode B (CuZr) along the 1300 spot welds made by each one of them. On the other hand, according to the norm mentioned above, electrode A (Cu-Al₂O₃) had a better performance as to the number of welds executed until the minimum limit of the welding spot range was reached.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Equipamento estacionário de soldagem por resistência a ponto [6].....	4
Figura 3.2 – Resistência elétrica entre eletrodos [2].....	5
Figura 3.3 – Distribuição de temperatura em torno de um ponto de solda [2]...6	
Figura 3.4 - Seqüência e parâmetros de soldagem [11].....	7
Figura 3.5 – Curva de soldabilidade [4].....	9
Figura 3.6 – Corrente de desvio durante a soldagem [adaptada da referência [2]].....	12
Figura 3.7 –Desgaste ou deformação do eletrodo	13
Figura 3.8 – Exemplo de ponto de solda com pouca área fundida causada pela excessiva deformação do eletrodo [6].....	15
Figura 3.9 – Influência da chapa com revestimento de Zn na vida útil do eletrodo [2].....	16
Figura 3.10 - Sistema de refrigeração do eletrodo [4].....	17
Figura 3.11 – Medidas de referência para correta posição do tubo de refrigeração [6].....	18
Figura 3.12- Tipos Padrões de eletrodos para soldagem por ponto.....	21
Figura 3.13 – Contato uniforme dos eletrodos em perfeito alinhamento [2]....22	
Figura 3.14 – Distribuição assimétrica da pressão [2].....	23
Figura 3.15– Metalografia de um ponto não uniforme [2].....	23
Figura 3.16– Profundidade criada na superfície da chapa soldada pela pressão do eletrodo[adaptado da referência [2].....	24
Figura 4.1– Eletrodos utilizados nos experimentos.....	25

Figura 4.2– Dimensões do eletrodo utilizado no experimento.....	26
Figura 4.3 – Dimensões do corpo de prova [adaptado da referência [14]].....	28
Figura 4.4 - Equipamento de soldagem estacionário corrente alternada.....	29
Figura 4.5 - Método de determinação dos limites mínimo e máximo da corrente de soldagem.....	30
Figura 4.6 – Chapa de trabalho.....	31
Figura 4.7 – Verificação do ponto de solda no teste de arrancamento.....	32
Figura 4.8 – Equipamentos utilizados nos testes de avaliação dos eletrodos....	34
Figura 4.9 – Congelamento da imagem para medir a área do desgaste.....	35
Figura 4.10 – Posição da mini câmera para captação de imagem.....	36
Figura 4.11–Determinação do diâmetro médio do ponto de solda.....	37
Figura 5.1 – Diagrama de soldabilidade tempo versus corrente.....	38
Figura 5.2 – Número de pontos de solda versus variações das áreas das faces dos eletrodos superiores e inferiores.....	41
Figura 5.3 – Número de pontos de solda versus variação do diâmetro médio do ponto de solda.....	42
Figura 5.4 – número de pontos de solda versus profundidade das identações.	44
Figura 5.5 – Eletrodos (CuAl ₂ O ₃) com as faces consumidas após 1300 pontos de solda.....	45
Figura 5.6 – Eletrodos (CuZr) com as faces consumidas após 1300 pontos de solda.....	46
Figura 5.7 – Composição química (%) do eletrodo novo e usado.....	47
Figura 5.8 – Ponto de solda nº 100 executado com o eletrodo A (CuAl ₂ O ₃)....	48
Figura 5.9 – Ponto de solda nº 100 executado com o eletrodo B (CuZr).....	49

- Figura 5.10 – Ponto de solda nº 300 executado com o eletrodo A (CuAl₂O₃)...50
- Figura 5.11 – Ponto de solda nº 300 executado com o eletrodo B (CuZr)51
- Figura 5.12 – Ponto de solda nº 400 executado com o eletrodo A (CuAl₂O₃)...52
- Figura 5.13 – Ponto de solda nº 400 executado com o eletrodo B (CuZr).....53
- Figura 5.14 – Ponto de solda nº 600 executado com o eletrodo A (CuAl₂O₃)...54
- Figura 5.15 – Ponto de solda nº 600 executado com o eletrodo B (CuZr).....55
- Figura 5.16 – Ponto de solda nº 900 executado com o eletrodo A (CuA₂O₃)...56
- Figura 5.17 – Ponto de solda nº 900 executado com o eletrodo B (CuZr).....57
- Figura 5.18– Ponto de solda nº 1000 executado com o eletrodo A (CuAl₂O₃)..58
- Figura 5.19 – Ponto de solda nº 1000 executado com o eletrodo B (CuZr)59
- Figura 5.20–Ponto de solda nº 1200 executado com o eletrodo A (CuAl₂O₃)..60
- Figura 5.21 – Ponto de solda nº 1200 executado com o eletrodo B (CuZr)61

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1– Características dos materiais dos eletrodos conforme a classificação da RWMA [12].....	20
Tabela 4.1- Informativo do material do eletrodo (A)	26
Tabela 4.2- Informativo do material do eletrodo (B)	27
Tabela 4.3- Composição química e propriedades mecânicas da chapa.....	28
Tabela 4.4- Revestimento eletrolítico de zinco da chapa.....	28
Tabela 4.5- Parâmetros de soldagem utilizados nos testes.....	33
Tabela 4.6- Descritivo dos equipamentos utilizados nos testes de avaliação dos eletrodos.....	34
Tabela 5.1- Número de pontos versus área da face do eletrodo superior e inferior e diâmetro do ponto médio na chapa (material do eletrodo CuAl ₂ O ₃)..	40
Tabela 5.2- Número de pontos versus a área da face do eletrodo superior e inferior e diâmetro do ponto médio na chapa (material do eletrodo CuZr)	40
Tabela 5.3-Número de pontos versus a profundidade da indentação (eletrodo A).....	43
Tabela 5.4-Número de pontos versus a profundidade da indentação (eletrodo B).....	43
Tabela 5.5-Informativo do material do eletrodo (A) após ter executado 1300 pontos de solda.....	45
Tabela 5.6- Informativo do material do eletrodo (B) após ter executado 1300 pontos de solda.....	46

- CA: Corrente alternada
- CC: Corrente contínua
- Q: Calor
- AWS: American Welding Society
- K: Constante
- R: Resistência elétrica
- F: Força
- JW: Electrical Resistance Welding
- EVS: Ensaio Visual de Solda
- J: Joule
- Cu: Cobre
- Zr: Zircônio
- CuAl_2O_3 : Alumina
- Fe: Ferro
- AL: Alumínio
- C: Carbono
- LE: Limite de Escoamento
- LR: Limite de Resistência

- MA: Martensita – Austenita
- MEV: Microscópio Eletrônico de Varredura
- P: Fósforo
- S: Enxofre
- Mn: Manganês
- g: grama
- Is: Corrente de soldagem
- t: Tempo
- E: Energia
- A: Ampere
- KA: Kilo Ampere
- Zn: Zinco
- l: Litros
- Min: minuto
- ZE: Galvanização por eletrolise
- e: Espessura
- dm: Diâmetro médio
- ms: Milímetro segundo

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	II
AGRADECIMENTOS	III
CURRICULUM VITAE	IV
RESUMO	VI
ABSTRACT	VII
LISTA DE FIGURAS	VIII
LISTA DE TABELAS	XI
LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIATURAS	XII
SUMÁRIO.....	XIV
1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA.....	1
2.OBJETIVO.....	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.	4
3.1. Equipamento de soldagem por resistência a ponto....	4
3.2. Resistências elétricas no ponto de solda.....	5
3.3. Geração de calor.....	6
3.4. Parâmetros de soldagem por resistência a ponto.....	7
3.4.1. Pressão de soldagem.....	7
3.4.2. Tempo de soldagem.....	7
3.4.3. Corrente de soldagem.	7
3.4.4. Diagrama de soldabilidade.....	8
3.5. influências dos parâmetros no processo.	9
3.5.1. Efeitos da força de compressão e resistência.....	9
elétrica	9
3.5.2. Efeitos da corrente de soldagem.	10
3.5.3. Efeitos do tempo da soldagem.	11
3.6. Outras variações de processo	11

3.6.1. Densidade de corrente.....	11
3.6.2. Corrente de desvio (shunting).....	12
3.7. Eletrodo e seus efeitos no processo.....	13
3.7.1. Efeito de desgaste do eletrodo.....	13
3.7.2. Compensação no desgaste do eletrodo.....	14
3.8. Influência da chapa galvanizada na vida útil do eletrodo.....	15
3.9. Refrigeração dos eletrodos.....	16
3.10. Materiais dos eletrodos e suas classificações.....	18
3.11. Geometria do eletrodo	20
3.12. Alinhamento e centralização dos eletrodos.....	21
3.13. Indentação.....	24
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	25
4.1. Características dos corpos de prova utilizados nos experimentos	25
4.1.1. Eletrodo segundo especificações RWMA.....	25
4.1.2. Chapa de aço	27
4.1.3. Corpo de prova para análise do ponto de solda	28
4.2. Equipamento de soldagem	29
4.3. Determinação do diâmetro do ponto de solda através do diagrama de soldabilidade	29
4.4. Soldagem das chapas de trabalho.....	31
4.5. Parâmetros de soldagem.....	33
4.6. Equipamentos de calibração	33
4.7. Medição de desgaste dos eletrodos.....	35

4.8. Determinação do diâmetro médio do ponto de solda.....	36
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.	38
5.1 Diagrama de soldabilidade tempo versus corrente.....	38
5.2 Teste de desempenho dos eletrodos CuAl ₂ O ₃ e CuZr.....	39
5.3 Indentação.....	43
5.4 Ensaio da composição química e dureza dos eletrodos após os testes.....	45
6. CONCLUSÕES.....	62
<i>SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....</i>	63
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:.....	64

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA:

A junção de duas peças na soldagem por resistência elétrica é feita através da geração de calor, devida à passagem da corrente elétrica, e da aplicação de pressão. Durante o processo, as peças aquecem-se e ocorre a fusão localizada no ponto de contato na superfície de separação entre ambas. A geração de calor é devida à resistência do conjunto à passagem de corrente. Neste processo de soldagem, essa resistência é composta de resistência de contato peça/eletrodo e peça/peça [1].

A soldagem a ponto por resistência é o processo mais usado na montagem de estruturas, tais como: eletrodomésticos, automóveis, caminhões, aviões, vagões de trem, etc. Como exemplo, na montagem das carrocerias de automóveis são necessários em média 5000 pontos de solda, segundo a ANFAVEA a produção de 2009 no Brasil ultrapassou os 3,1 milhões de automóveis, ou seja, aproximadamente 15,5 bilhões de pontos de solda/ano [7].

As maiores vantagens da soldagem por pontos são a alta velocidade e a facilidade de automação com alta taxa de produção. A desvantagem é que a sobreposição da junta aumenta o peso da estrutura, e o custo do material, tem menor resistência a tração e a fadiga em comparação a soldagem por arco elétrico [7]

Para se atingir os melhores resultados em qualquer operação de soldagem a ponto é necessário utilizar os eletrodos adequados para a aplicação. Cada um dos eletrodos é fabricado usando um número de ligas diferentes ou processo de fabricação diferente, com o objetivo de fornecer a melhor combinação de propriedades elétricas e mecânicas para uma operação de soldagem [3].

Durante a operação de soldagem, os eletrodos estão sujeitos a grandes tensões compressivas em elevadas temperaturas, fazendo com que sua face se deformem progressivamente, necessitando de restauração ou substituição à medida que os pontos de solda obtidos não sejam satisfatórios [3].

Além dos parâmetros de soldagem influenciarem no desgaste do eletrodo, a formação de ligas entre o material do eletrodo e o metal de trabalho aumenta intensamente a velocidade de desgaste da face do eletrodo [3].

O presente trabalho será voltado para o estudo de dois eletrodos com materiais diferentes na soldagem a ponto por resistência, na junção de duas chapas zincadas, ambas com 0,85mm de espessura, utilizando uma máquina estacionária de CA, com parâmetros de soldagem constantes, força, tempo e corrente, definidos através do diagrama de soldabilidade.

As variáveis estudadas para cada tipo de eletrodo foram: o aumento progressivo da área (mm^2) na ponta do eletrodo em função do desgaste, a diminuição do diâmetro (mm) do ponto de solda até o limite da falta de fusão, a profundidade das indentações, fim de compreender os fenômenos que ocorrem durante a soldagem.

2. OBJETIVO:

O principal objetivo deste trabalho é avaliar e comparar o desgaste entre duas capas de eletrodos de materiais diferentes de igual geometria, no decorrer do processo também será avaliado a qualidade dos pontos de solda na junção de duas chapas galvanizadas, ambas de mesma espessura.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.

3.1. Equipamento de soldagem por resistência a ponto:

Todas as máquinas de soldagem por resistência apresentam, basicamente três componentes: sistema mecânico, circuito primário e sistema de controle.

O sistema mecânico é composto de sistema pneumático ou hidráulico, na qual a peça é fixada e a força do eletrodo é aplicada.

O circuito primário consiste de um transformador cuja função é regular a corrente de soldagem.

O sistema de controle pode atuar somente sobre o tempo de soldagem ou também sobre a ação mecânica da aplicação da força do eletrodo.

Esses três componentes regulam as variáveis mais importantes na soldagem por resistência, isto é, a força do eletrodo, a intensidade da corrente e o tempo de passagem da corrente de soldagem [1].

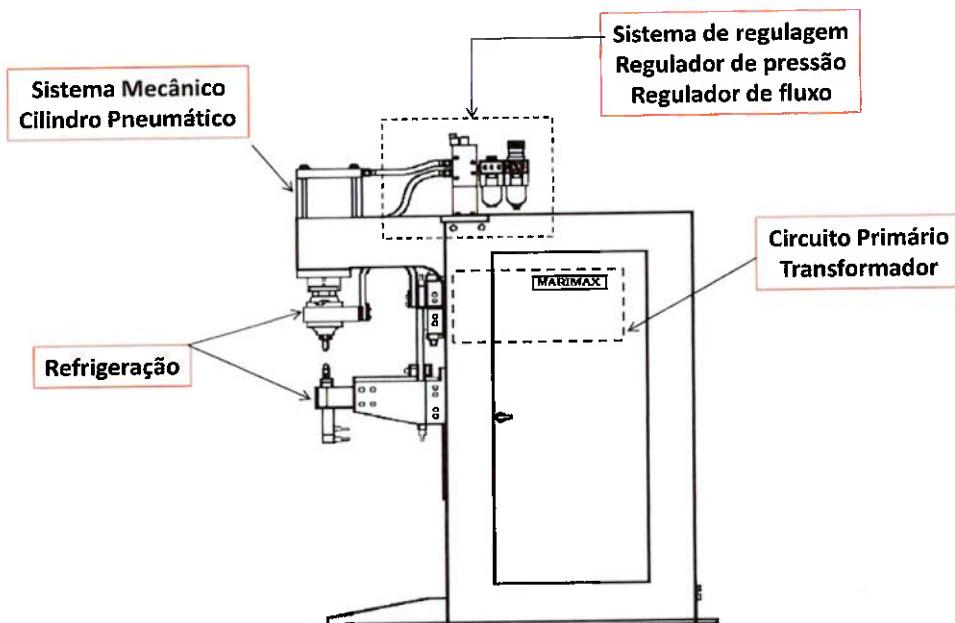


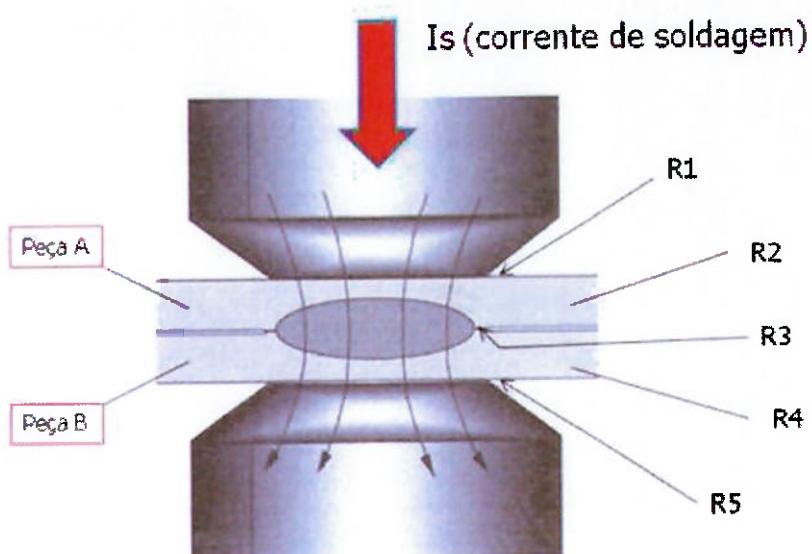
Figura 3.1 – Equipamento estacionário de soldagem por resistência a ponto [6].

3.2. Resistências elétricas no ponto de solda.

As chapas a serem soldadas constituem numa série de resistência, existem na realidade pelo menos cinco resistências conectadas em série que produzem o aquecimento da junta; a mais importante resistência requerida para formação da solda esta localizada na interface das chapas a serem soldadas [7].

A figura 3.2 mostra a localização da cada resistência

$$RT=R1+R2+R3+R4+R5 \quad (1)$$



Resistências	
R1	resistência de contato entre eletrodo e peça
R2	resistência da peça A
R3	resistência de contato entre peça A e peça B
R4	resistência da peça B
R5	resistência de contato entre eletrodo e peça

Figura 3.2 – Resistência elétrica entre eletrodos [2].

3.3. Geração de calor.

Aquecimento por efeito Joule, esse fenômeno ocorre devido o encontro dos elétrons da corrente elétrica com átomos do condutor. Os elétrons sofrem colisões com átomos do condutor, parte da energia cinética (energia de movimento) do elétron é transferida para o átomo aumentando seu estado de agitação, consequentemente sua temperatura. Assim, a energia elétrica é transformada em energia térmica [7].

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

Q= calor gerado (cal).

K= 1/ 4,185 (constante).

RT= conjunto de resistência elétrica (Ω).

dt=Intervalo de tempo de passagem de corrente (s).

I= Corrente de soldagem (A).

A figura 3.3 mostra a distribuição de temperatura em uma soldagem por ponto depois de 8 ciclos, com os eletrodos perfeitamente alinhados.

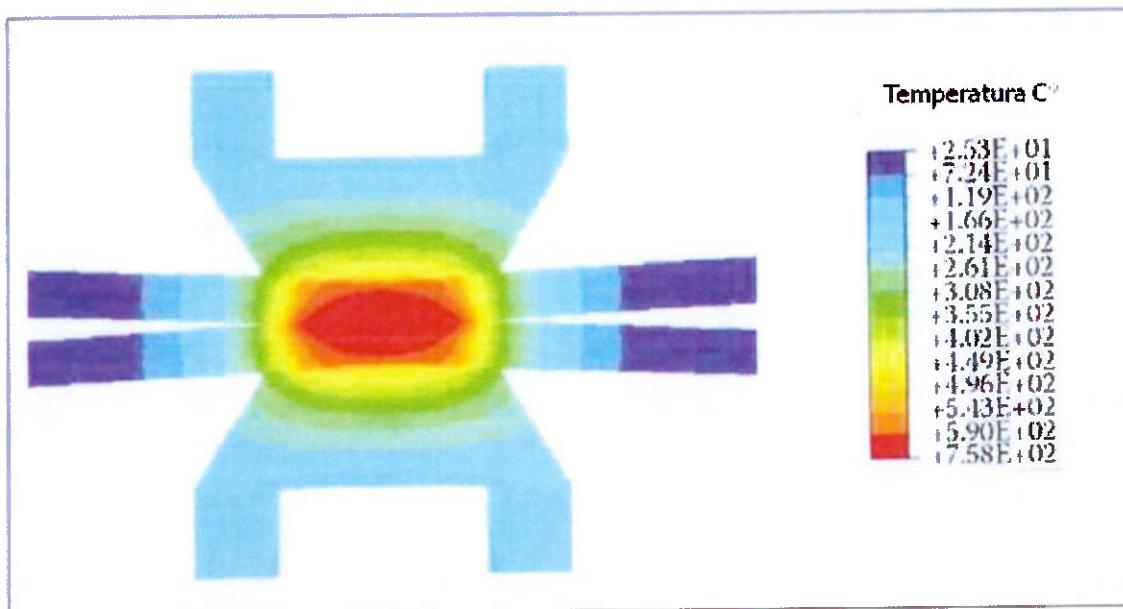


Figura 3.3 – Distribuição de temperatura em torno de um ponto de solda [2].

3.4. Parâmetros de soldagem por resistência a ponto.

3.4.1. Pressão de soldagem.

Define junto com a força aplicada e a área de contato da capa de eletrodo na superfície da chapa [7].

3.4.2. Tempo de soldagem

É o tempo que a corrente elétrica atravessa a peça a ser soldada é diretamente proporcional a geração de calor e tem influência direta na qualidade da solda [7].

3.4.3. Corrente de soldagem.

É a variável de maior influência na geração de calor, pois o calor é proporcional ao quadrado da intensidade da corrente de soldagem [7].

A figura 3.4 apresenta a sequência de soldagem por resistência de um ponto, executada pela máquina com os parâmetros de força, corrente e tempo.

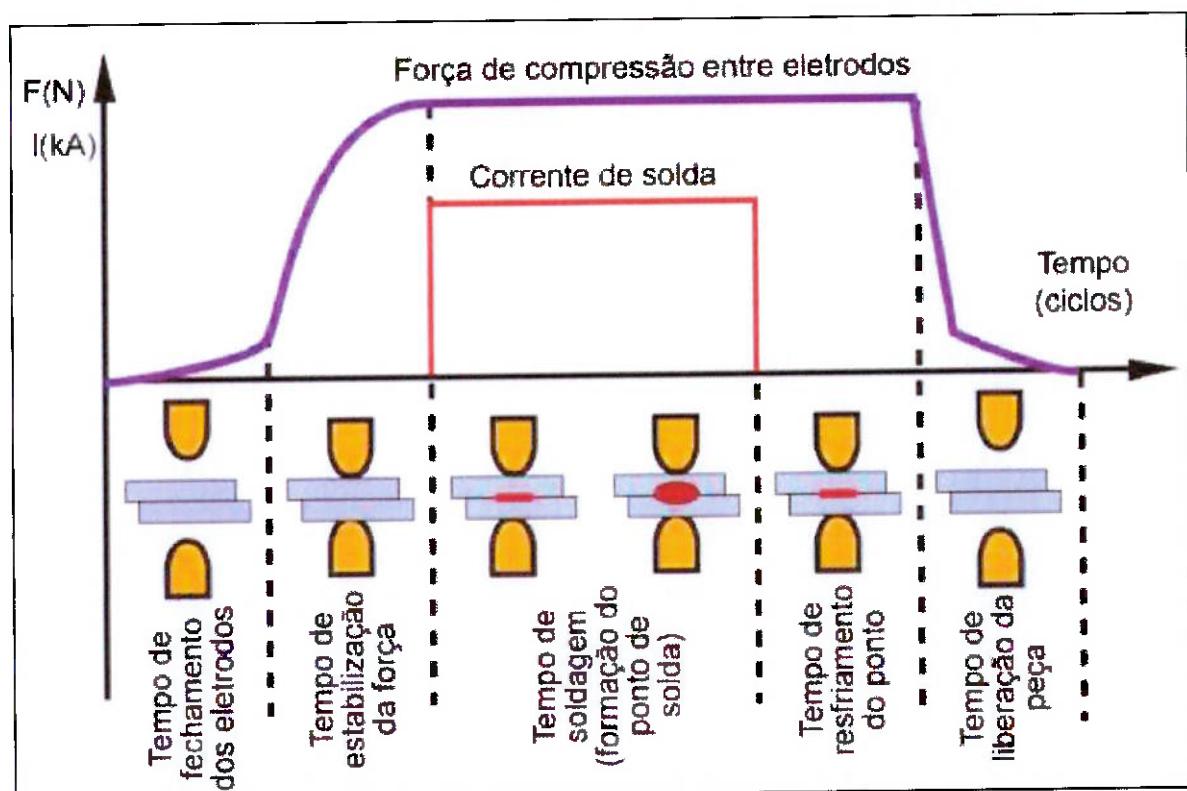


Figura 3.4 – Sequência e parâmetros de soldagem [11].

3.4.4. Diagrama de soldabilidade.

A prática mais comum no controle de um processo de soldagem por resistência é fazer a seleção dos parâmetros de soldagem incluindo força, corrente e tempo através do diagrama de soldabilidade como mostra a figura 3.5. O diagrama de soldabilidade pode ser produzido em função da corrente e tempo de soldagem para uma determinada força fixa, eles indicam as combinações de corrente máxima e mínima. A mínima corrente num determinado tempo de soldagem corresponde ao requisito mínimo aceitável para o ponto de solda, geralmente em termos de tamanho do ponto. O mínimo tamanho aceitável depende da norma estabelecida, geralmente numa faixa de 3,5 a 4,5 vezes a raiz quadrada da espessura da chapa (t em milímetros). A máxima corrente corresponde à ocorrência de expulsão de material. A região da diferença entre a máxima e a mínima corrente representa a janela operacional. Ocasionalmente, a corrente correspondente para um tamanho do diâmetro do ponto de solda é também plotado dentro do diagrama como uma referência para seleção de corrente de soldagem [7].

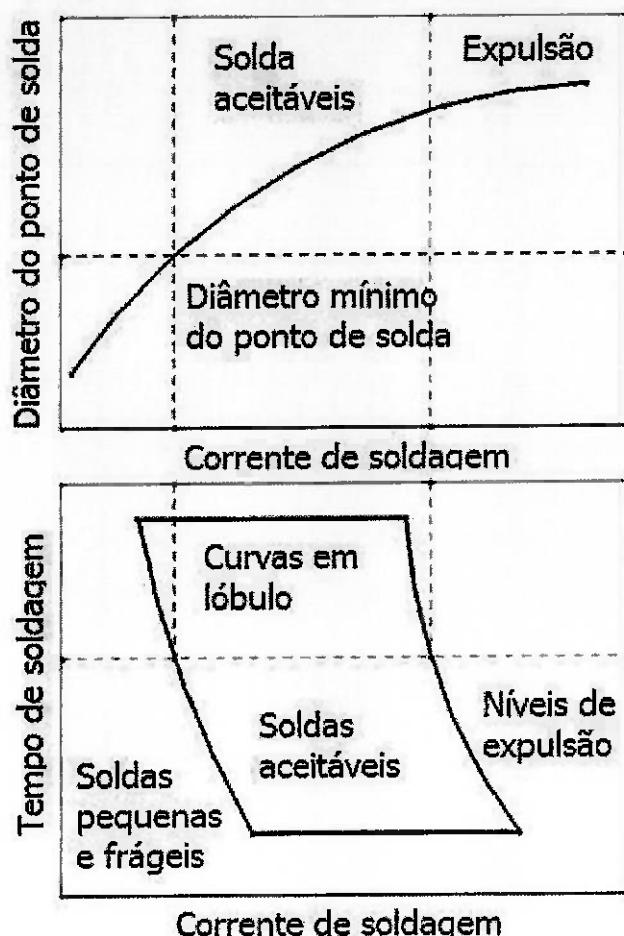


Figura 3.5 – Curva de soldabilidade [4].

3.5. Influência dos parâmetros no processo.

3.5.1. Efeitos da força de compressão e resistência elétrica.

A força exercida pelos eletrodos sobre as peças resulta numa pressão, a qual altera a resistência de contato e a circulação de corrente na interface das mesmas. Isso se deve ao fato das superfícies dos metais apresentarem diferentes graus de rugosidade, sendo que com o aumento da pressão, os picos e vales existentes entram em contato, diminuindo a resistência elétrica e aumentando a circulação de corrente nessa interface. Entretanto, a quantidade total de calor gerada nesse local diminui com o aumento da força, sendo necessário aumentar a intensidade de corrente e/ou tempo de sua aplicação [5].

Mantendo-se constante a corrente e o tempo de soldagem e aumentando a força de compressão, o valor da energia diminui, já que a resistência de contato reduz-se, portanto conclui-se [6]:

$$F \uparrow \rightarrow R \downarrow \rightarrow E \downarrow \rightarrow Q \downarrow \rightarrow \text{(para } I = \text{cte, } t = \text{cte)} \quad (3)$$

Diminuindo-se a força e mantendo-se a corrente e o tempo de soldagem constante o valor da energia aumenta já que a resistência de contato eleva-se, portanto conclui-se [6]:

$$F \downarrow \rightarrow R \uparrow \rightarrow E \uparrow \rightarrow Q \uparrow \rightarrow \text{(para } I = \text{cte, } t = \text{cte)} \quad (4)$$

3.5.2. Efeitos da corrente de soldagem.

O fato de a corrente atuar elevada ao quadrado faz com que a mesma seja a principal fator a ser considerado na taxa com que a solda é realizada. É portanto, um parâmetro crítico. Flutuações na corrente podem diminuir a qualidade, ou mesmo desqualificar uma junta, sendo as mesmas devidas, principalmente, à oscilação de tensão da rede e alterações na impedância do circuito secundário, quando CA é utilizada. [5]

A corrente de soldagem é a variável de maior influência na geração de calor nas interfaces das chapas, portanto conclui-se [6]:

$$I \uparrow \rightarrow E \uparrow \rightarrow Q \uparrow \rightarrow \text{(para } R = \text{cte, } t = \text{cte)} \quad (5)$$

$$I \downarrow \rightarrow E \downarrow \rightarrow Q \downarrow \rightarrow \text{(para } R = \text{cte, } t = \text{cte)} \quad (6)$$

3.5.3. Efeito do tempo de soldagem.

A alteração do tempo de soldagem tem dois efeitos distintos no ponto de solda, energia e quantidade de calor, portanto conclui-se [6]:

$$t \uparrow \rightarrow E \uparrow \rightarrow Q \uparrow \rightarrow (\text{para } I=\text{cte}, R=\text{cte}) \quad (7)$$

$$t \downarrow \rightarrow E \downarrow \rightarrow Q \downarrow \rightarrow (\text{para } I=\text{cte}, R=\text{cte}) \quad (8)$$

O fluxo de calor é a quantidade de calor que flui por unidade de tempo e depende exclusivamente do material. Transferir calor as chapas num tempo menor que o fluxo de calor significa que a energia é alta e provoca expulsão de material. Por outro lado transferir uma quantidade de calor num tempo muito maior significa que a energia é baixa, aumenta o ponto e a zona afetada pelo calor (ZAC) [6]

3.6. Outras variações de processo.

3.6.1. Densidade da corrente.

Apesar de o maior rendimento térmico ocorrer em soldas realizadas num curto período de tempo, existem limites para a densidade de corrente, os quais dependem da intensidade de corrente, da espessura e do tipo dos materiais envolvidos. Se essa intensidade de corrente for insuficiente, nunca ocorrerá fusão mesmo ao longo tempo. Entretanto, sendo a mesma excessiva, o eletrodo penetrará na peça, pois grande parte de sua espessura estará na fase plástica. Assim para a uma dada força de aplicação dos eletrodos, há uma corrente máxima, acima da qual o metal sob os mesmos é expulso violentamente, provocando soldas com defeito [5].

Na Prática, para o processo ocorrer no menor tempo possível e produzir pontos com a mais alta resistência mecânica, é usual se determinar a

densidade de corrente máxima exatamente anterior àquela que provoca essa expulsão de material [5].

3.6.2. Corrente de desvio.

Um ponto realizado subsequente ao primeiro terá uma corrente menor quanto menor for a distância entre eles. Este efeito deve-se ao desvio da corrente pelo ponto anterior, pois eletricamente a chapa superior está ligada à chapa inferior através do ponto de solda formando uma resistência paralela (R_s), conforme mostra na figura 3.6. Isto implica que o segundo ponto será menor (diâmetro e penetração) que o primeiro. Na prática em uma sequencia de pontos em linha, observa-se que apartir do terceiro ponto o diâmetro e a penetração permanecem estáveis, indicando que a corrente de desvio aumenta muito pouco ao longo de uma sequencia linear de pontos [6].

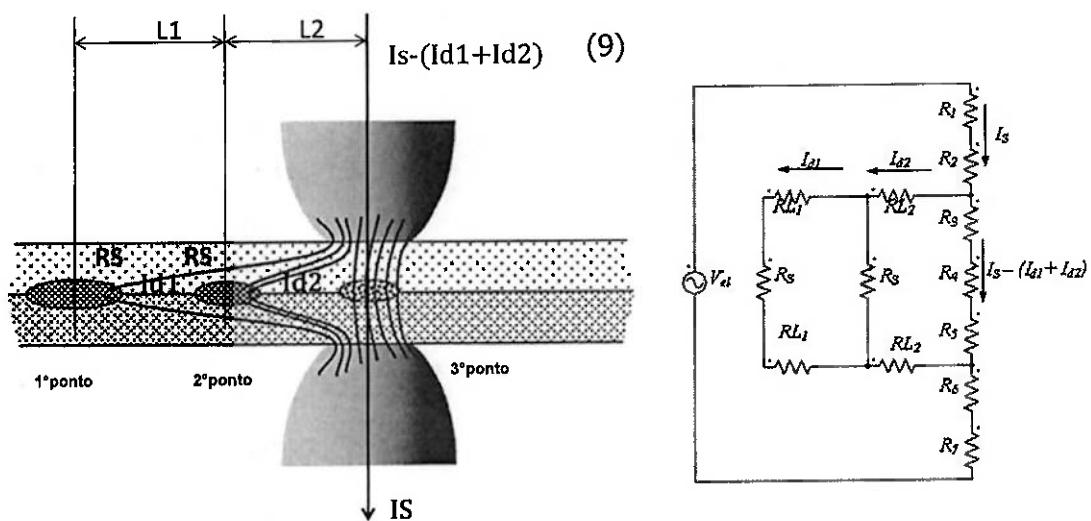


Figura 3.6- Corrente de desvio durante a soldagem [adaptado da referência [2]].

3.7. Eletrodo e seus efeitos no processo.

3.7.1. Efeito do desgaste do eletrodo.

Devido ao desgaste na ponta do eletrodo, haverá aumento na área de contato, conforme mostra a figura 3.7. Por outro lado, na recuperação da ponta (Fresagem), pode haver diminuição na área de contato. Ambas as situações causam perdas no processo. No primeiro caso, haverá diminuição da densidade superficial de corrente, diminuindo o rendimento do processo. No segundo, haverá aumento na densidade superficial de corrente, acarretando sobreaquecimento do eletrodo e diminuindo sua vida útil [1].



Figura 3.7- Desgaste ou deformação do eletrodo.

3.7.2. Compensação do desgaste do eletrodo ou Stepper.

A compensação de desgaste do eletrodo ou stepper é o acréscimo da corrente de solda a cada ponto executado. Através da programação da curva a compensação o calor é elevado gradativamente durante a vida útil do eletrodo. Ao sofrer a força de compressão, durante o tempo de soldagem, o eletrodo fica exposto a temperatura em torno 1000°C, deformando-se e aumentando área de contato. A cada ponto a área de contato aumenta diminuindo a densidade de corrente (A/mm^2). Por exemplo, eletrodos com área de contato inicial de $100mm^2$ e corrente de 10KA, têm densidade de corrente de $100A/mm^2$. Se após $150mm^2$ a densidade de corrente diminui para $66,6 A/mm^2$, desde que a corrente mantenha-se constante em 10kA. Com o aumento da área de contato a resistência elétrica entre as chapas diminui fazendo com que o calor transmitido seja cada vez menor. Por outro lado, o aumento da área de contato determina um volume maior de material que deverá ser fundido, já que a penetração (altura do ponto) deve ser mantida num valor mínimo, implicando que o calor deva ser gradualmente elevado a cada ponto de solda. Sabendo-se destes fatos o acréscimo da corrente de soldagem é essencial para que o ponto continue a ser produzido sem falha de caldeamento. Na prática observa-se que o desgaste dos eletrodos é maior causador de pontos pequenos ou sem fusão, conforme apresenta a figura 3.8 [6].



Ponto pequeno

Figura 3.8- Exemplo de ponto de solda com pouca área fundida causada pela excessiva deformação do eletrodo [6].

3.8. Influência da chapa galvanizada na vida útil do eletrodo.

A resistência de contato é baixa na soldagem em chapas revestidas com zinco devido sua a alta condutividade elétrica. A presença do zinco na soldagem por resistência diminui a vida útil do eletrodo. Isto é devido a liga de cobre com o zinco formarem o latão o que aumenta a resistência elétrica na face do eletrodo. Em consequência deste fato a temperatura do eletrodo aumenta durante a soldagem.

A face do eletrodo é deformada através do aquecimento e por repetidos impactos mecânicos na interface eletrodo-chapa. O latão formado na face de contato do eletrodo é frequentemente captados pela chapas, deixando um anel dourado marcando no contorno da indentação na chapa. Portanto, o revestimento do zinco promove o desgaste do eletrodo. Na figura 3.9 mostra um par de eletrodos depois de um grande número de pontos de solda sobre a chapa de aço zincada. A superfície do eletrodo nota-se claramente sinais de oxidação e formação de latão [2].

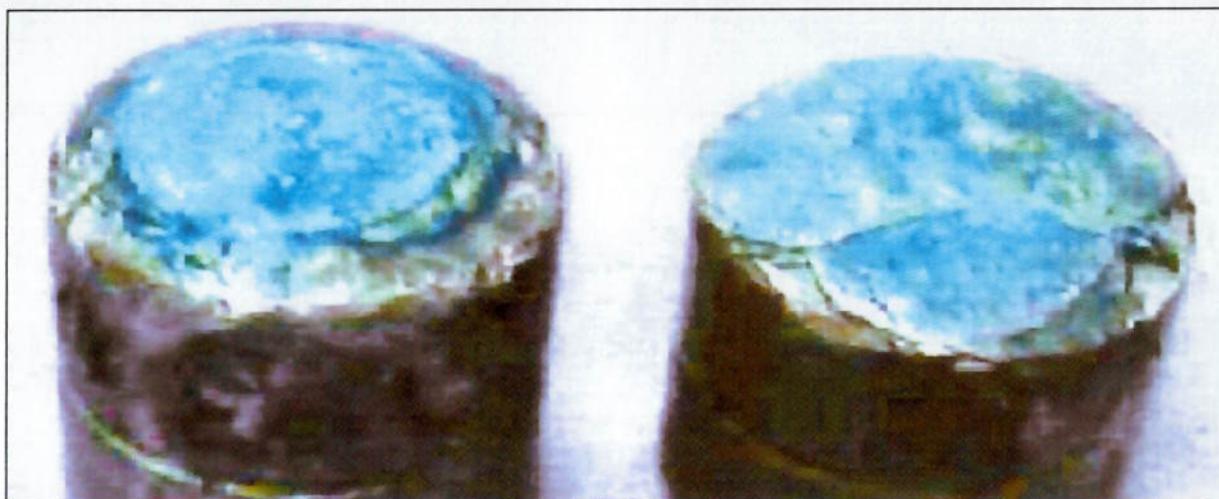


Figura 3.9- Influência da chapa com revestimento de Zn na vida útil do eletrodo [2].

3.9. Refrigeração dos eletrodos.

A Refrigeração dos eletrodos é um aspecto muito importante para sua manutenção, principalmente na soldagem em chapas galvanizadas devido a formação do latão no contato do cobre com o zinco da chapa, em consequência disso aumenta a resistência na face do eletrodo elevando a sua temperatura. Para aços revestidos a vazão deverá ser de 6 a 7 l/min. [4]. O superaquecimento do material do eletrodo à base de cobre faz com que a dureza da liga diminua e com isso o processo de deformação da face de contato do eletrodo inicia a uma taxa acelerada [13]. A figura 3.10 mostra esquematicamente o sistema de refrigeração para o eletrodo na soldagem por resistência a ponto.

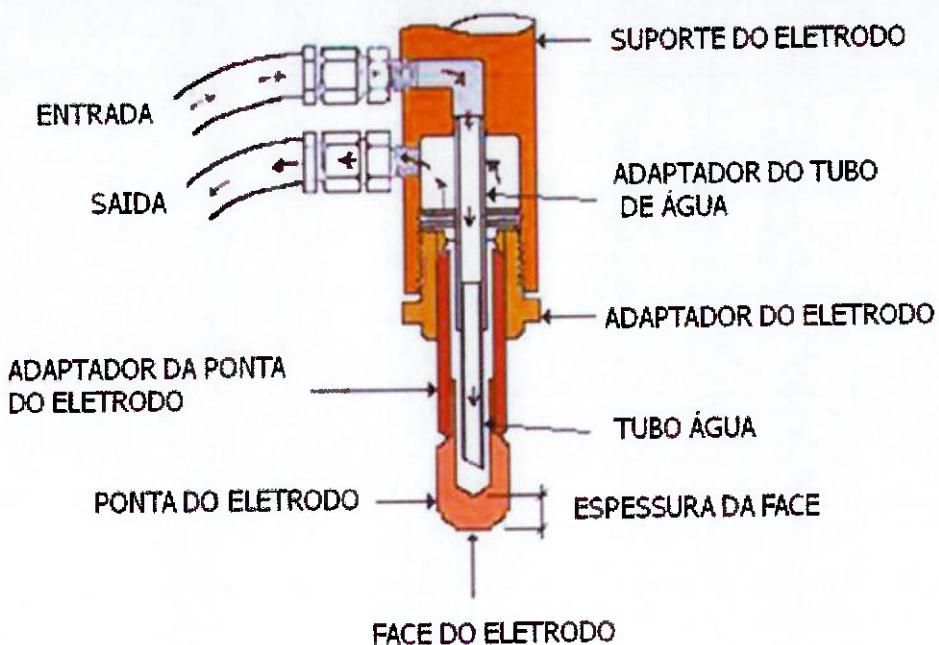


Figura 3.10- Sistema de refrigeração do eletrodo [4].

A água para refrigeração deve estar dentro das especificações do fabricante da máquina, a fim de manter a qualidade do equipamento e garantir a correta taxa de transferência térmica [6].

A correta refrigeração do eletrodo depende da distância do tubo interno de água, além do alinhamento e ângulo de corte, abaixo a figura 3.11 mostra a posição correta para o tubo de refrigeração, é recomendado que o tubo seja de metal, podendo ser flexível ou rígido.

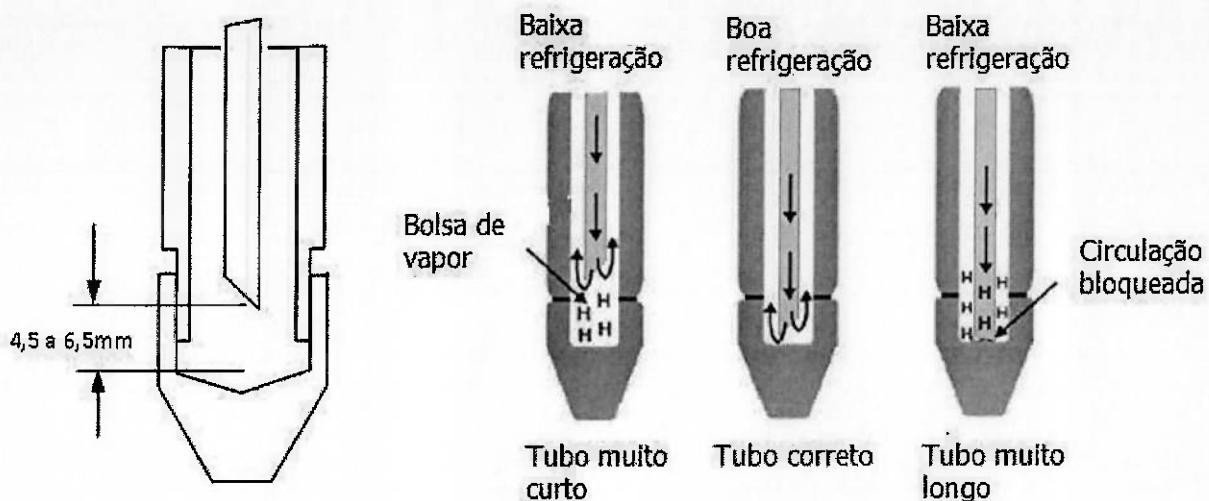


Figura 3.11- Medidas de referência para correta posição do tubo de refrigeração [6].

3.10 . Materiais dos eletrodos e suas classificações.

Devido os eletrodos trabalhar sob condições extremamente desfavoráveis de pressão e temperatura, eles devem possuir propriedades mecânicas, térmicas e elétricas bastante elevadas [6].

As principais características dos materiais necessárias ao bom desempenho das funções do eletrodo são [5]:

- Alta condutividade elétrica: devido a passagem da corrente elétrica elevada, para evitar perdas e superaquecimento dos eletrodos. A resistência de contato eletrodo-peça é muito influenciada pela condição elétrica do eletrodo;
- Alta condutividade térmica: para melhor conduzir o calor gerado principalmente nos pontos de contato eletrodo-peça;
- Elevada dureza e resistência ao desgaste a elevadas temperaturas: a fim do eletrodo não se gastar e deformar, mantendo a forma original;
- Elevada resistência a redução da dureza a temperaturas elevadas: o eletrodo, pela sua própria função, trabalha em temperaturas elevadas, a redução da dureza é devido ao efeito da temperatura diminuirá a vida útil do eletrodo, devendo por isto o material ser resistente a redução da dureza depois de submetido longos tempos a temperaturas elevadas;

- Pequena tendência para formar liga com material a ser soldado a fim de evitar que o material fique aderido ao eletrodo.

Os eletrodos à base de cobre estão classificados segundo a Resistance Welder Manufacturers Association (RWMA) em 3 classes [12] :

Classe 1: Não são tratáveis termicamente mas são endurecidas por trabalho a frio, que não afeta as propriedades elétricas e térmicas. Possuem resistência mecânica, dureza e condutibilidade elétrica elevadas. Essa classe é usada na soldagem de chapas de aço zincadas, estanhadas ou cromadas, alumínio e suas ligas e magnésio e suas ligas [1].

Classe 2: São endurecíveis por tratamento térmico ou por tratamento termodinâmico. Possuem propriedades mecânicas melhores que as ligas de classe 1, porém com condutibilidade elétrica e térmica inferiores. Esta classe é a de mais amplo uso em soldagem por resistência, tanto do ponto de vista das ligas como das condições de soldagem. Utilizadas na soldagem por resistência de aço de baixo carbono, aço-carbono niquelado, aços inoxidáveis, ligas a base de níquel e ligas a base de cobre, como bronze-sílico e cobre-prata [1].

Classe 20: É composta por materiais com capacidade de resistir a altas taxas de calor e pressão quando comparado com os materiais das classes 1 e 2. São fabricados utilizando cobre e material refratário. A Tabela 3.1 mostra as características dos materiais de fabricação dos eletrodos conforme a classificação da RWMA [12].

Tabela 3.1 – Características dos materiais dos eletrodos conforme a classificação da RWMA [12].

Classe RWMA	Descrição	Condutividade de (I.A.C.S)	Dureza (HB)	Mecanismo Endurecimento
RWMA 1 (Classe 2)	Cobre-Zircônio CuZr (0,15%Zr)	90%	70HB	Precipitação
RWMA 2 (Classe 2)	Cobre - Cromo CuCr (1%Cr)	85%	83HB	Precipitação
RWMA 2 (Classe 2)	Cobre Cromo Zircônio CuCrZr (1%Cr 0,25%Zr)	85%	83HB	Precipitação
RWMA 20 (Classe 20) Al-60	Cobre Resistente por Dispersão CuAl ₂ O ₃ (1,1%Al ₂ O ₃)	85%	75HB	Dispersão

3.11. Geometria do eletrodo.

Um eletrodo para soldagem a ponto possui 4 características geométricas que devem ser destacadas [1]:

- Face: é a parte que mantém contato com a peça de trabalho;
- Corpo: deve ter a suficiente massa, área ou espessura para suportar a força aplicada nas chapas e também para carregar a corrente de solda;
- Conexão é a forma como ele vai conectado no porta eletrodo ou suporte do eletrodo.
- Cavidade para refrigeração é a parte oca interna do eletrodo que está conectado ao porta eletrodo, serve para a refrigeração do eletrodo, não pode ser muito pequena para não dificultar a passagem da água de refrigeração e nem muito larga para não debilitar a estrutura do eletrodo.

Para este processo a manutenção e o consumo dos eletrodos são de grande relevância econômica, grande parte do desgaste dos eletrodos ocorre devido à alta temperatura de trabalho e o tempo de permanência que o eletrodo fica na mesma, sendo que a vida útil dos eletrodos está diretamente

ligada à correta especificação da matéria prima e da geometria para a aplicação do eletrodo [1].

A figura 3.12 mostra vários tipos padrões de eletrodos para soldagem por resistência a ponto.

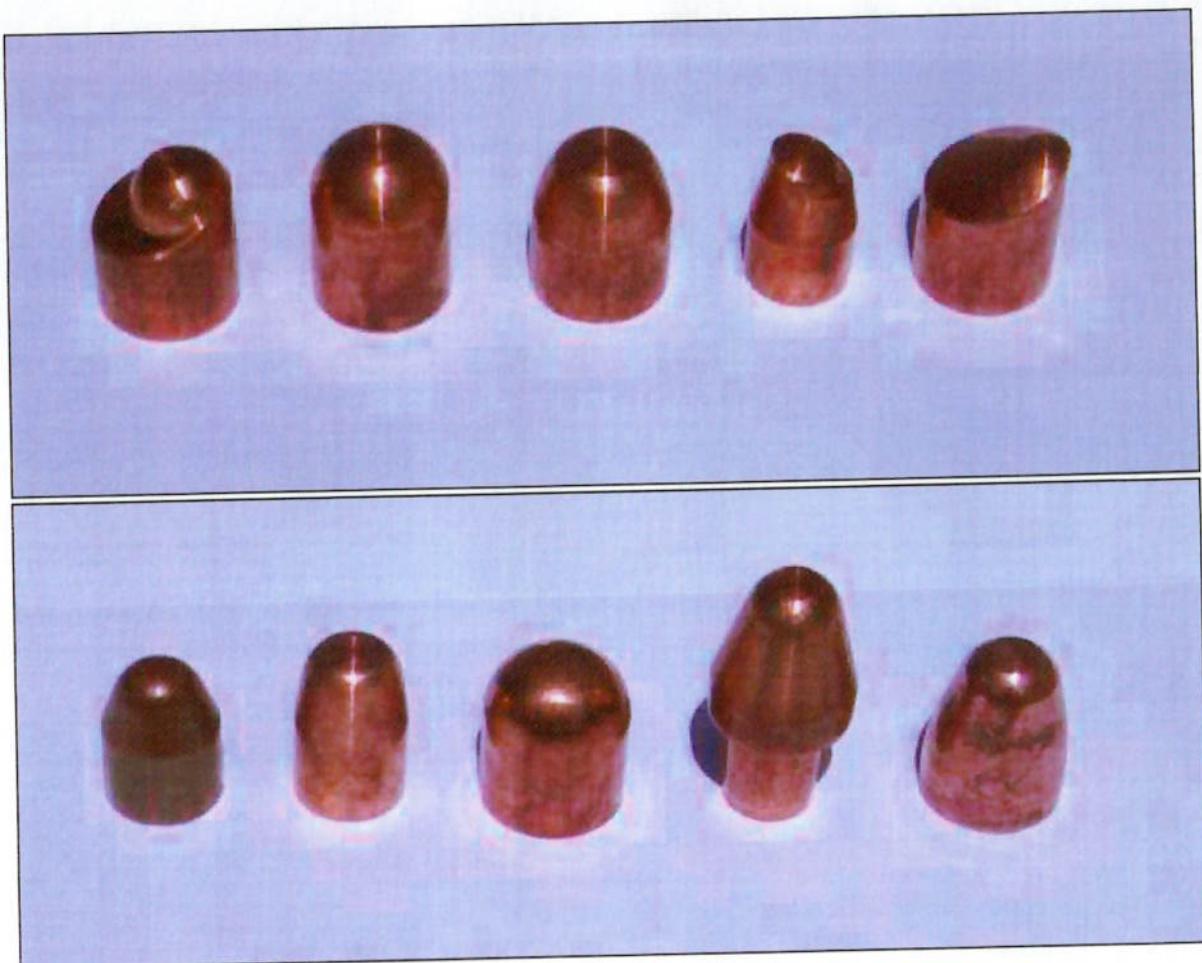


Figura 3.12- Tipos padrões de eletrodos para soldagem por resistência a ponto.

3.12 . Alinhamento e centralização dos eletrodos.

O alinhamento dos eletrodos é muito importante durante a soldagem, no qual tem a finalidade de manter um contato uniforme (eletrodo/peça) para melhor eficácia na condução de corrente elétrica e geração de calor, obtendo assim uma boa formação do ponto solda [2].

A figura 3.13 mostra o perfeito alinhamento dos eletrodos.

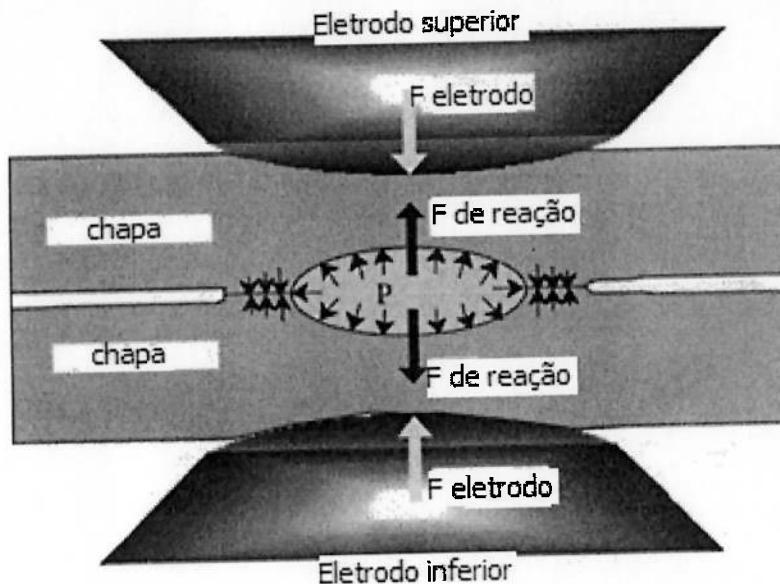


Figura 3.13 – Contato uniforme dos eletrodos em perfeito alinhamento [2].

O desalinhamento do eletrodo pode causar ovalização, descentralização do ponto e aumento de indentação. Outra consequência do desalinhamento é a mudança induzida na pressão de contato, causando uma distribuição assimétrica da pressão no contorno do ponto entre chapas, como mostra a figura 3.14, no entanto fica desfavorável a prevenção da vida útil do eletrodo e a expulsão de material, como mostra a macrografia na Figura 3.15 [2].

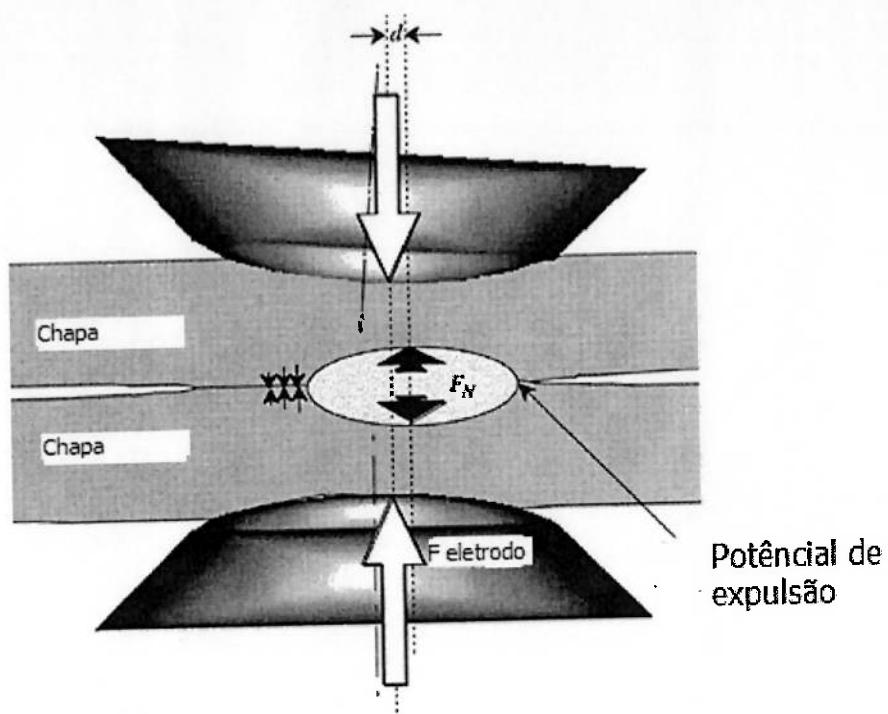


Figura.3.14 –Distribuição assimétrica da pressão [2].



Figura 3.15– Macrografia de um ponto não uniforme [2].

3.13. Indentação

É uma profundidade (P_i) criada na superfície da chapa soldada pela pressão do eletrodo durante a soldagem, como mostra a figura 3.16.

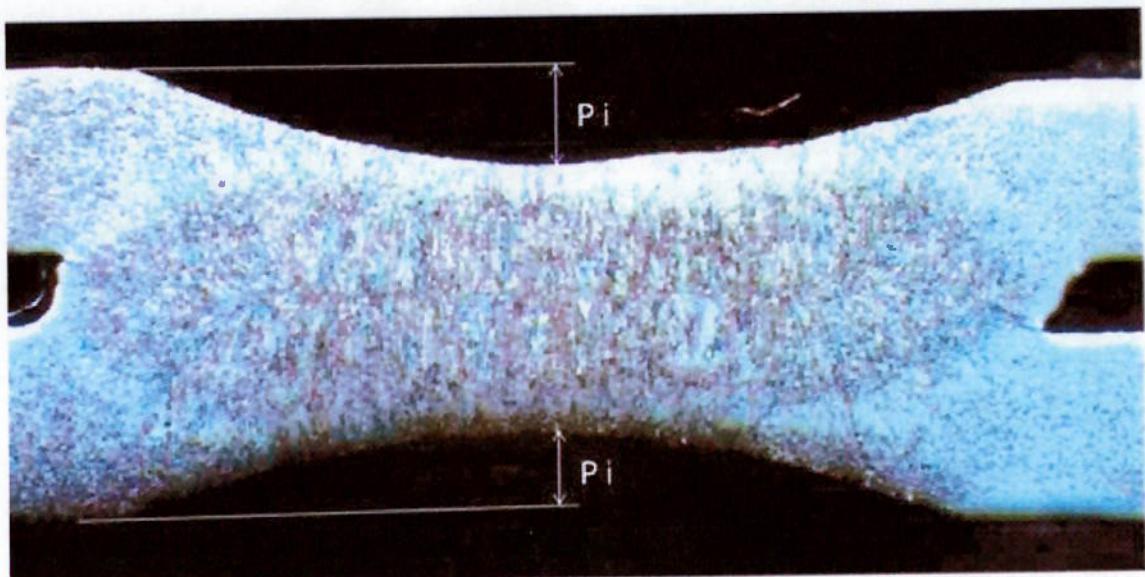


Figura 3.16– Profundidade criada na superfície da chapa soldada pela pressão do eletrodo [adaptado da referência [2]].

Em algumas normas a indentação é aceitável até 30% da espessura das chapas soldadas. Em muitos casos a indentação pode causar uma ligação fraca entre as chapas soldada devido à redução de espessura na área do ponto de solda. A expulsão de material está frequentemente associada a uma indentação mais profunda. Escolhe-se corretamente os parâmetros de soldagem, a indentação pode ser controlada para alcançar uma penetração e força suficiente para aplicação desejada [2]

4.MATERIAIS E MÉTODOS:

4.1.Características dos corpos de prova utilizados nos experimentos:

4.1.1 Eletrodos segundo especificações RWMA

Classe 1-Eletrodo em cobre zircônio (CuZr – 0,15% Zr), estampado a frio.

Classe 20- Eletrodo com cobre resistente (CuAl₂O₃ - 1,1% Al₂O₃), estampado e usinado.

A figura 4.1 mostra os eletrodos utilizados nos experimentos.

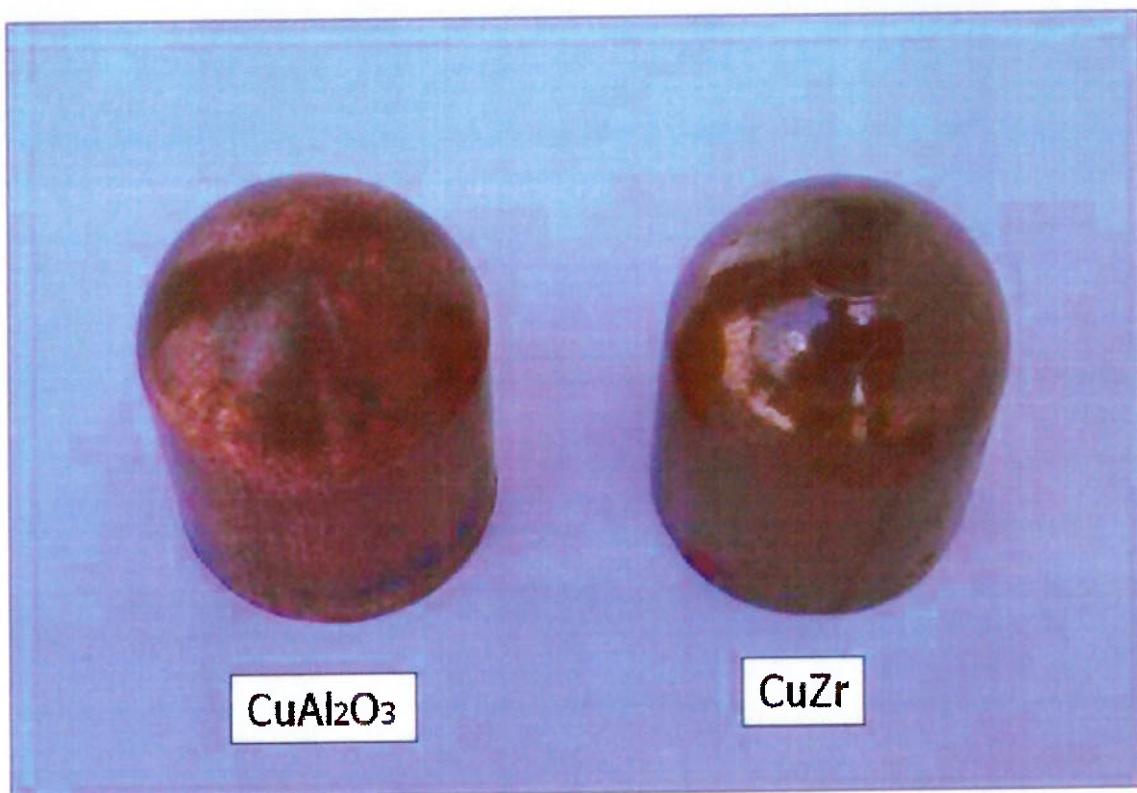


Figura 4.1- Eletrodos utilizados nos experimentos.

As pontas dos eletrodos tem raio esférico de 8mm e 20mm de comprimento, como mostra a figura 4.2.

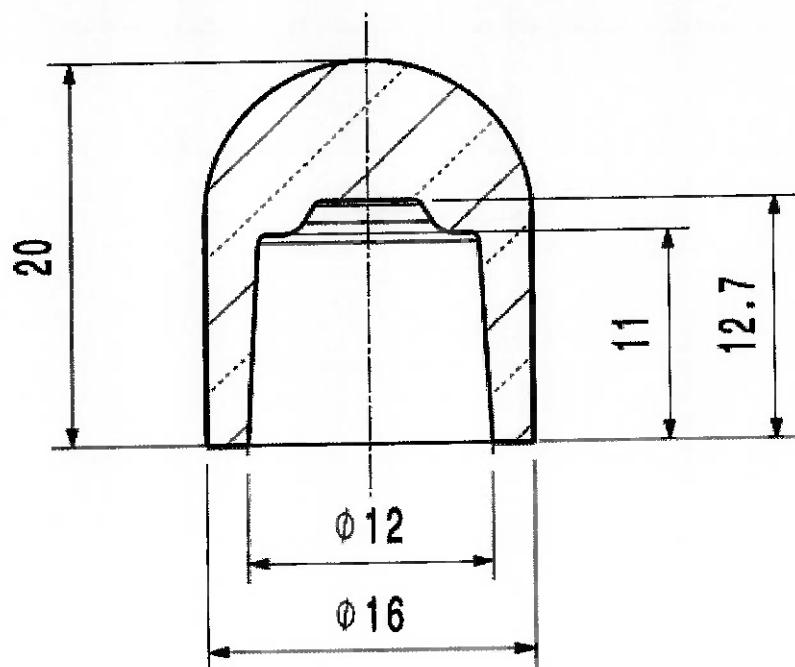


Figura 4.2 - Dimensões do eletrodo utilizado no experimento.

As tabelas 4.1 e 4.2, mostram os informativos do material dos eletrodos utilizados nos experimentos.

Tabela 4.1-Informativo do material do eletrodo (A).

Eletrodo (CuAl₂O₃)	
Composição química %	
Encontrado	Equipamento utilizado
Zn 0,023%	
Fe <0,0041%	Espectrômetro de emissão optico 4480 0062
Al <0,58%	
Zr 0,0012%	
Cu 99,2%	
Dureza	
189 HV 10	Microdurômetro HMV 4480 0016

Tabela 4.2-Informativo do material do eletrodo (B).

Eletrodo (CuZr)	
Composição química %	
Encontrado	Equipamento utilizado
Zn 0,025%	
Fe <0,0010%	
Al <0,0010%	
Zr 0,091%	Espectrômetro de emissão optico 4480 0062
Cu 99,7%	
Dureza	Equipamento utilizado
152 HV 10	Microdurômetro HMV 4480 0016

4.1.2. Chapa de aço.

Material: DIN EN 10152 DC04 ZE 75/75 B0 com espessura 0,85mm.

ZE- galvanização por eletrólise (zincagem), aplicação de um revestimento de zinco por deposição de zinco de uma solução aquosa de sal de zinco sob influência de um campo elétrico numa superfície de aço, devidamente preparada. As tabelas 4.3 e 4.4 mostram: a composição química, propriedades mecânicas e revestimento da chapa utilizada nos experimentos.

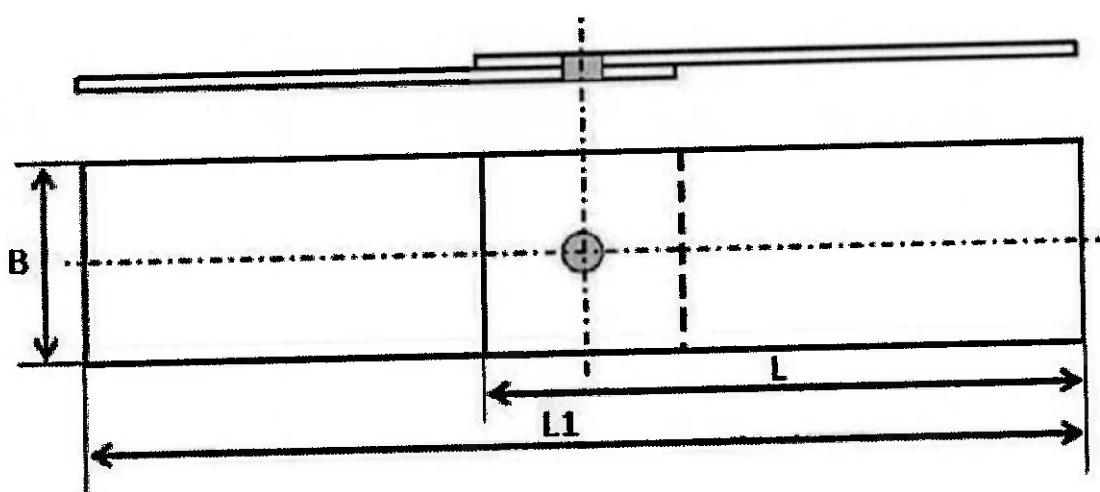
Tabela 4.3 – Composição química e propriedades mecânicas da chapa.

Sigla	Tipo de acabamento da superfície	Limite de resistência Mpa	Limite de escoamento	Composição química			
				C	P	S	Mn
DC04	+ZE	270 até 350	37%	0,08	0,03	0,03	0,4

Tabela 4.4- Revestimento eletrolítico de zinco da chapa.

Índice de camada	Camada nominal de zinco em cada lado	
	Espessura µm	Massa g/m ²
ZE 75/75	7,5	54

4.1.3. Corpo de prova para análise do ponto de solda.



Medidas em mm			
Espessura	B	L	L1
0,85	30	100	170

Figura 4.3- Dimensões do corpo de prova [adaptado da referência [14]].

4.2. Equipamento de soldagem.

Para realizar os pontos de solda foi escolhida uma máquina estacionária corrente alternada com alimentação 440V (60Hz) com acionamento pneumático por pedal, como mostra na figura 4.4.

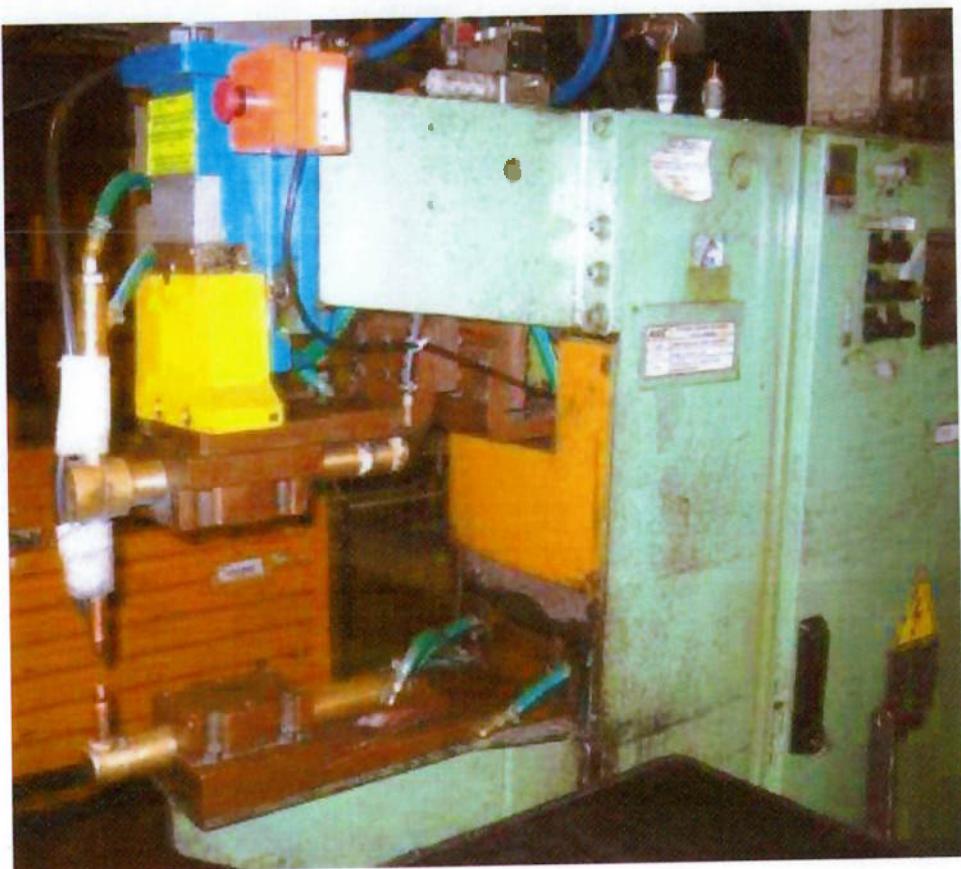


Figura 4.4- Equipamento de soldagem estacionário corrente alternada.

4.3. Determinação do diâmetro do ponto de solda através do diagrama de soldabilidade.

Antes de iniciar a soldagem nas chapas de trabalho, foi necessário definir a janela operacional ou área de soldagem através do diagrama de soldabilidade tempo versus corrente. A área compreende os parâmetros ideais para o processo, que variam conforme a intensidade da corrente e o tempo, já que a força é constante. A janela operacional situa-se entre os limites mínimos, que

são pontos não soldados ou pequenos (corrente baixa) e os limites máximos, que são determinados pela expulsão do material da junta soldada (corrente alta). No experimento utilizou-se o seguinte método:

Fixou-se força aplicada na soldagem em 340 kgf e o tempo em 100ms. Iniciou-se o primeiro teste com uma corrente de 6 KA, aumentando-se gradualmente a corrente em intervalos de 100A, até que, pelo menos três amostras apresentassem o menor diâmetro do ponto atingível, igual ou acima do valor mínimo especificado no teste de arrancamento de acordo com a norma, como mostra na figura 4.7. Desta forma o limite mínimo da corrente foi pré-fixada a partir desde ponto e acrescentou-se 200 A para a determinação final do limite mínimo da corrente de soldagem, conforme apresentado na figura 4.5.

Com o limite mínimo estabelecido aumentou-se gradualmente a corrente em intervalos de 100 A até ocorrer a expulsão de material, neste ponto diminui-se 200A e encontrou-se o limite máximo, também mostrado na figura 4.5.

Repetiu-se o mesmo procedimento acima para os outros três tempos, 150, 200 e 250 ms.

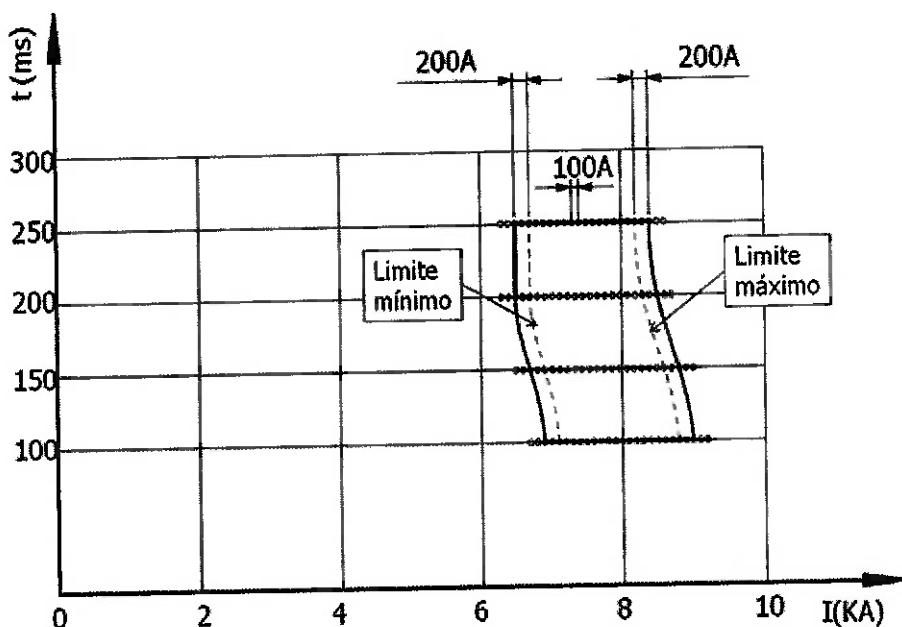


Figura 4.5- Método de determinação dos limites mínimo e máximo de correntes de soldagem.

4.4. Soldagem das chapas de trabalho.

Para produzir os pontos de solda foram utilizadas chapas de 200x300mm com 0,85mm de espessura, como mostra na figura 4.6.

O espaçamento entre pontos foram referenciados conforme norma VW 01105-1: 2010-02.

$$dLmin \geq 3,5\sqrt{t_1} \quad (10) \quad Vmin = 1,25 \times dLmin \quad (11)$$

$$e = 5 \times dLmin \quad (12) \quad f \geq e$$

$dLmin$ =diâmetro mínimo do ponto de solda.

t_1 = espessura da chapa.

$Vmin$ =distância mínima entre o centro do ponto de solda e a borda da peça.

e =distância mínima entre centros dos pontos de solda.

f = distânciá mínima entre costuras.

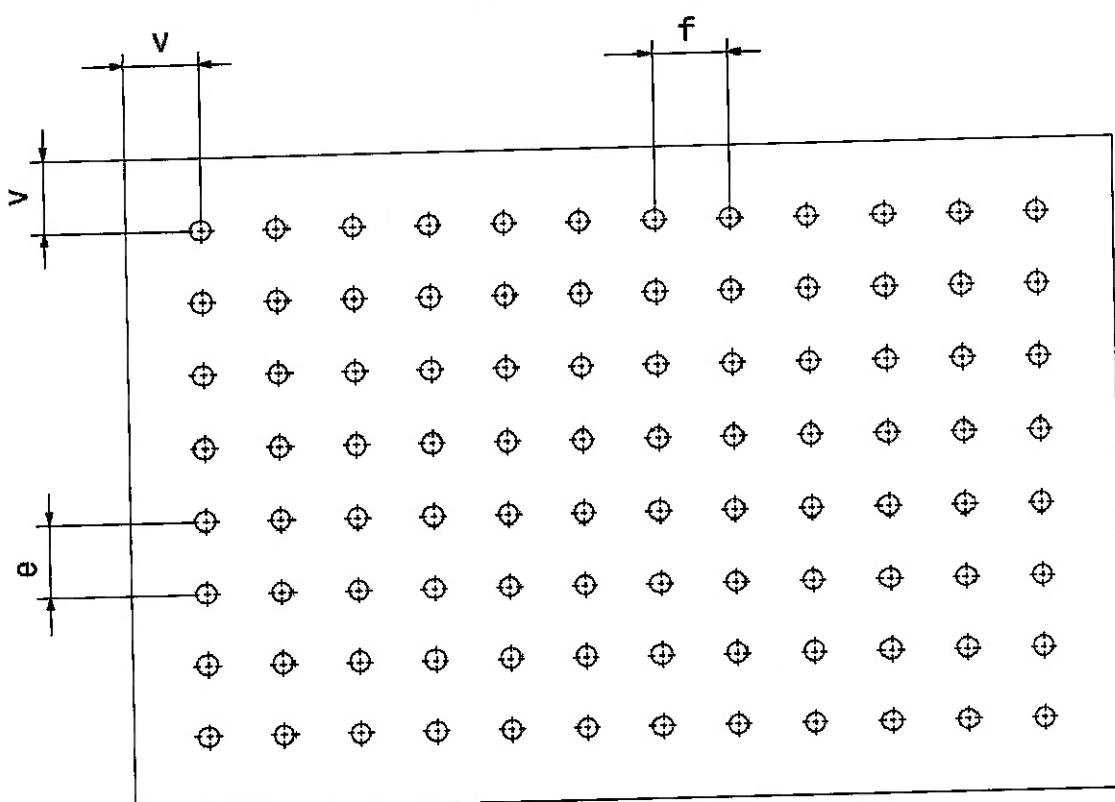


Figura 4.6 – Chapa de trabalho.

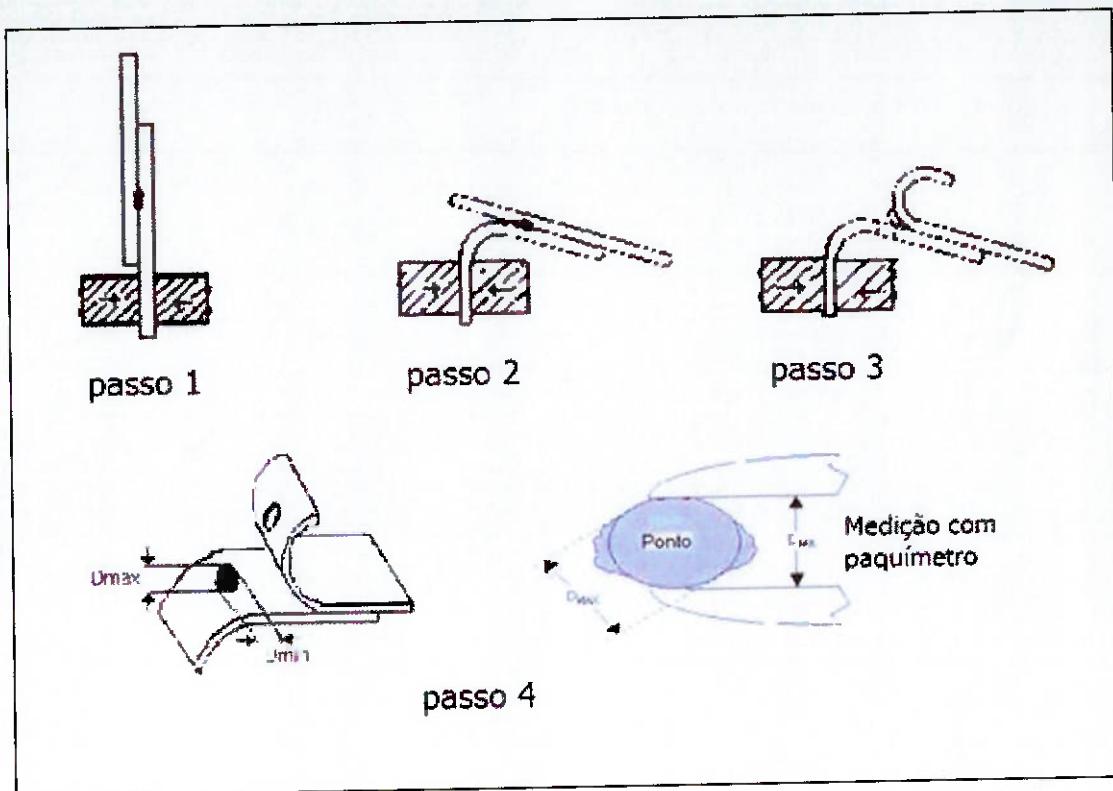


Figura 4.7 - Verificação do ponto de solda no teste de arrancamento.

4.5. Parâmetros de soldagem.

Os parâmetros de soldagem, mostrados na tabela 4.5 foram definidos através do diagrama de soldabilidade visto na figura 4.5. Com esses parâmetros foi obtido o ponto de solda acima do diâmetro mínimo de 3,9mm para chapas com revestimento de acordo com a norma.

Tabela 4.5- Parâmetros de soldagem utilizados nos testes.

Corrente de soldagem	Tempo de soldagem	Força de atuação nos eletrodos
7,5kA	200ms (12 ciclos)	340Kgf

4.6. Equipamentos de calibração.

O equipamento de soldagem passou por processo de calibração após definido os parâmetros de soldagem visto na tabela 4.5. Para calibração do tempo e corrente de soldagem, foi utilizado o medidor de corrente FASE HCM 4300 HHT, mostrado na figura 4.8. Para calibração da força foi utilizado um dinamômetro digital com capacidade de carga 1000kg, também mostrado na figura 4.8.

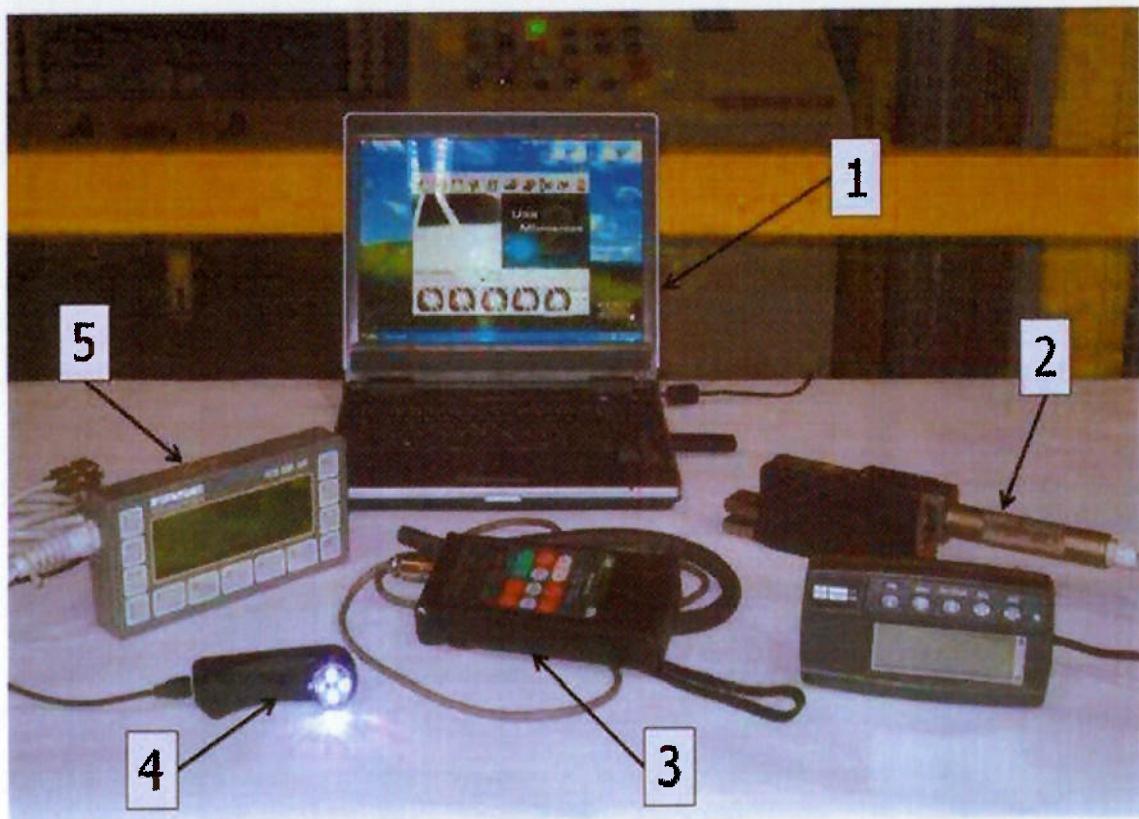


Figura 4.8- Equipamentos utilizados nos testes de avaliação dos eletrodos.

Tabela 4.6- Descritivo dos equipamentos utilizados nos testes de avaliação dos eletrodos.

Item	Equipamentos	Descrição
1	Computador	Com programa instalado USB Microscope
2	Dinamômetro digital	Capacidade 1000kg
3	Equipamento de leitura de corrente	WELD TESTER MM-3158 MIYACHI
4	Mini câmera	Adaptada pela Welding Science
5	Calibrador de tempo e corrente	FASE HCM 4300 HHT

4.7.Medição do desgaste dos eletrodos.

A cada cem pontos de solda eram medidas as áreas das superfícies desgastadas dos eletrodos inferior e superior, através do congelamento de imagem gerada pela mini câmera adaptada pela Welding Science, ligado a um programa chamado USB Microscope, que se permite fazer eletronicamente um círculo no contorno da área desgaste do eletrodo, após o congelamento da imagem como mostra na figura 4.8, obtendo assim o valor da área calculada pelo programa.

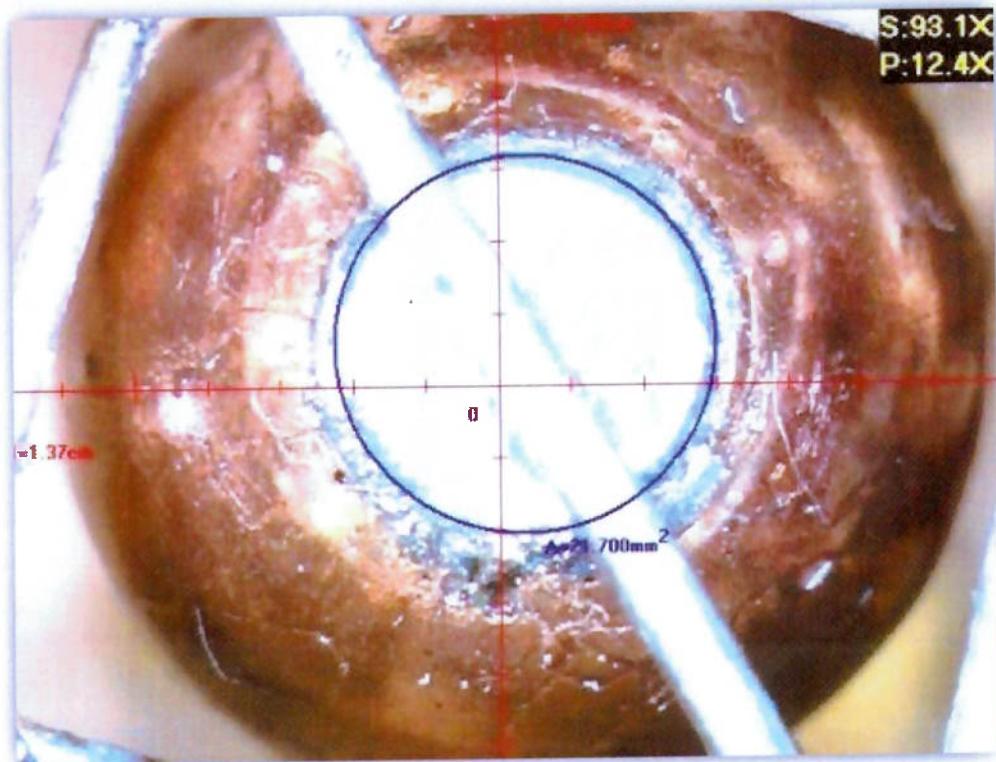


Figura 4.9- Congelamento da imagem para medir a área do desgaste

A vantagem deste processo de medição, é que não há necessidade de retirar os eletrodos da máquina, mantendo-os na mesma posição durante os testes, obtendo assim maior garantia nos resultados medidos, além do equipamento ter maior precisão. Na figura 4.9 mostra o posicionamento correto da mini câmera para captação da imagem.



Figura 4.10- Posição da mini câmera para captação de imagem.

4.8. Determinação do diâmetro médio do ponto de solda.

A cada cem pontos foi medido o diâmetro médio do ponto de solda, tirando a média de três amostras conforme o procedimento de teste de arrancamento mostrado na figura 4.7. O corpo de prova utilizado para análise do tamanho do ponto de solda é, mostrado na figura 4.3. A verificação do tamanho do ponto solda foi feito até chegar o limite de não ocorrer mais a fusão, devido a variação de densidade de corrente.

A figura 4.10 mostra a determinação do diâmetro médio do ponto de solda.

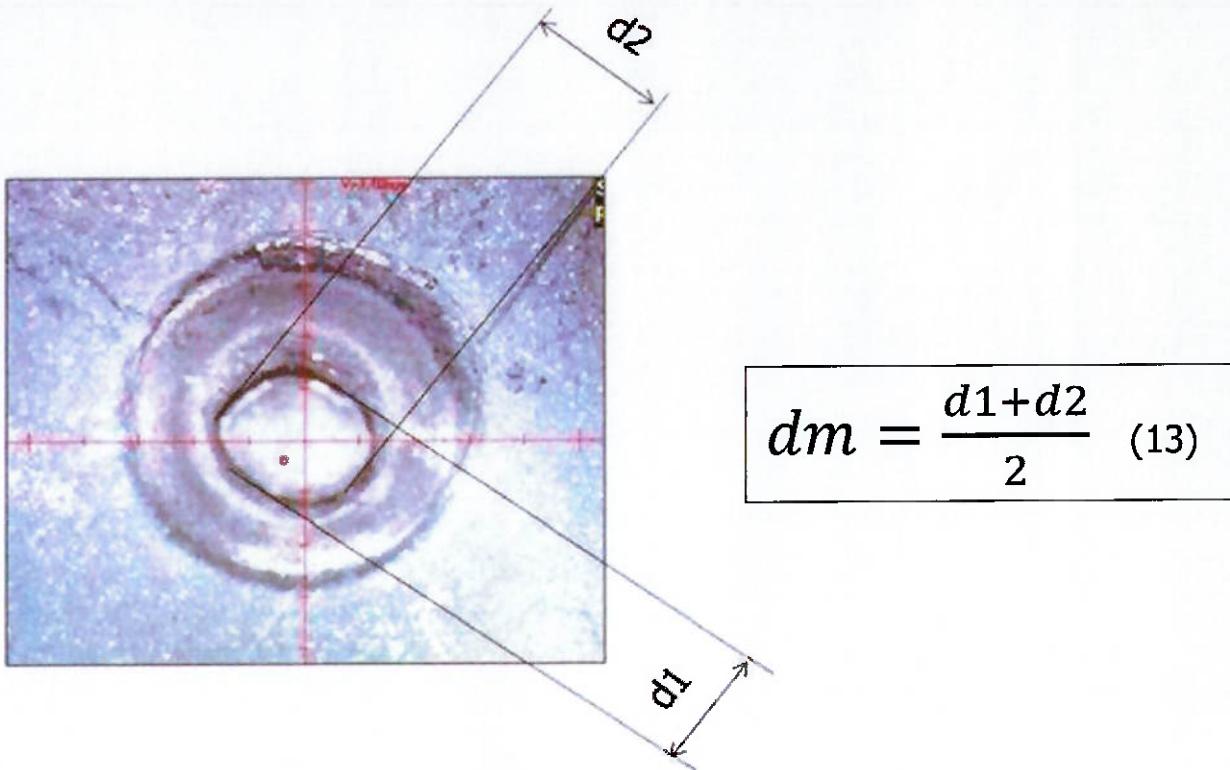


Figura 4.11- Determinação do diâmetro médio do ponto de solda

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.

5.1. Diagrama de soldabilidade tempo versus corrente.

No experimento pode-se notar que o diâmetro do ponto para o limite mínimo e o diâmetro do ponto para o limite máximo se estabilizam em 200 ms, respectivamente, com os valores de 6,5 KA e 8,5 KA. Os parâmetros para o experimento foram localizados a partir do ponto de maior grau de liberdade, no começo da estabilização do diâmetro do ponto, utilizando-se uma força constante de 340Kgf. Portanto os parâmetros do ponto ótimo foram: corrente 7,5KA, tempo de soldagem 200ms (12ciclos) e força constante 340kgf. No diagrama de soldabilidade mostrado na figura 5.1 estão representados os diâmetros médio dos pontos. A média do diâmetro da cada do ponto foi determinado através de três corpos de prova pelo processo de arrancamento.

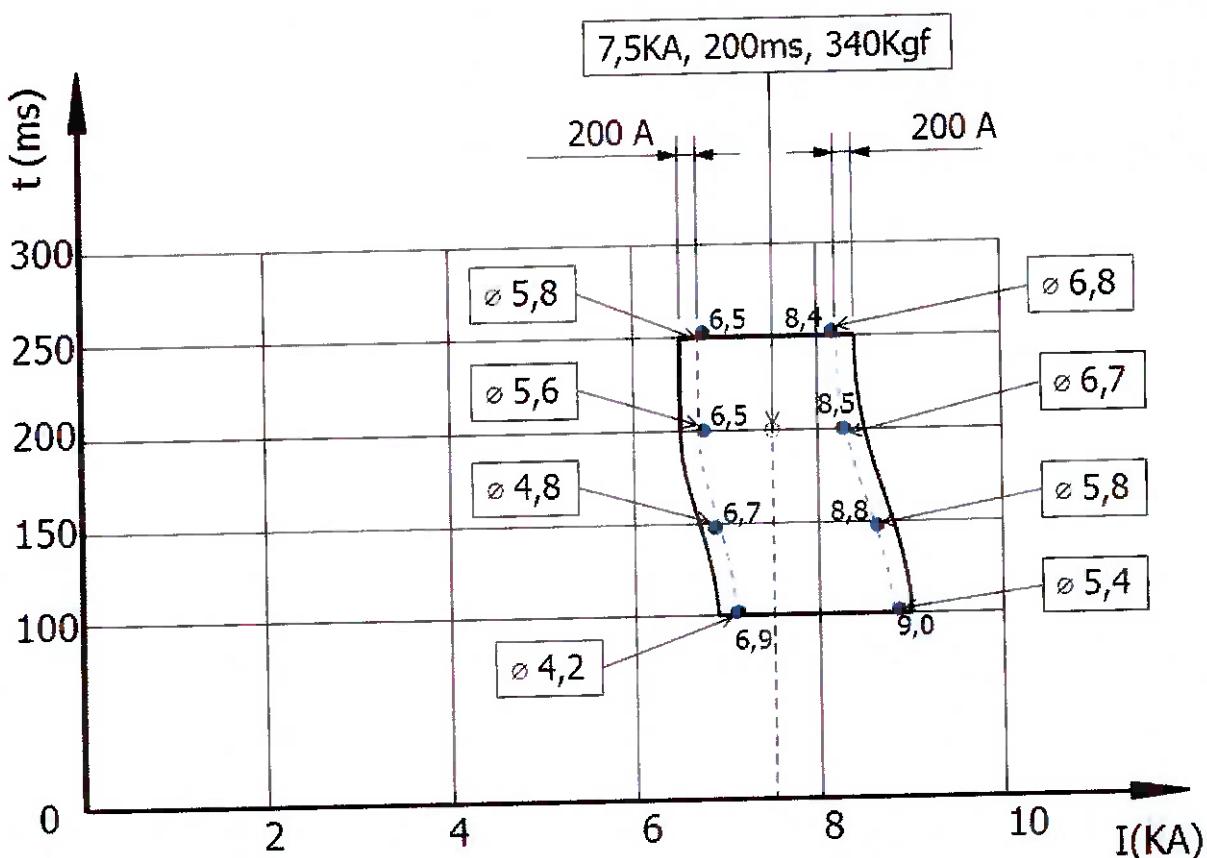


Figura 5.1-Diagrama de soldabilidade tempo versus corrente.

5.2. Teste de desempenho dos eletrodos CuAl₂O₃ e CuZr.

As tabelas 5.1 e 5.2 mostram os resultados obtidos nos testes dos eletrodos CuAl₂O₃ e CuZr, respectivamente. Com os dados foram plotados os seguintes gráficos: número de pontos de solda versus a área da face do eletrodo desgastada em (mm²) e número de pontos de solda versus o diâmetro médio do ponto em (mm).

Pode-se notar na tabela 5.1 que a taxa média da deformação a cada 100 pontos para o eletrodo CuAl₂O₃ é de 0,31mm².

Ainda pela análise da tabela 5.1 é possível notar também que a taxa média da diminuição do diâmetro do ponto da solda a cada 100 pontos é de 0,28mm.

Tabela 5.1- Número de pontos versus área da face do eletrodo superior e inferior e diâmetro do ponto médio na chapa (material do eletrodo CuAl₂O₃).

Número de pontos	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300
Face do eletrodo superior (mm ²)	20,8	21,6	23,1	23,0	23,0	23,0	23,6	24,0	24,0	24,0	24,6	24,6	24,8
Face do eletrodo inferior (mm ²)	20,8	22,3	22,5	22,8	23,0	23,0	23,0	23,0	23,6	23,6	23,8	24,0	24,0
Diâmetro do ponto médio na chapa (mm)	6,4	5,8	5,6	5,3	5,0	4,8	4,7	4,4	4,0	3,0	3,0	3,0	0,0

Tabela 5.2- Número de pontos versus a área da face do eletrodo superior e inferior e diâmetro do ponto médio na chapa (material do eletrodo CuZr).

Número de pontos	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300
Face do eletrodo superior (mm ²)	18,5	18,7	18,9	19,0	19,2	19,2	19,4	20,2	20,4	21,0	21,0	21,9	22,0
Face do eletrodo inferior (mm ²)	17,9	18,3	18,7	19,6	19,6	19,6	19,8	19,8	20,0	20,1	20,3	21,2	21,7
Diâmetro do ponto médio na chapa (mm)	6,2	5,0	4,0	4,0	4,0	3,9	3,6	3,5	3,5	3,4	3,0	0,0	0,0

Pode-se notar na tabela 5.2 que a taxa média da deformação a cada 100 pontos para o eletrodo CuZr é de 0,26mm².

Ainda pela análise da tabela 5.2 é possível notar também que a taxa média da diminuição do diâmetro do ponto de solda a cada 100 pontos é de 0,30mm.

A figura 5.2 gerada pelos dados das tabelas 5.1 e 5.2 mostra o desempenho dos eletrodos superior e inferior para cada material (A e B). É possível observar que o par do eletrodo A (CuAl_2O_3) superior e inferior apresentam maiores médias de deformação 14,7% e 14,3% respectivamente, se comparado ao par do eletrodo B (CuZr) em função do número de pontos executados. Este resultado está relacionado à maior formação de latão devido a maior concentração de Zn na face do eletrodo A (CuAl_2O_3) se comparado ao eletrodo B (CuZr).

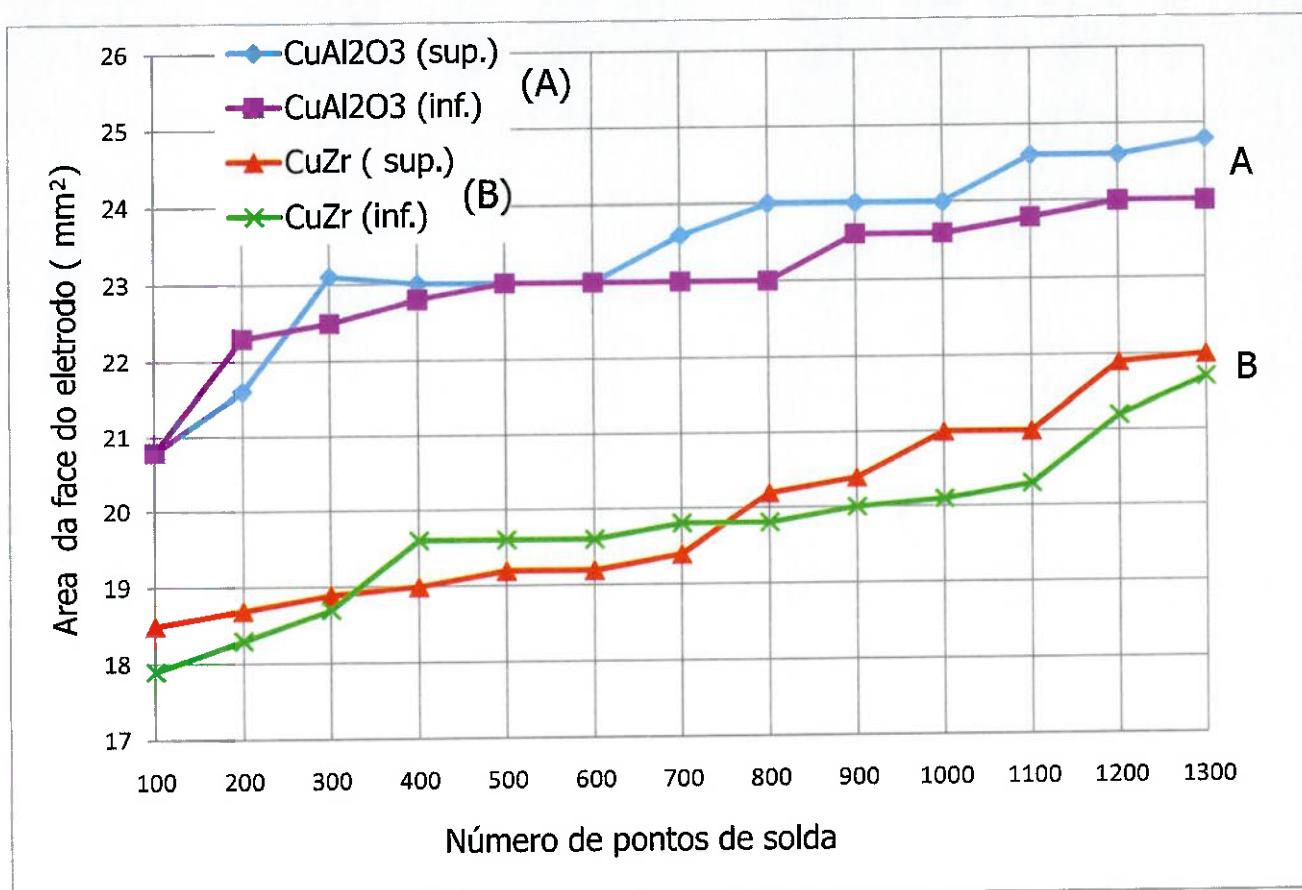


Figura 5.2 – Número de pontos de solda versus variações das áreas das faces dos eletrodos superiores e inferiores.

A figura 5.3 gerada pelos dados das tabelas 5.1 e 5.2, mostra o desempenho dos eletrodos A e B com relação à formação do diâmetro mínimo do ponto de solda, conforme a norma. O eletrodo A (CuAl_2O_3) embora ter maior deformação na face que o eletrodo B, visto na figura 5.2, apresenta maior desempenho na soldagem. O eletrodo A (CuAl_2O_3) mostra-se capaz de

soldar 900 pontos de solda sem ter ainda atingido o diâmetro mínimo de 3,9mm, conforme norma para chapas com revestimento.

Note-se também que apesar do eletrodo B (CuZr) ter menor deformação na face, apresenta menor desempenho na soldagem e mostra-se capaz de soldar 600 pontos antes de atingir o diâmetro mínimo, conforme norma.

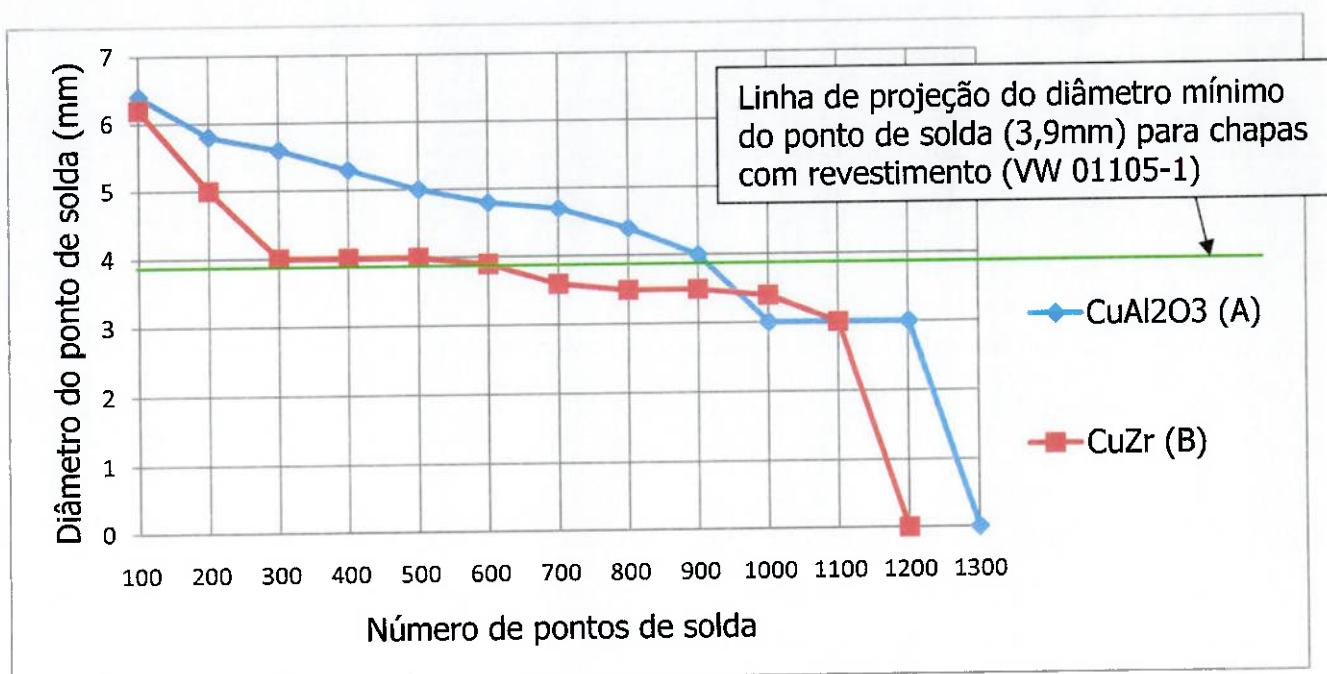


Figura 5.3 – Número de pontos de solda versus variação do diâmetro médio do ponto de solda.

Ainda pela análise da figura 5.3, é possível notar também que a diminuição do diâmetro do ponto de solda do eletrodo A (CuAl₂O₃) apresenta-se numa tendência decrescente aproximadamente constante até 900 pontos de solda. Enquanto que, o eletrodo B (CuZr) apresenta até 300 pontos de solda, uma queda brusca do diâmetro do ponto. Este resultado faz com que o ponto de solda executado eletrodo B (CuZr), com apenas 300 pontos de solda, se aproxime do diâmetro mínimo aprovado, conforme norma.

5.3. Indentação

As tabelas 5.3 e 5.4 mostram a profundidade das indentações dos pontos de solda executadas pelos eletrodos: A (CuAl_2O_3) e B (CuZr) respectivamente. Com os dados foi plotado o gráfico, número de pontos de solda versus a profundidade da indentação (mm).

Tabela 5.3- Número de pontos versus a profundidade da indentação (eletrodo A).

Eletrodo utilizado A (CuAl_2O_3)													
Número de pontos	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300
Profundidade da indentação em (mm)	0,28	0,21	0,16	0,16	0,11	0,08	0,07	0,06	0,04	0,03	0,02	0,02	0,01

Tabela 5.4- Número de pontos versus a profundidade da indentação (eletrodo B).

Eletrodo utilizado B (CuZr)													
Número de pontos	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300
Profundidade da indentação em (mm)	0,59	0,39	0,24	0,20	0,12	0,11	0,11	0,07	0,06	0,03	0,03	0,02	0,02

Pode-se notar que tanto o eletrodo A (CuAl_2O_3) quanto o eletrodo B (CuZr) mostram uma diminuição da indentação conforme o número de pontos de solda aumentam, conforme mostra a figura 5.4. Este resultado está relacionado com a diminuição do calor na interface eletrodo/chapa pelo aumento da densidade de corrente devido o aumento da deformação.

O fato do eletrodo B (CuZr) apresentar uma queda brusca no diâmetro do ponto de solda nos primeiros 300 pontos está relacionado com o maior

indentação apresentada em comparação ao eletrodo A (CuAl_2O_3) até 300 pontos de solda, conforme mostra a figura 5.4.

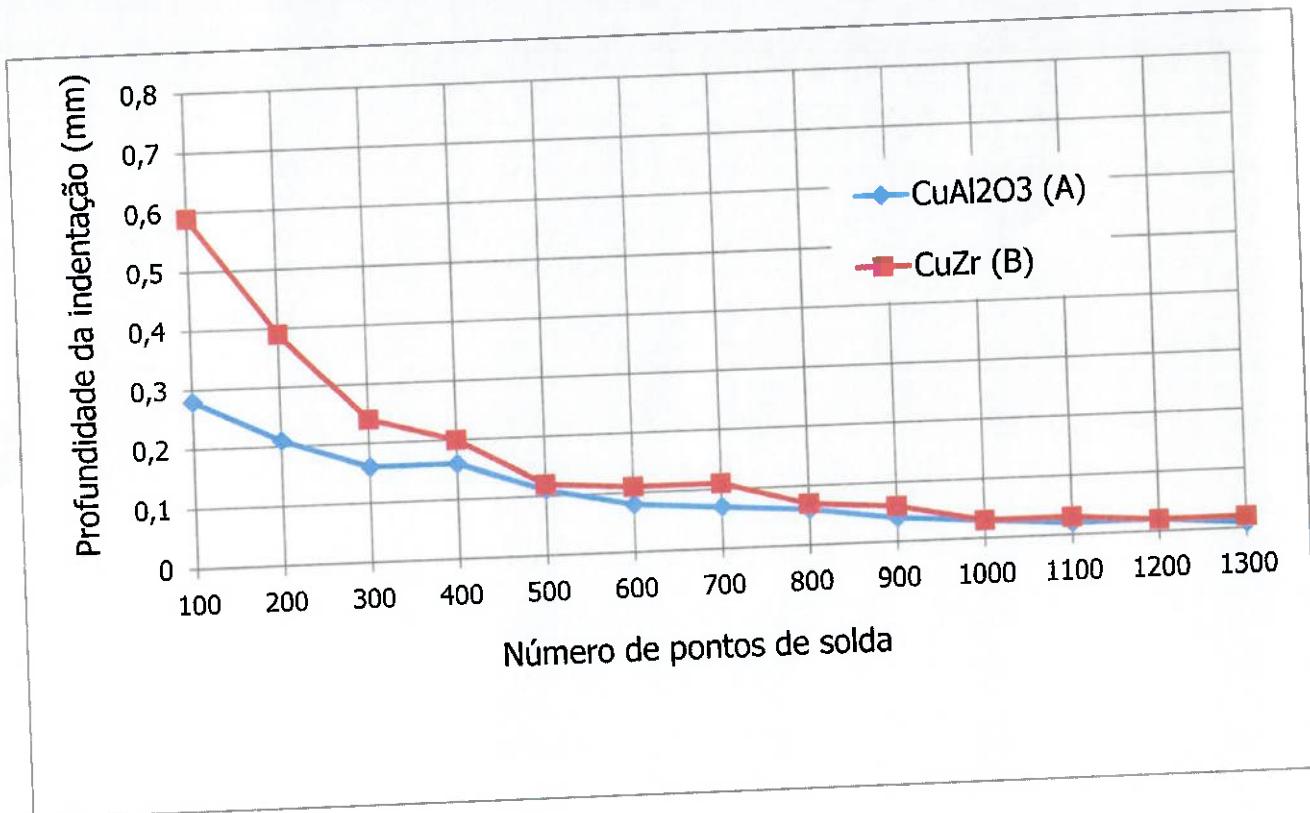


Figura 5.4 - Número de pontos de solda versus profundidade das indentações.

Este resultado é devido que o eletrodo B apresenta menor aderência de Zn e deformação na ponta do eletrodo, ou seja, com menor aderência de Zn irá ocorrer menor deformação na ponta do eletrodo se comparado ao eletrodo A e por consequência, a geração de calor irá apresentar-se maior. Este fenômeno é devido que quanto menor for à deformação, menor será a área de contato (eletrodo/peça), portanto, maior a densidade de corrente elétrica e por sua vez, maior será a geração de calor na face do eletrodo. Por este motivo, a maior indentação do eletrodo B está diretamente relacionado com a maior geração de calor apresentada na área de contato (eletrodo/peça). Este fato é devido que quanto maior a geração de calor na interface eletrodo/peça menor será a resistência mecânica da chapa nesta região e por consequência, maior será penetração do eletrodo na chapa.

5.4. Ensaio da composição química e dureza dos eletrodos após os testes.

A figura 5.5 mostra o par de eletrodos com material CuAl₂O₃ depois de ter executado 1300 pontos de solda.

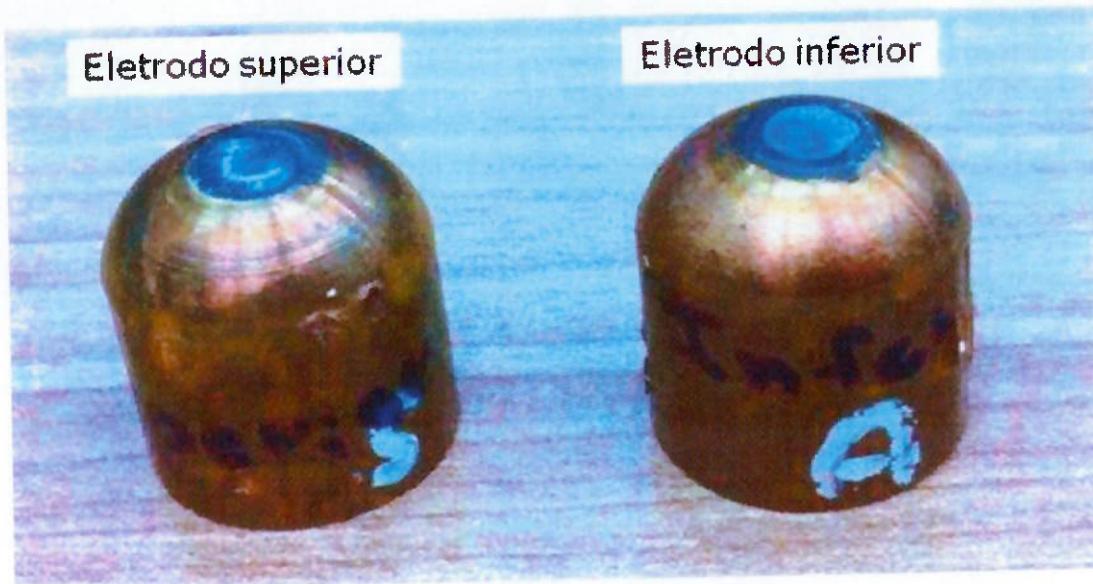


Figura 5.5- Eletrodos (CuAl₂O₃) com as faces consumidas após 1300 pontos de solda.

A tabela 5.5 mostra os resultados da composição química e dureza da face do eletrodo superior consumida pelo desgaste.

Tabela 5.5- Informativo do material do eletrodo (A) após ter executado 1300 pontos de solda.

Eletrodo superior (CuAl₂O₃)	
Composição química%	
Encontrado	Equipamento utilizado
Zn >53,4%	
Fe 2,41%	
Al 0,108%	Espectrômetro de emissão optico 4480 0062
Zr 0,0055%	
Cu 19,46%	
Dureza	Equipamento utilizado
194 HV 10	Microdurômetro HMV 4480 0016

A figura 5.6 mostra o par de eletrodos com material CuZr depois de ter executado 1300 pontos de solda.

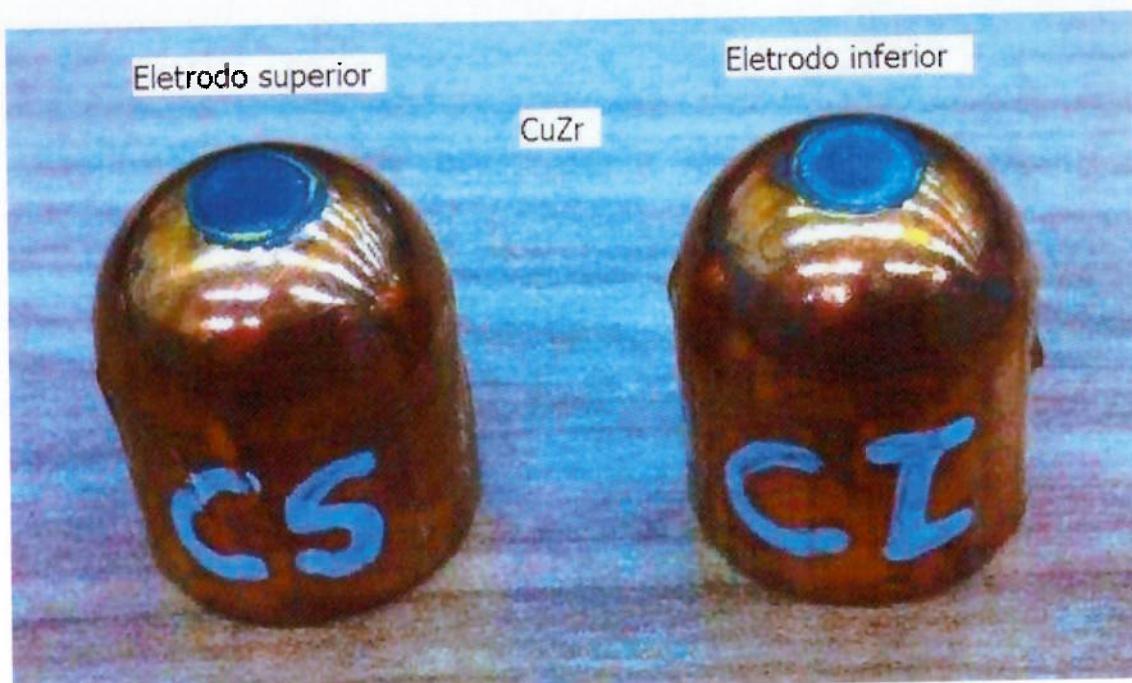


Figura 5.6 - Eletrodos com as faces consumidas após 1300 pontos de solda.

A tabela 5.4 mostra os resultados da composição química e dureza da face do eletrodo superior consumida pelo desgaste.

Tabela 5.6- Informativo do material do eletrodo (B) após ter executado 1300 pontos de solda.

Eletrodo superior (CuZr)	
Composição química %	
Encontrado	Equipamento utilizado
Zn >11,3%	
Fe 0,444%	
Al 0,059%	Espectrômetro de emissão optico 4480 0062
Zr 0,0070%	
Cu 86,0%	
Dureza	Equipamento utilizado
94,5 HV 10	Microduruômetro HMV 4480 0016

A figura 5.7 mostra o percentual de zinco aderido na face do eletrodo após 1300 pontos de solda executados.

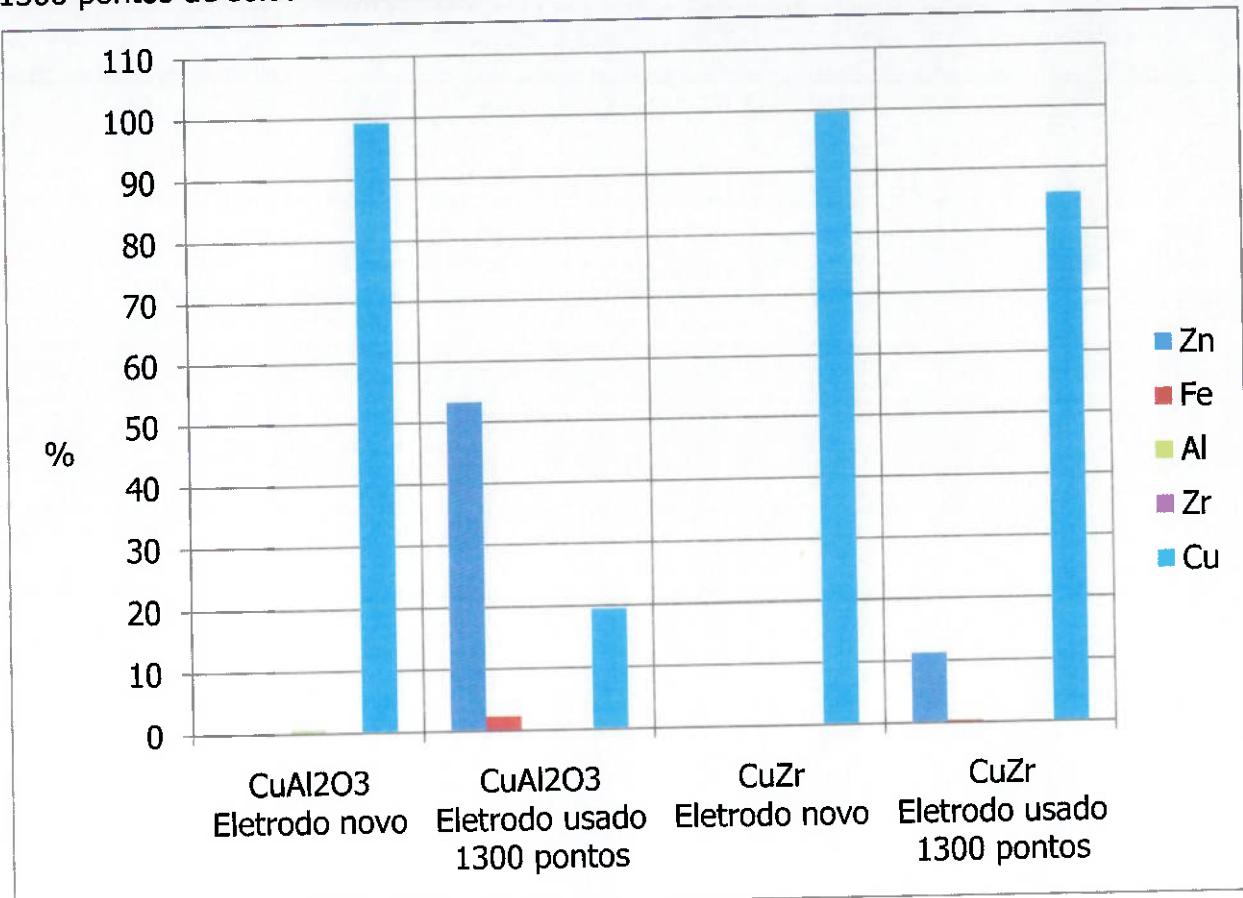


Figura 5.7 – Composição química (%) do eletrodo novo e usado.

Nota-se que o eletrodo A (CuAl₂O₃) apresentou maior concentração de Zn como mostra a figura 5.7 e também maior dureza se comparada com o eletrodo B (CuZr) após 1300 pontos de solda. As figuras 5.8 a 5.21, a seguir, mostram a evolução dos pontos de solda com 100, 300, 400, 600, 900, 1000 e 1200 para ambos os eletrodos A e B. Para isto foi apresentada nas figuras a área de contato do eletrodo capturada por uma câmera especialmente adaptada, o diâmetro médio pelo teste de arrancamento e a macrografia, respectivamente. Ainda pela análise das figuras 5.8 a 5.21, é possível notar que conforme a área do eletrodo aumenta pela deformação o diâmetro do ponto de solda diminui. Este resultado está relacionado com o aumento da densidade de corrente elétrica devido ao aumento da área de contato eletrodo/peça. Por consequência deste fato a geração de calor entre as chapas apresenta-se menor.

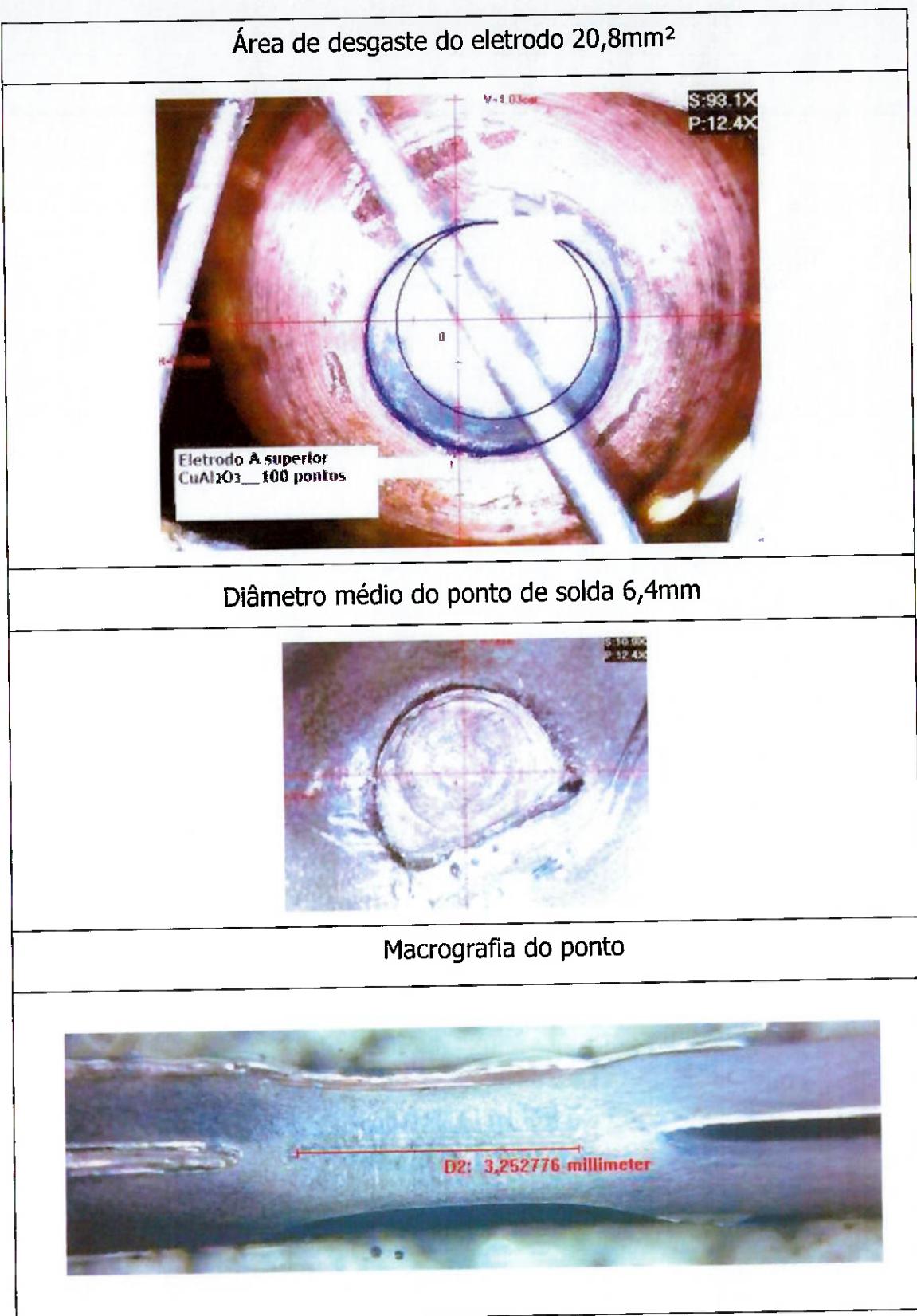


Figura 5.8 - Ponto de solda número 100 executado com o eletrodo A (CuAl₂O₃).

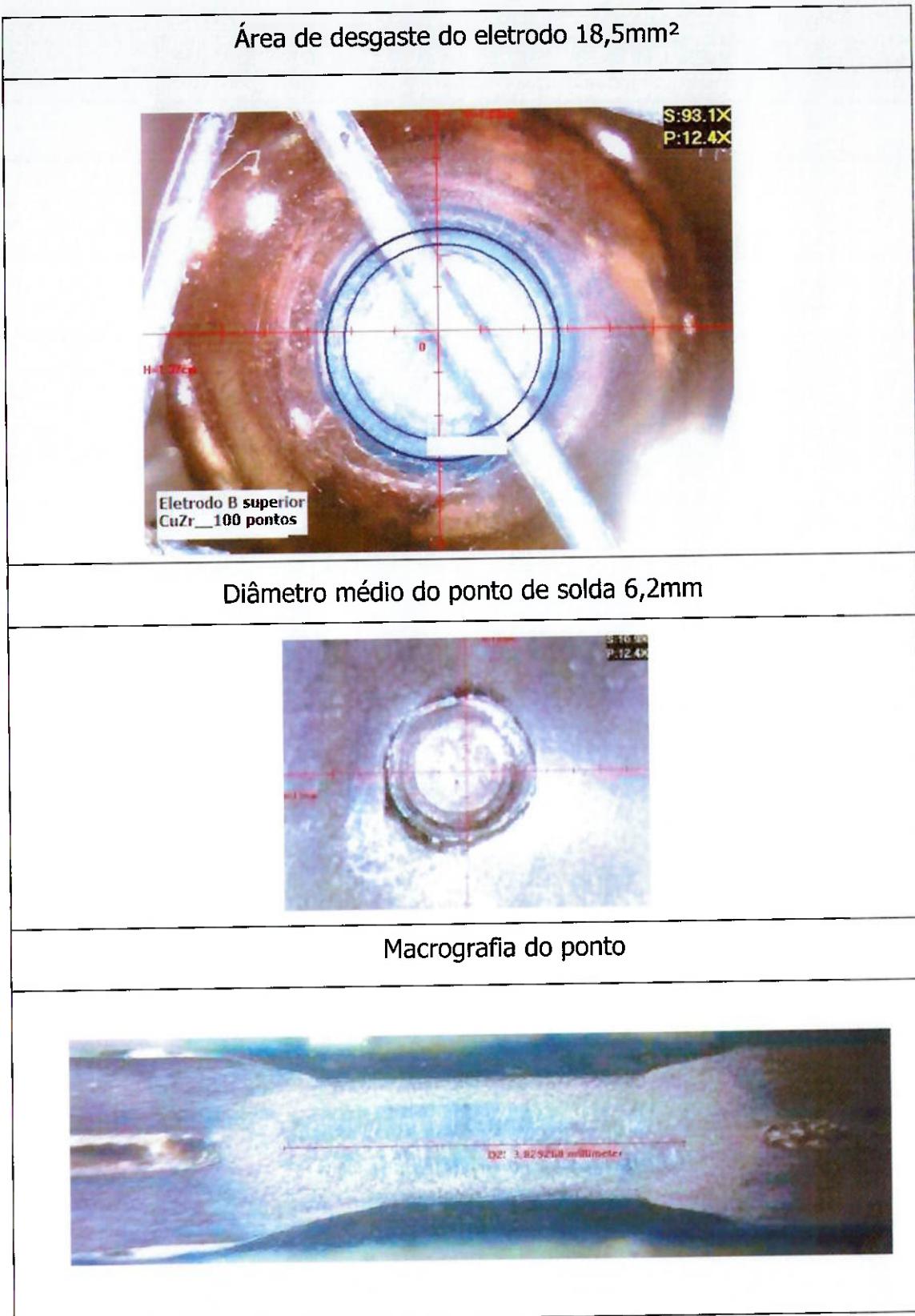


Figura 5.9 - Ponto de solda número 100 executado com o eletrodo B (CuZr).

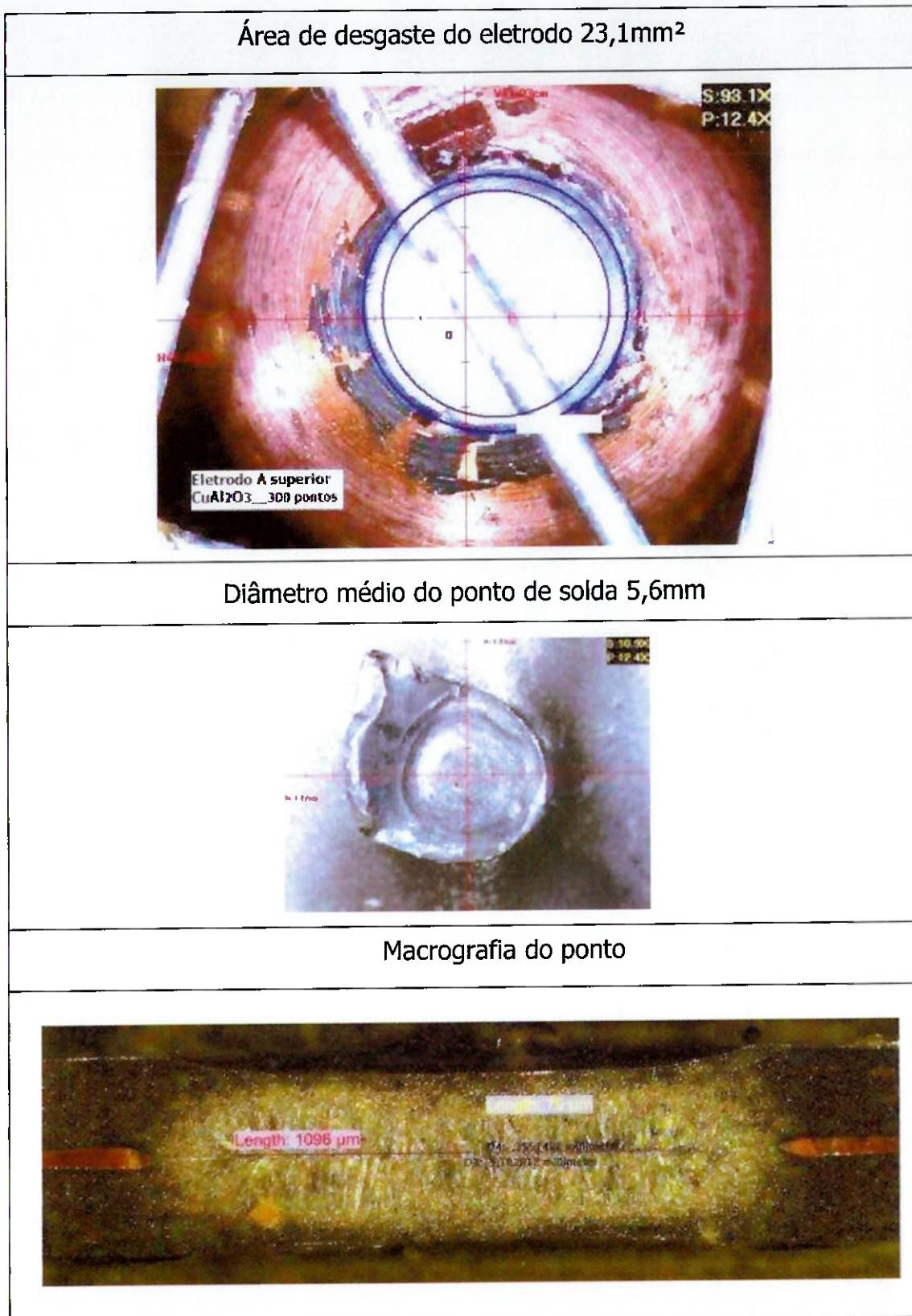


Figura 5.10 - Ponto de solda número 300 executado com o eletrodo A (CuAl₂O₃).

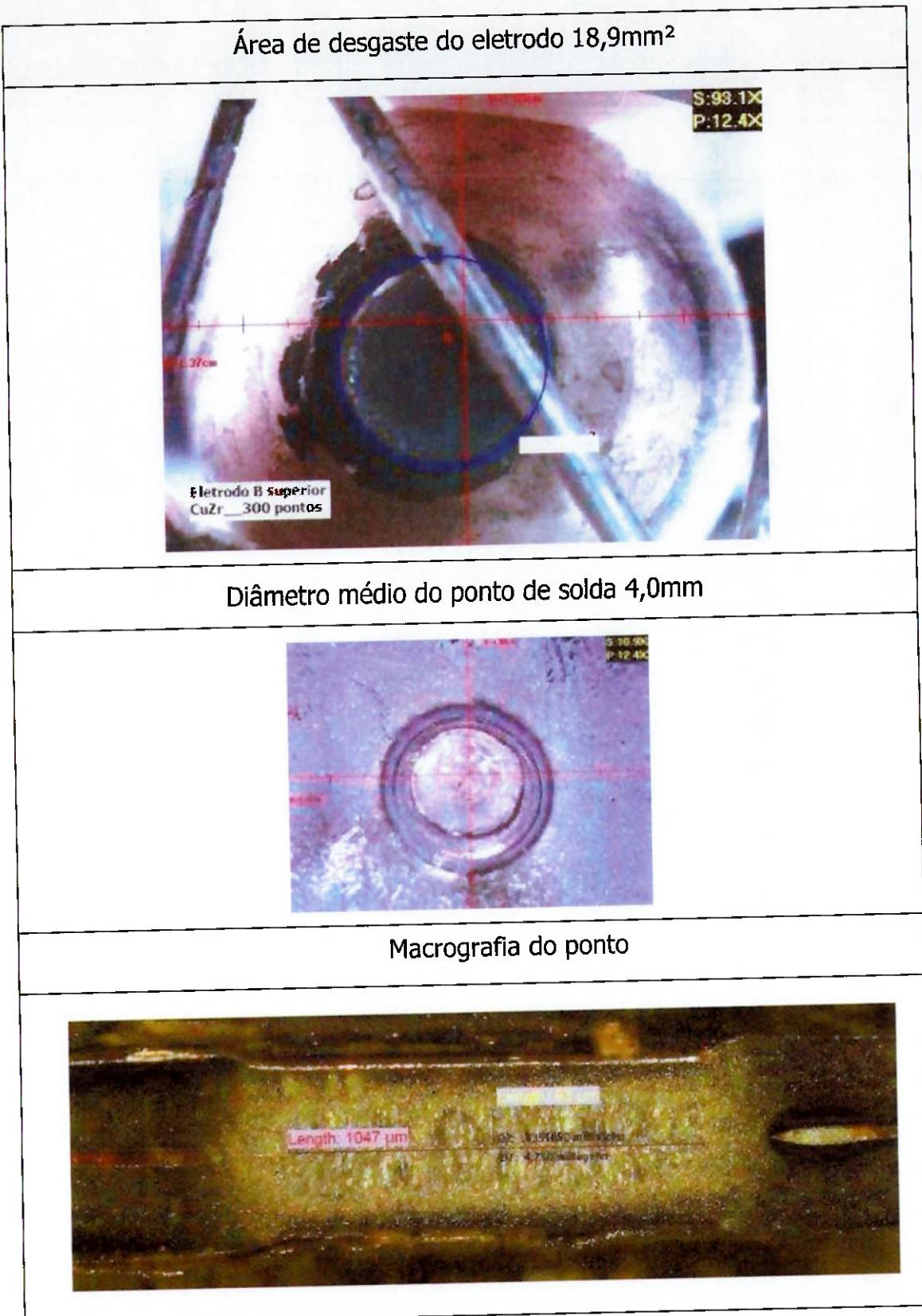
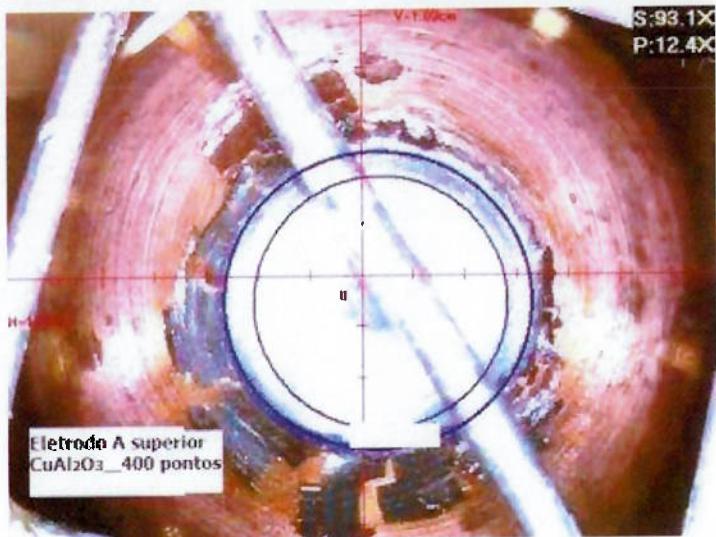


Figura 5.11 - Ponto de solda número 300 executado com o eletrodo B (CuZr).

Área de desgaste do eletrodo 23,0 mm²



Diâmetro médio do ponto de solda 5,3mm

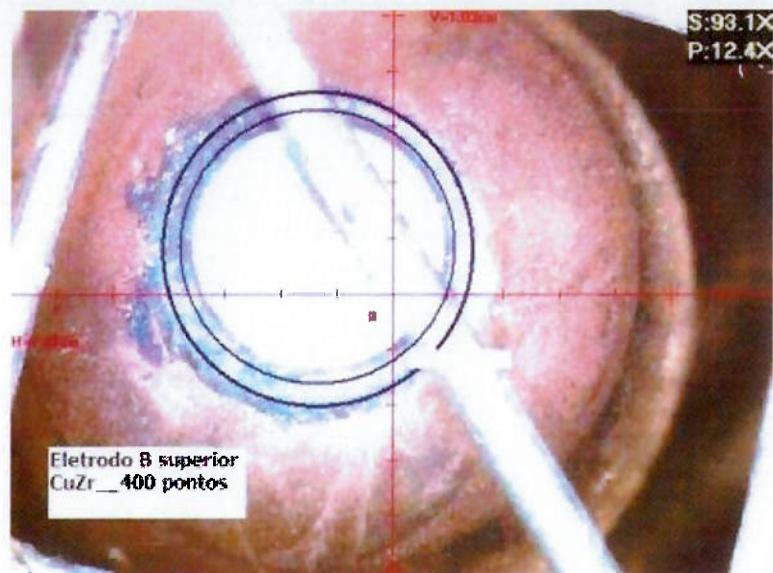


Macrografia do ponto



Figura 5.12 - Ponto de solda número 400 executado com o eletrodo A (CuAl₂O₃).

Área de desgaste do eletrodo $19,0 \text{ mm}^2$



Diâmetro médio do ponto de solda $4,0 \text{ mm}$



Macrografia do ponto

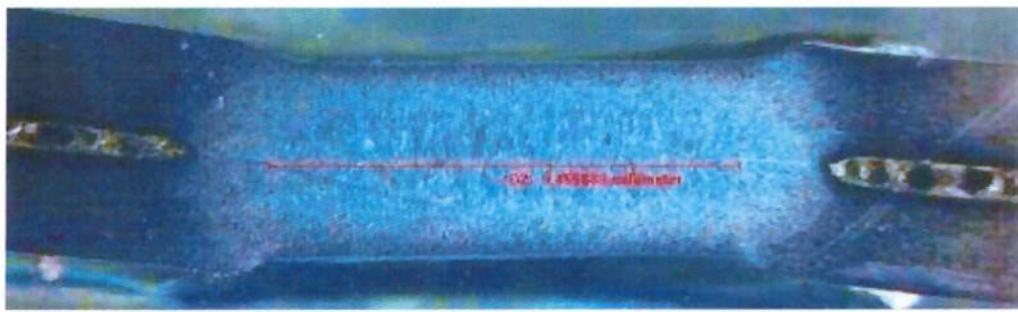


Figura 5.13 - Ponto de solda número 400 executado com o eletrodo B (CuZr).

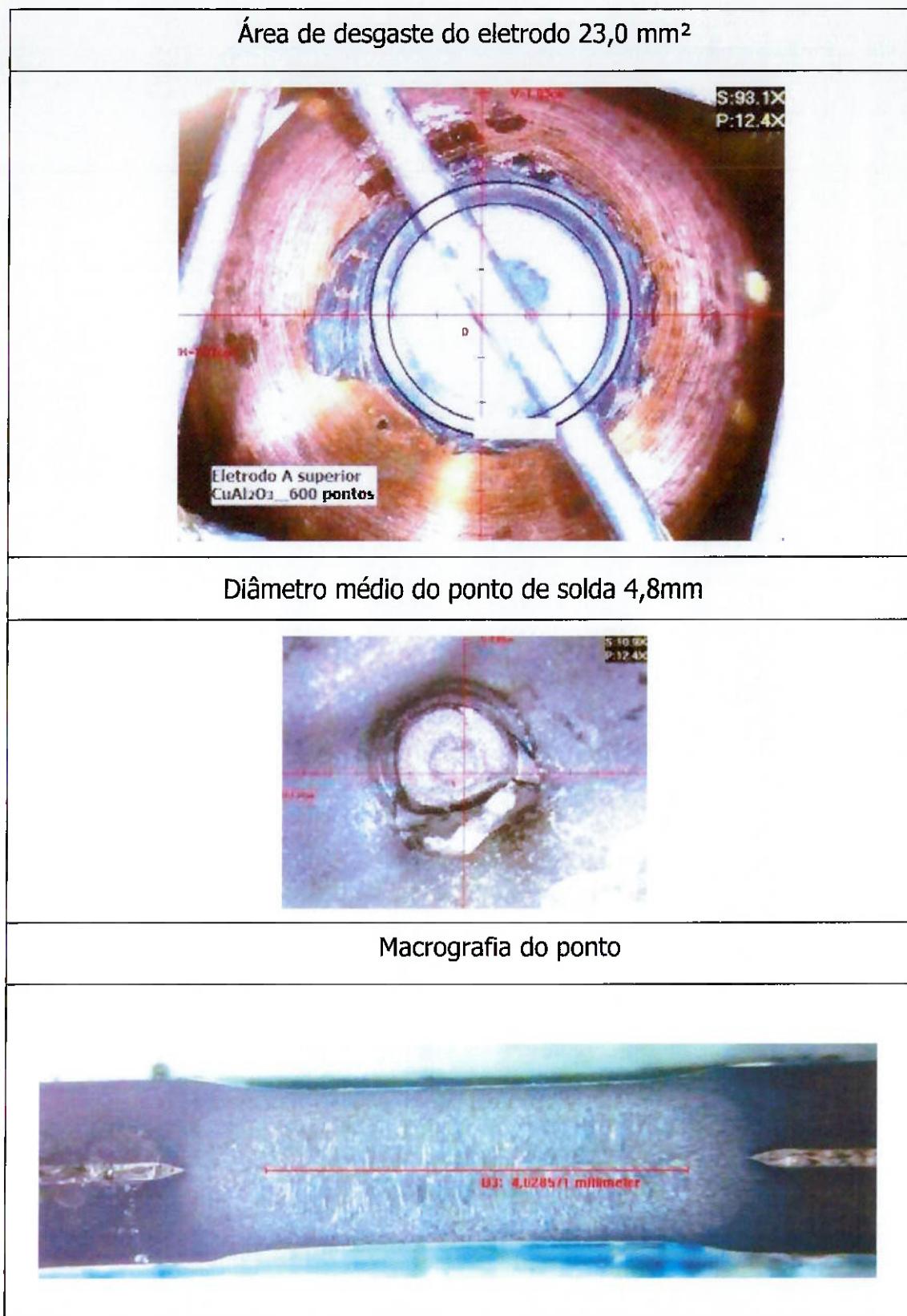


Figura 5.14 - Ponto de solda número 600 executado com o eletrodo A (CuAl₂O₃).

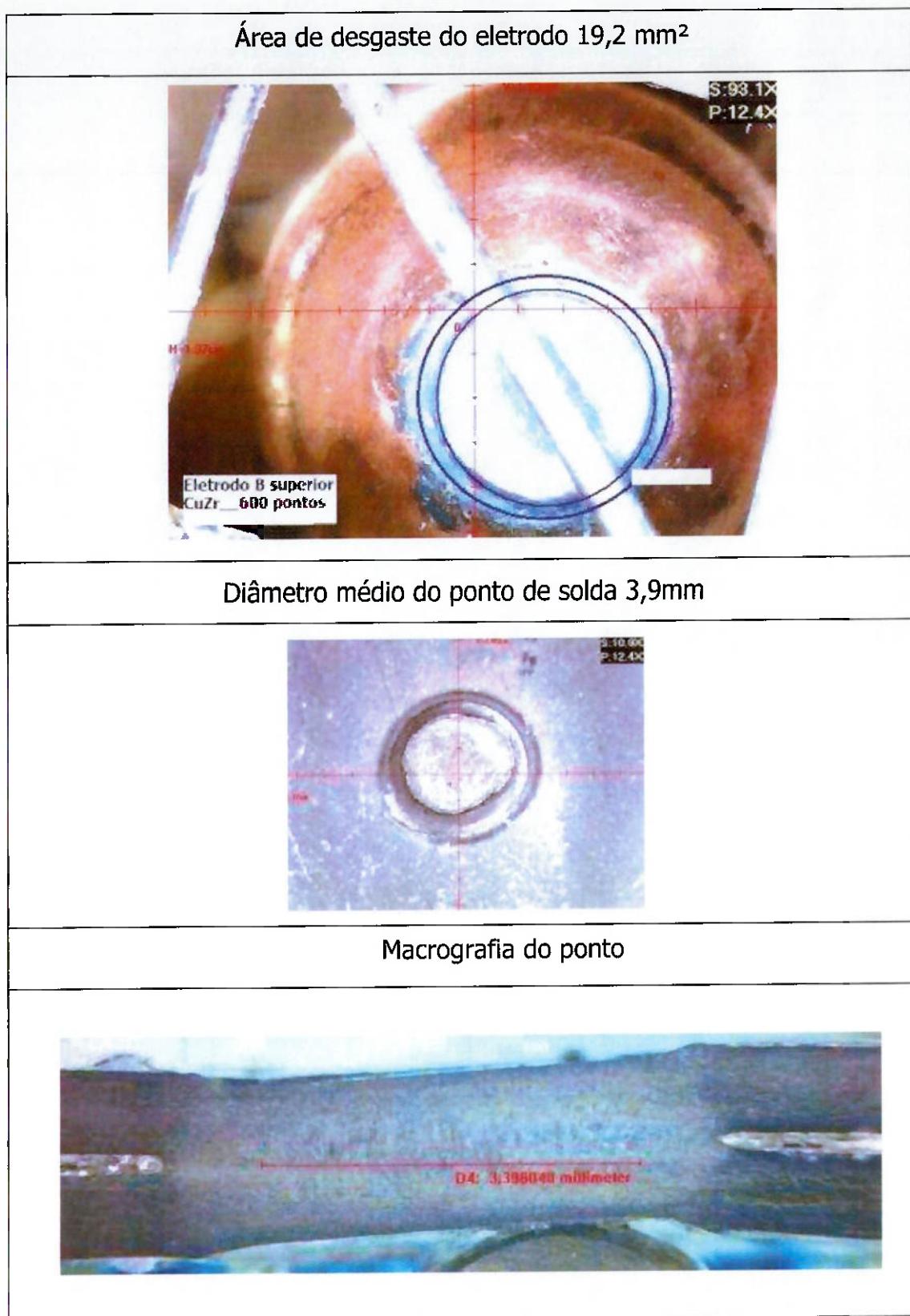


Figura 5.15 - Ponto de solda número 600 executado com o eletrodo B (CuZr).

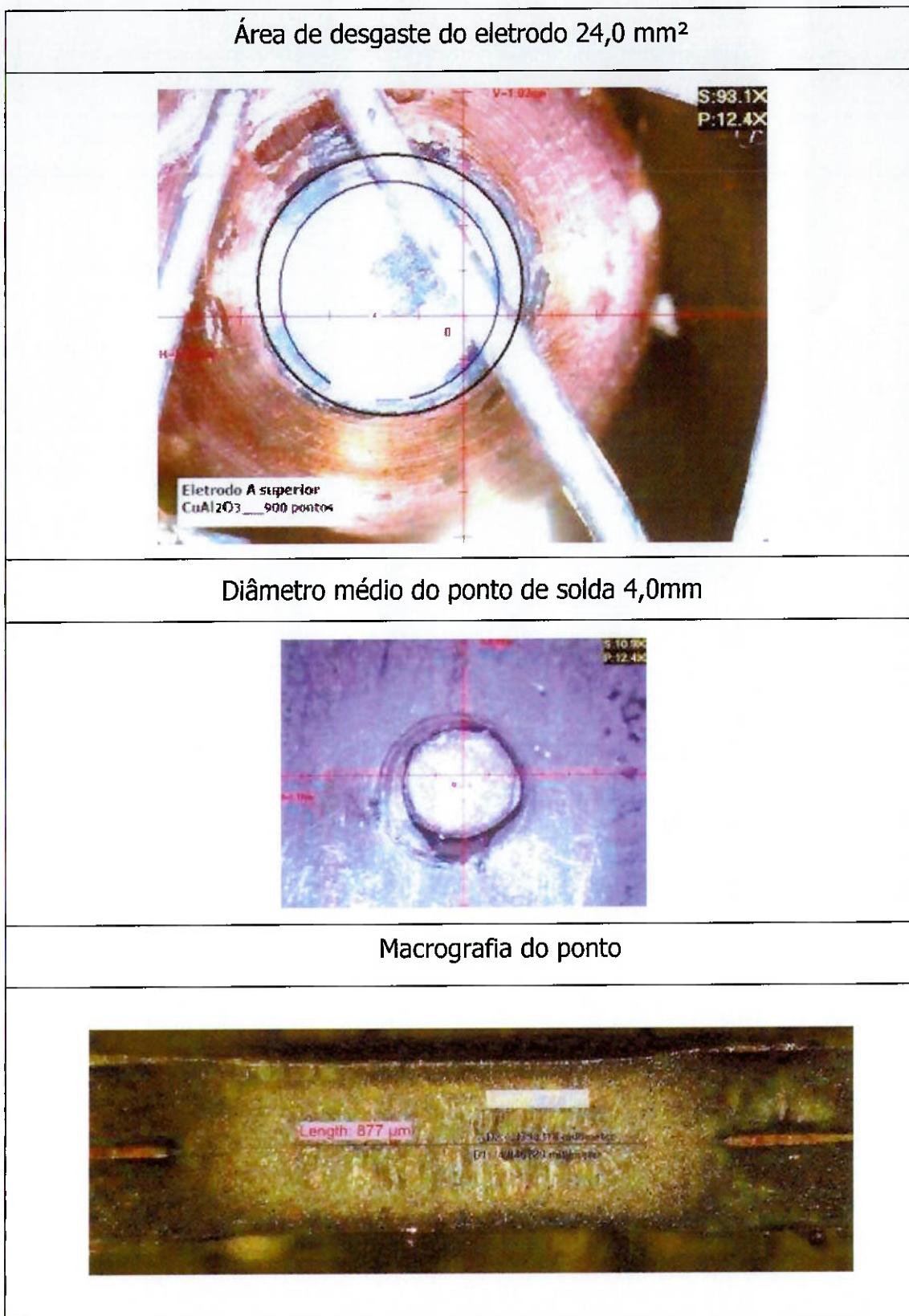


Figura 5.16 - Ponto de solda número 900 executado com o eletrodo A (CuAl₂O₃).

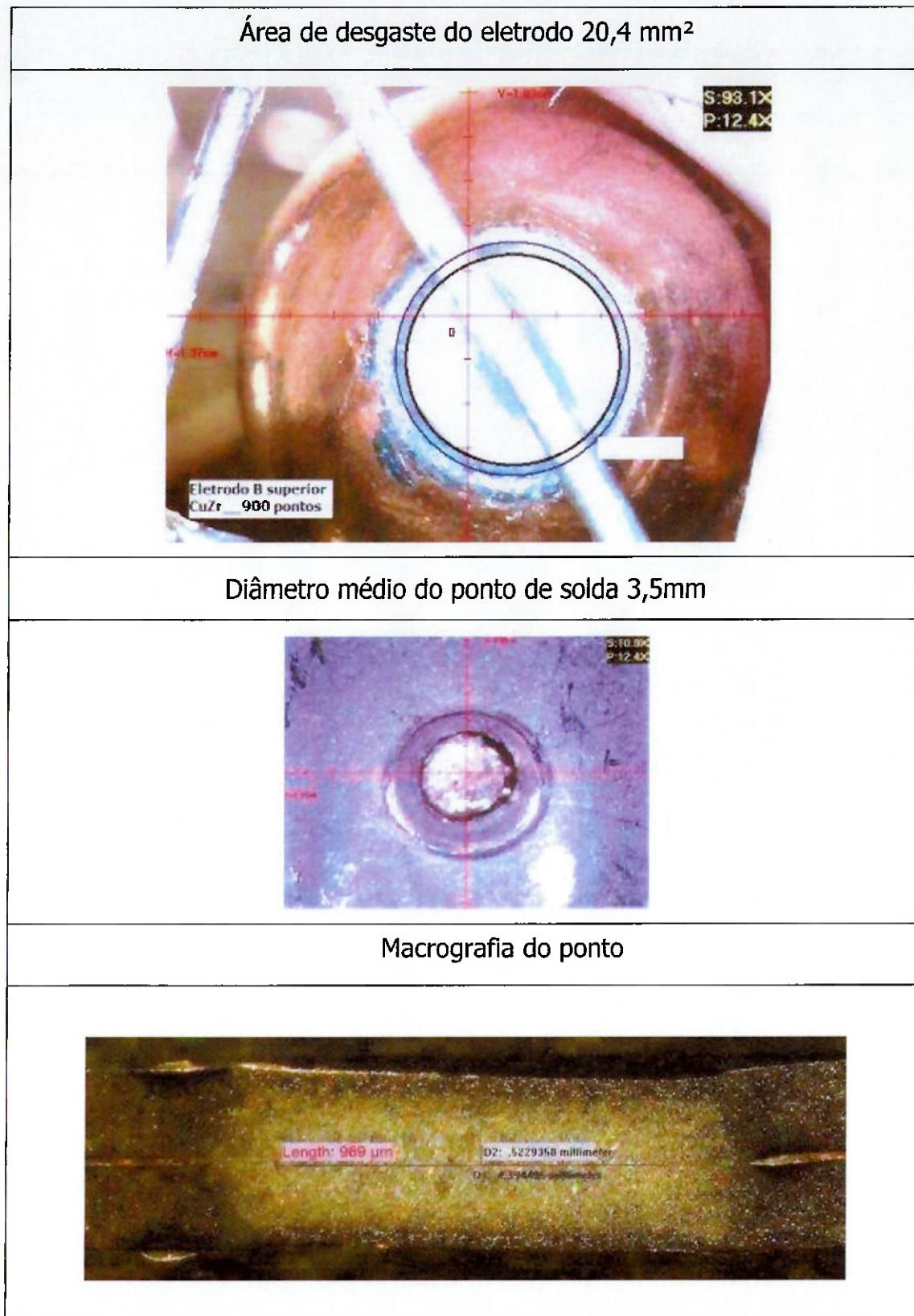


Figura 5.17- Ponto de solda número 900 executado com o eletrodo B (CuZr).

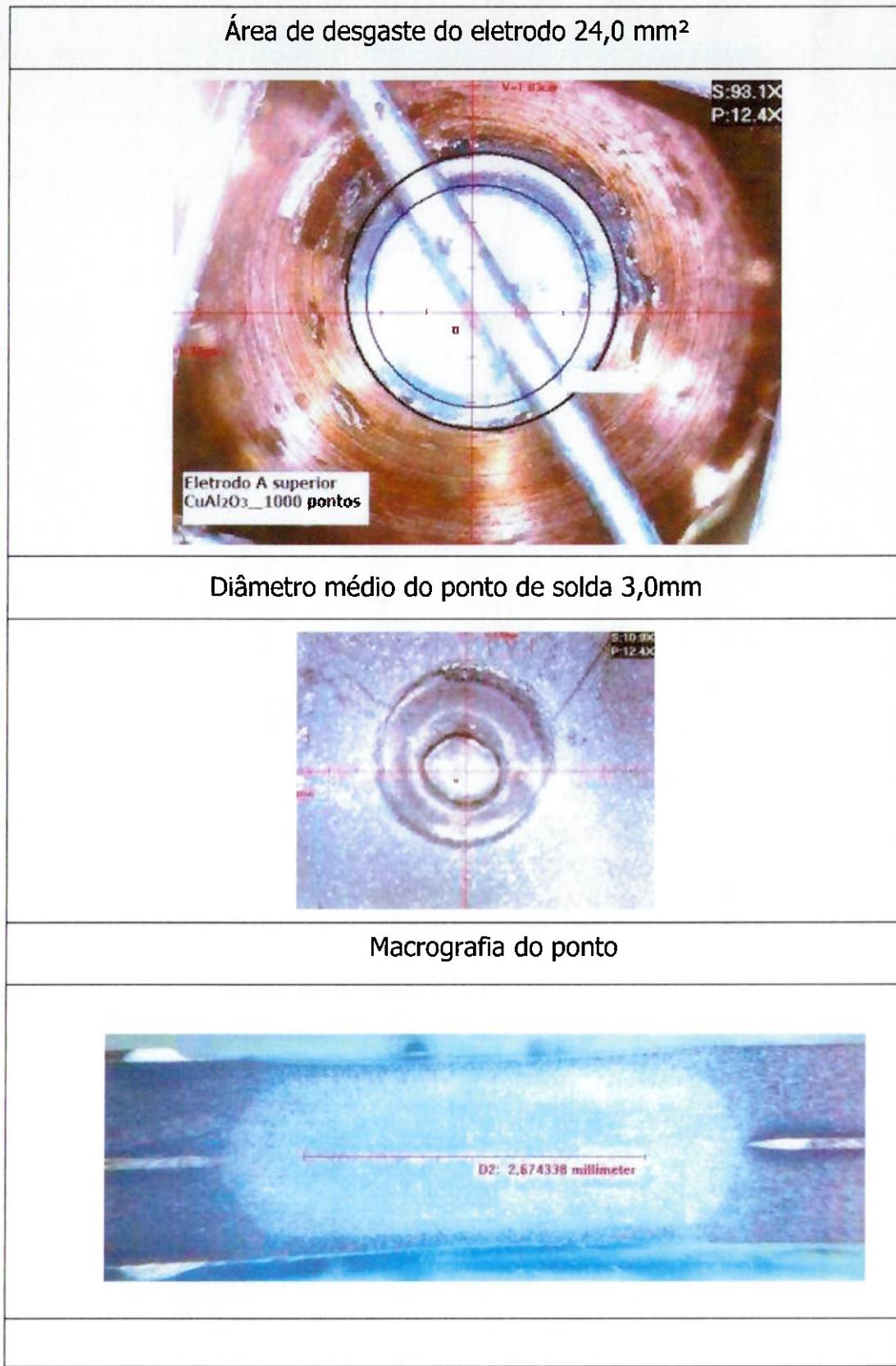
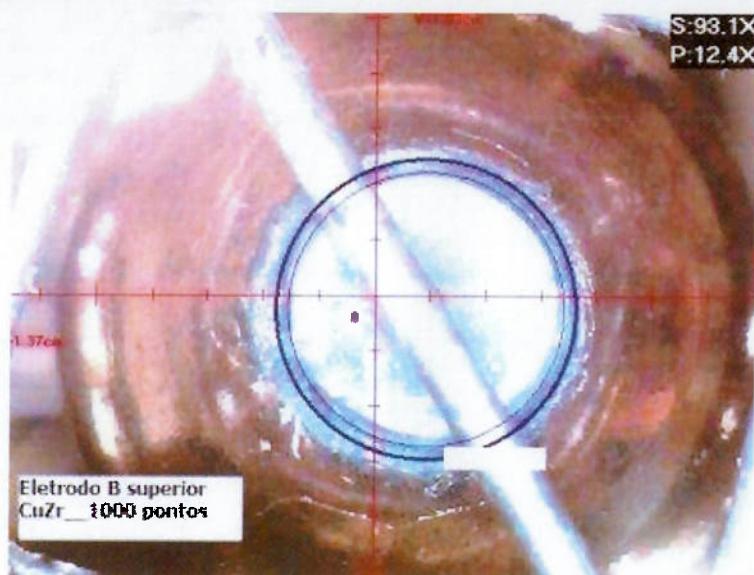
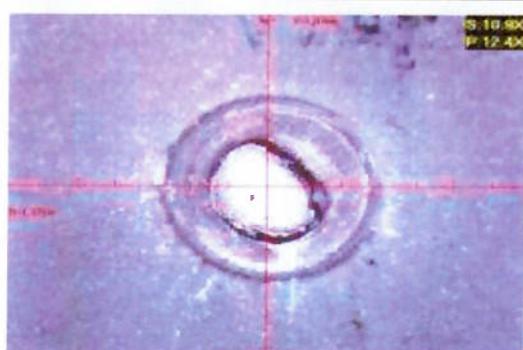


Figura 5.18 - Ponto de solda número 1000 executado com o eletrodo A (CuAl₂O₃)

Área de desgaste do eletrodo 21,0 mm²



Diâmetro médio do ponto de solda 3,4mm

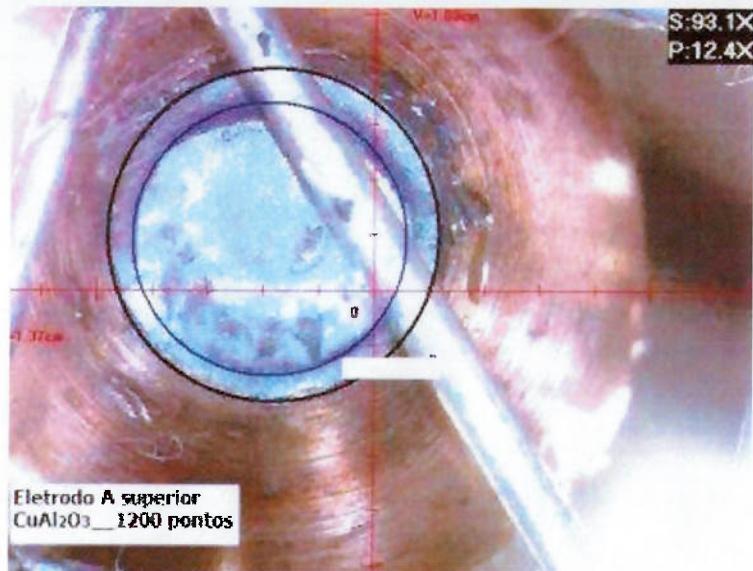


Macrografia do ponto

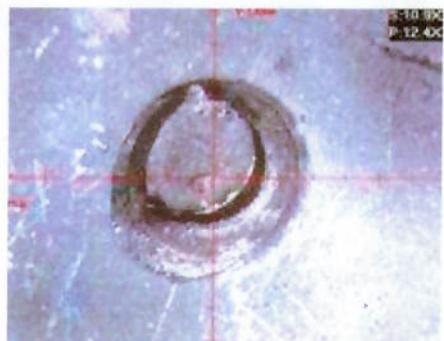


Figura 5.19 - Ponto de solda número 1000 executado com o eletrodo B (CuZr)

Área de desgaste do eletrodo 24,6 mm²



Diâmetro médio do ponto de solda 3,0mm



Macrografia do ponto

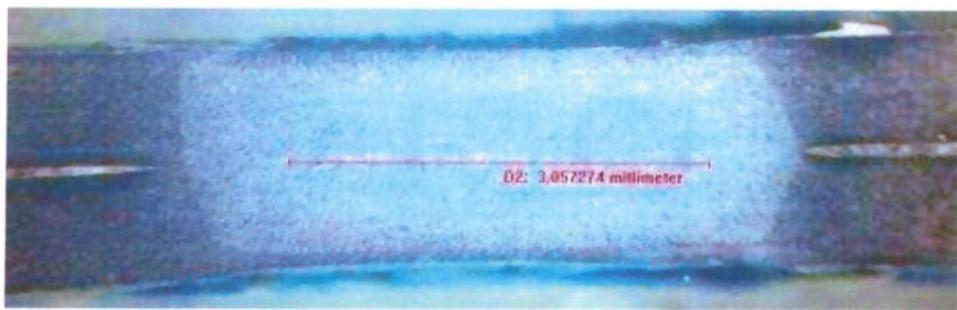
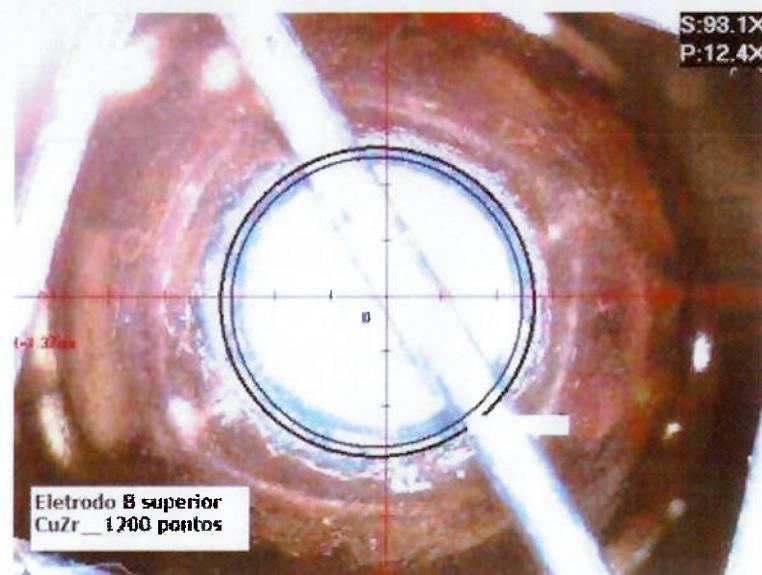
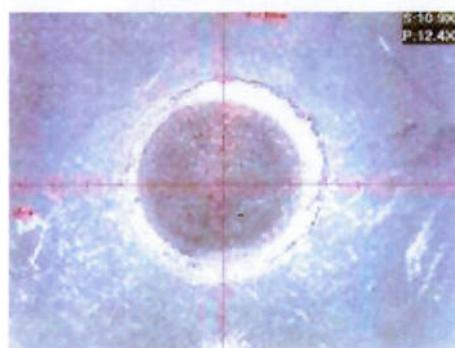


Figura 5.20 - Ponto de solda número 1200 executado com o eletrodo A (CuAl₂O₃).

Área de desgaste do eletrodo $21,9 \text{ mm}^2$



Diâmetro médio do ponto de solda (não houve fusão)



Macrografia do ponto



Figura 5.21 - Ponto de solda número 1200 executado com o eletrodo B (CuZr).

6. CONCLUSÕES:

Com base nos materiais utilizados, experimentos realizados e nos resultados obtidos, é possível concluir que:

1. As faces dos eletrodos (CuAl_2O_3) apresentaram maiores deformações se comparadas com as faces dos eletrodos (CuZr). Este resultado está relacionado à maior formação de latão devido a maior concentração de Zn encontrada na face do eletrodo A (CuAl_2O_3) se comparado ao eletrodo B (CuZr). Pode-se concluir que quanto maior a concentração de Zn na face do eletrodo maior será a deformação.
2. Os eletrodos A (CuAl_2O_3) apresentaram melhor desempenho se comparado aos eletrodos B (CuZr), apesar das maiores deformações apresentadas nos experimentos. Este resultado está relacionado com a maior indentação apresentada pelo eletrodo B (CuZr) até 300 pontos de solda. Este fato é devido que quanto maior a indentação maior será área de contato, e por este motivo haverá uma diminuição da densidade da corrente, que por sua vez, diminui a geração de calor na interface das chapas. Pode-se concluir que quanto maior a indentação menor será o diâmetro do ponto de solda.
3. A escolha do eletrodo com melhor desempenho depende principalmente do seu comportamento durante a soldagem.

SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS:

1. Fazer um estudo para saber por qual motivo da aderência do zinco no eletrodo CuAl₂O₃
2. Fazer o mesmo estudo em chapas zincadas com espessuras diferentes.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

1. BRANDI, S.D. Classificação dos processos de soldagem. In: WAINER, E. *et al.* Soldagem: Processo e Metalurgia. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 1992. p.217-242.
2. ZHANG, H; SENKARA, j. Resistance Welding: Fundamentals and Applications. 2.ed. Taylor & Francis Group, 2012. P.54-70
3. BRANCO, H.L.O. (2004) Avaliação de Capas de Eletrodos utilizadas na Soldagem por Resistência de Chapas Galvanizadas Automotivas. Dissertação de Mestrado, departamento de Engenharia Mecânica. Setor de Tecnologia e Universidade federal do Paraná, Curitiba, Brasil. p.20-104
4. VARGAS AURES, JOSE ENRIQUE (2006). Estudo da Formação, Geométrica e Resistência do Ponto na Soldagem por Resistência: Uma Abordagem Estatística. Dissertação de Mestrado em Sistema Mecatrônicos, Publicação: DM-05/2006, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF. P.13-20
5. MACHADO, I.G (1996) Soldagem & Técnicas Conexas: Processos. Porto Alegre, 477p.
6. WELDING SCIENCE. Manual de treinamento de soldagem por resistência. São Paulo, 2009. 82p.
7. BATISTA, MÁRCIO. Estudo Comparativo da Soldabilidade da Chapas para Indústria Automotiva Utilizando Dois Equipamentos de Soldagem a Ponto por Resistência. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2011. 194p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

8. STOCCO, DANILO. Caracterização de Solda por Resistência a Ponto através de avaliações não destrutivas. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2010.110p. Dissertação (Mestrado)
9. VOLKSWAGEN CAMINHÕES E ÔNIBUS. Soldagem a Ponto por Resistência. VW 01105-1
10. BRANDI, S.D.; BATISTA, M. Comparação entre dois equipamentos de soldagem a ponto por resistência utilizados na indústria automotiva. In: Congresso Nacional de Soldagem, 36º.2010, Recife – Associação Brasileira de Soldagem,2010.
11. VENCE GUERRA, LEANDRO CARDOSO. O comportamento da resistência dinâmica com relação à deformação do eletrodo na soldagem a ponto por resistência. Escola Politécnica da Universidade da São Paulo, 2012.61p. Especialização em Engenharia da Soldagem
12. RWMA- Resistance Welder Manufactures Association. Resistance Wending Manual. U.S.A., 4th ED.,Nov.,443p.
13. KEARNS, W.H. Wending Handbook: Resistance and Solid-State Welding and Other Joining Processes. Miami: American Welding Society; 1984
14. Prada Rossi, Gilvan. Estudo de correlação do comportamento de pontos de solda em corpos de prova pelo método dos elementos finitos. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2007. P.58-61