

MARCELO ZAMPIERI

**ESTUDO DA OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS NO PROCESSO DE
SOLDAGEM A PONTO POR RESISTÊNCIA EM CHAPAS DE AÇO
UTILIZADA NO SETOR AUTOMOTIVO.**

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

Fevereiro/2016

MARCELO ZAMPIERI

(Gestor de processos, UniABC, 2011)

**ESTUDO DA OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS NO PROCESSO DE
SOLDAGEM A PONTO POR RESISTÊNCIA EM CHAPAS DE AÇO
UTILIZADA NO SETOR AUTOMOTIVO.**

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. Marcio Batista

São Paulo

Fevereiro/2016

“Se você encontrar um caminho sem
obstáculos, ele provavelmente não leva a
lugar nenhum.” - **Frank Clark**

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a Deus, a minha mãe Maria Meneghini Olimpio e a minha esposa Maria de Fátima S. Zampieri.

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a DEUS por ter me concedido esta oportunidade;

Aos professores Dr. Sérgio Duarte Brandi e ao MSc Márcio Batista, meu orientador, pelas orientações, incentivo e ensinamento durante todo o desenvolvimento desta monografia;

A toda a minha família pelo apoio, compreensão e precioso tempo que passaram juntos no desenvolvimento deste trabalho;

Aos meus colegas de trabalho Marcello Santarosa “Gerente de operações industrial Metalúrgica Quasar”, Allison Bandeira, Gilvan Fontes Freire, José Claudemir, Martins “Laboratório”.

E a todos que, direta ou indiretamente, me ajudaram a concluir as etapas deste trabalho.

CURRICULUM VITAE

Marcelo Zampieri.

Resumo.

Desenvolvimento de carreira durante 27 anos em segmento de peças para indústria automobilística, atuando na área de gestor, coordenador de processo produtivos e auditor de sistema da qualidade.

Formação acadêmica.

Cursando Pós graduação em engenharia de soldagem. Escola Politécnica da USP (PECE). Início em Janeiro de 2014 e termino em Dezembro de 2015

Graduado em Gestão de processos industriais, UniAbc. Início em Janeiro de 2009 e término em Dezembro de 2011.

Experiência profissional.

Metalúrgica Quasar Ltda.

Cargo: Coordenador de soldagem.

Metalúrgica Polimetri Ltda.

Cargo: Líder de Estamparia.

Metalúrgica Megastamp Ltda.

Cargo: Encarregado de produção sênior.

Metalúrgica Jardim sistemas Ltda.

Cargo: Auditor de processos e líder de produção.

RESUMO

A soldagem por resistência ainda é o processo de soldagem mais utilizado nas indústrias automotivas, onde se requer alta produtividade e qualidade na estrutura soldada. Em uma carroceria de veículos tem em média, 5.000 pontos de solda, deixando uma grande margem de que ocorra descontinuidade no processo, sendo que as variáveis são muitas, como por exemplo: o tempo, a corrente e a força de soldagem, assim como, a geometria de contato do eletrodo. A escolha correta destas variáveis são relevantes para qualidade do ponto de solda. Portanto, este trabalho será voltado para o estudo da otimização dos parâmetros de soldagem, utilizando como variáveis: a geometria de contato do eletrodo/chapa, a corrente e tempo de soldagem, força entre os eletrodos, e a propriedade mecânica de tração do ponto de solda, em chapas de aço carbono sem revestimento e com espessura de 2,5 mm, utilizada na indústria automotiva. Os resultados mostraram que o eletrodo de face de contato esférico de diâmetro 4,6 mm apresentou melhor resultado, no que se refere à otimização dos parâmetros, devido a maior densidade de corrente e a maior pressão durante a soldagem, se comparado com o eletrodo de face plana de contato de 8 mm de diâmetro. Os resultados também mostraram que a escolha correta da face de contato entre eletrodo/chapa é fundamental para a otimização deste processo, no que se refere à economia de tempo de processo, energia elétrica (corrente) e custo de equipamento.

ABSTRACT

Resistance welding is still the most widely used welding process in the automotive industry, which requires high productivity and quality in the welded structure. A vehicle bodywork has around 5,000 spot welds, allowing the occurrence of discontinuity in the process due to the number of involved variables: the time, the current, welding strength, as well as the contact geometry of the electrode. The correct choice of these variables is relevant to spot weld quality. Therefore, this work aimed to study the optimization of welding parameters using the following variables: geometry contact of the electrode/plate, current and welding time, force between the electrodes and the mechanical properties of tensile of spot weld in carbon steel without coating, with thickness of 2.5 mm, used in the automotive industry. The results showed that face spherical contact electrode with diameter of 4.6 mm showed better results with regard to the optimization of the parameters because of the higher current density and higher pressure during welding, compared with the flat face contact electrode to 8mm diameter. The results also showed that the correct choice of face contact between electrode/plate is essential for the optimization of this process, as regards the economy process time, electrical power (current) and cost of equipment.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1: Método de soldagem por resistência inventado por E.Thomson em 1891 [5].	6
Figura 3.2: Principais tipos de soldagem por soldagem por resistência(adaptado) [8].	10
Figura 3.3: Ciclo de soldagem ou tempo de soldagem (adaptado) [10].	11
Figura 3.4: Ciclo de soldagem completo. (adaptado) [10].	12
Figura 3.5: Resistência elétrica da máquina. (Adaptado) [13].	13
Figura 3.6: Resistências elétricas nos eletrodos/chapa (adaptado) [14].	14
Figura 3.7: Distribuição de temperatura no ponto de solda [7].	15
Figura 3.8: Variação da resistência com a pressão dos eletrodos e as condições da superfície. (Adaptado) [15].	16
Figura 3.9: Variação da resistência com a pressão dos eletrodos e as condições da superfície com óxidos. (Adaptado) [16].	17
Figura 3.10: Seqüências dos principais estágios da resistência dinâmica no período da formação do ponto de solda (adaptado) [18].	18
Figura 3.11: Figura demonstrativa de pressão e força (adaptado) [20].	21
Figura 3.12: Representação esquemática das forças que atuam na região de soldagem a ponto por resistência [21].	22
Figura 3.13: Sistema de refrigeração do eletrodo [13].	24
Figura 3.14: Diagrama de soldabilidade ou janela operacional [25].	25
Figura 3.15: Modelos de eletrodos utilizado nas industrias automotiva [26].	27
Figura 3.16: Dimensões dos eletrodos utilizados nas industrias automotiva [27].	27
Figura 3.17: Exemplos de alinhamento e desalinhamento [11].	29
Figura 3.18: Exemplo ilustrativo de máquina de soldagem por resistência [20].	30
Figura 3.19: Máquinas de soldagem por resistência (Ponteadeira) [28].	31
Figura 3.20: Fresador para ajuste da ponta do eletrodo [28].	32
Figura 3.21: Ponto de solda desejável, resfriamento uniforme [14].	33
Figura 3.22: Ponto de solda indesejável com resfriamento rápido através dos eletrodos e metal de base [14].	34
Figura 3.23: Ponto de solda indesejável, resfriamento lento através do metal e dos eletrodos (Adaptado) [14].	35

Figura 3.24: Ensaio destrutivo. (Adaptado) [11].....	37
Figura 3.25: Profundidade de Indentação [11].	38
Figura 4.1: Máquina de solda por resistência estacionária,utilizada em experimentos.....	39
Figura 4.2: Eletrodos utilizados nos experimentos:eletrodo face esférica e eletrodo face plana ,respectivamente.....	40
Figura 4.4: Geometria e dimensões do eletrodo face plana de contato.	41
Figura 4.3: Geometria e dimensões do eletrodo de face esférica de contato.	41
Figura 4.5: Exemplo de corpo de prova e suas dimensões utilizadas nos experimentos.....	42
Figura 4.6: Relatório das propriedades mecânicas da bobina onde foi retirado o material para a fabricação dos corpos de prova.....	43
Figura 4.7: Composição química do corpo de prova realizado através de um espectrômetro.	44
Figura 4.8: Fresador de eletrodo utilizado nos experimentos para ajuste dos eletrodos.....	45
Figura 4.9: Laminas utilizadas no fresador para ajustar os eletrodos de face de contato esférico (4,6 mm) e eletrodos de face de contato plano (08 mm), respectivamente.....	46
Figura 4.10: Equipamento utilizado nos experimentos para a calibração e monitoramento da tensão, corrente elétrica e o tempo de soldagem.....	47
Figura 4.11: Paquímetro digital para medição dos diâmetros dos pontos de solda.	48
Figura 4.12: Equipamento utilizado nos ensaios de tração.	49
Figura 4.13: Exemplo de corpo de prova utilizado para os ensaios de tração.	50
Figura 4.14: Ensaio de tração do ponto de solda.....	50
Figura 4.15: Politriz para acabamento no ponto de solda utilizada nos ensaios.	51
Figura 4.16: Lixas para o acabamento da superfície do ponto de solda	51
Figura 4.17: Corpo de prova para ensaios de macrografia.	52
Figura 4.18: Exemplo de medição do ponto de solda, executado no experimento por ensaio de macrografia.....	52
Figura 4.19: Talhadeira, Morsa e Martelo para teste destrutivo.	53
Figura 4.20: Medição do ponto de solda realizado nos ensaios destrutivos [31].....	54

Figura 4.21: Determinação do valor médio do diâmetro do ponto de solda (DM) para os ensaios destrutivos [31].	55
Figura 4.22: Metodologia para a determinação de Janela Operacional [20].	57
Figura 4.23: Técnica de impressão de carbono para determinação do diâmetro de contato para o eletrodo de face esférica.	58
Figura 4.24: Dinamômetro digital utilizado nos experimentos para calibração e monitoramento das forças entre os eletrodos.	59
Figura 5.1: Exemplo do dimensionamento do ponto de solda, utilizando um paquímetro digital.	62
Figura 5.2: Eletrodo de face plana com diâmetro de contato de 08 mm utilizado nos ensaios com 500kgf e 1000 Kgf.	63
Figura 5.3: Dimensões da Amostra, diâmetro médio = $6,21 + 5,73 / 2 =$	64
Figura 5.4: Amostra do ensaio de arrancamento com falta de fusão da área soldada.	64
Figura 5.5: Expulsão de material líquido, devido a alta densidade de corrente causada por uma força insuficiente entre os eletrodos.	65
Figura 5.6: Eletrodo de face esférica com diâmetro de contato de 4,6 mm utilizado nos ensaios com 500kgf.	67
Figura 5.7: Gráfico gerado no de ensaio de tração, para o eletrodo de face plana com força constante 500kgf	70
Figura 5.8: Gráfico gerado no ensaio de tração, para o eletrodo de face plana com força constante 1000kgf.	71
Figura 5.9: Ensaio de tração de cisalhamento realizado nos experimentos.	72
Figura 5.10: Modos de falhas apresentado nos ensaios de tração: no material de base e no contorno do ponto, respectivamente.	73
Figura 5.11: Diagrama de soldabilidade para eletrodo de face plana (08mm) e força constante de 1000Kgf	76
Figura 5.12: Diagrama de soldabilidade para eletrodo de face esférica (4,6 mm) e força constante de 500 Kgf.	77
Figura 5.13: Primeiro ensaio: Dimensões (macrografia) e gráfico da resistência mecânica (ensaio de tração) do ponto de solda, respectivamente.	79
Figura 5.14: Segundo ensaio: Dimensões (macrografia) e gráfico da resistência mecânica (ensaio de tração) do ponto de solda, respectivamente.	80

Figura 5.15: Terceiro ensaio: Dimensões (macrografia) e gráfico da resistência mecânica (ensaio de tração) do ponto de solda, respectivamente.....	81
Figura 5.16: Primeiro ensaio: Dimensões (macrografia) e gráfico da resistência mecânica (ensaio de tração) do ponto de solda, respectivamente.....	83
Figura 5.17: Segundo ensaio: Dimensões (macrografia) e gráfico da resistência mecânica (ensaio de tração) do ponto de solda, respectivamente.....	84
Figura 5.18: Terceiro ensaio: Dimensões (macrografia) e gráfico da resistência mecânica (ensaio de tração) do ponto de solda, respectivamente.....	85
Figura 5.19: Gráfico da Densidade de corrente (A/mm^2) versus pressão (Kgf/mm^2), com relação ao eletrodo de face plana e o eletrodo de face esférica.	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Características de materiais de eletrodos [27].	28
Tabela 3.2: Tabela de auxílio de inspeção visual.	36
Tabela 4.1: Média dos resultados da composição química do material.	44
Tabela 4.2: Diâmetro mínimo do ponto de solda em relação à espessura da chapa, conforme norma [31].	55
Tabela 5.1: Experimentos com eletrodo face plana (08 mm) com força constante de 500 Kgf.	63
Tabela 5.2: Experimentos com eletrodo face plana (08 mm) com força constante entre eletrodos de 1000kgf.	66
Tabela 5.3: Experimentos com eletrodos de face esféricas com diâmetro de contato de 4,6mm e força constante entre eletrodos de 500kgf.	68
Tabela 5.4: Parâmetros de soldagem (corrente e tempo); diâmetro médio (DM); força de tração em kgf (eletrodo de face plana a força constante de 1000kgf).	74
Tabela 5.5: Parâmetros de soldagem (corrente e tempo); diâmetro médio (DM); força de tração em Kgf (eletrodo de face esférica e força constante de 500Kgf).	75
Tabela 5.6: Amostra com o parâmetro ideal, eletrodo face reta 08 mm e 1000 Kgf.	82
Tabela 5.7: Dimensões e a força de tração do ponto de solda para o eletrodo de face esférica com força de 500 Kgf.	86
Tabela 5.8: Médias das dimensões e da resistência mecânica entre o eletrodo de face plana e o de eletrodo de face esférica.	86

LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIATURAS

- AWS: American Welding Society.
LE: Limite de Escoamento.
LR: Limite de Resistência à Tração.
ZAC: Zona Afetada pelo Calor.
CC: Corrente continua.
RT: Resistencia total.
KA: Quilo Amperes.
ms: Milissegundos.
Mpa: Mega Pascal (N.mm²).
I: Corrente Ampères.
R.W.M.A: Resistance Welder Manufacture Association.
 σ_{esc} : Tensão de Escoamento (Kgf/mm²).

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA.....	ii
AGRADECIMENTOS.....	iii
CURRICULUM VITAE.....	iv
RESUMO.....	v
ABSTRACT.....	vi
LISTA DE FIGURAS.....	vii
LISTA DE TABELAS.....	xi
LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIATURAS.....	xii
SUMÁRIO.....	xiii
1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA.....	1
2. OBJETIVO.....	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
3.1 História da soldagem por resistência.....	4
3.1.1 A lei de ohm.....	7
3.2 Conceitos e os principais tipos de soldagem por resistência.....	8
3.2.1 Soldagem a ponto por resistência.....	10
3.2.2 Ciclo de soldagem (tempo de solda).....	11
3.3 Fundamentos do processo de soldagem por resistência.....	12
3.3.1 Resistência elétrica no ponto de solda.....	12
3.3.2 Distribuição de temperatura no ponto de solda.....	14
3.3.3 Resistência elétrica de contato.....	16
3.3.4 Resistência dinâmica de contato.....	17
3.4 Principais parâmetros de soldagem.....	19
3.4.1 Pré-pressão.....	19
3.4.2 Tempo de solda.....	19
3.4.3 Pós-pressão.....	20
3.4.4 Tempo de pausa.....	20
3.4.5 Corrente.....	20
3.4.6 Pressão e força nos eletrodos.....	20
3.5 Refrigeração dos eletrodos.....	23
3.6 Diagramas de soldabilidade ou janela operacional.....	25
3.7 Eletrodos utilizados na soldagem a ponto.....	25
3.7.1 Geometria dos eletrodos.....	26
3.7.2 Características dos eletrodos.....	28
3.7.3 Alinhamento dos eletrodos.....	29
3.8 Equipamentos de soldagem a ponto por resistência.....	30
3.8.1 Transformadores primários e secundários.....	30
3.8.2 Máquinas de soldagem a ponto.....	31
3.8.3 Dressador ou Fresador.....	32
3.9 Aços carbono.....	32
3.9.1 Metalurgia de soldagem a ponto por resistência.....	33
3.10 Análises de qualidade da solda.....	35
3.10.1 Inspeção visual.....	35
3.10.2 Ensaio não destrutivo.....	37
3.10.3 Ensaio destrutivo.....	37

3.11 Indentação.....	37
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	39
4.1 Máquinas Ponteadeira.....	39
4.2 Eletrodos utilizados nos experimentos.....	40
4.2.1 Características do eletrodo.....	40
4.2.2 Geometria e dimensões dos eletrodos:.....	40
4.3 Características dos corpos de provas utilizados nos experimentos.....	41
4.4 Equipamentos de ajuste, calibração e monitoramento utilizados nos experimentos.....	45
4.4.1 Fresador ou Dressador.....	45
4.4.2 Laminas para Fresador ou Dressador utilizadas nos experimentos.....	45
4.4.3 Equipamento de calibração e monitoramento da corrente, tensão e tempo de soldagem utilizados nos experimentos.....	46
4.4.4 Paquímetro Digital.....	47
4.4.5 Equipamento para os ensaios de tração.....	48
4.4.6 Corpo de prova para ensaio de tração e cisalhamento.....	50
4.5 Ensaios em laboratórios.....	51
4.5.1 Equipamento para acabamento na superfície do ponto de solda.....	51
4.5.2. Corpo de prova.....	51
4.6 Ensaios Destrutivos.....	53
4.6.1 Determinação do diâmetro mínimo do ponto de solda para os ensaios destrutivos.....	53
4.7 Determinação da dimensão da profundidade de indentação do ponto de solda.....	56
4.8 Determinação do diagrama de soldabilidade ou janela operacional.....	56
4.9 Determinação da força aplicada entre os eletrodos.....	57
4.9.1 Determinação da área de contato do eletrodo de face esférica (raio de 10 mm).....	58
4.10 Equipamento para monitorar as forças de soldagem durante os experimentos.....	59
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	60
5.1 Determinação da força aplicada entre os eletrodos com face plana de contato e com face esférica de contato.....	60
5.1.1 Cálculo da força aplicada entre os eletrodos com face plana de contato (diâmetro de 8 mm).....	60
5.1.2 Cálculo da força aplicada entre os eletrodos com face esférica de contato:.....	61
5.2 Diagrama de soldabilidade para determinação dos parâmetros otimizados de soldagem (ponto ótimo):.....	61
5.2.1 Determinação dos diâmetros dos pontos de solda.....	62
5.2.2 Ensaios com eletrodo de face reta com forças constantes de 500 kgf e 1000 Kgf.....	62
5.2.3 Ensaios com eletrodo de face plana com força constante entre os eletrodos de 1000kgf.....	65
5.2.4 Ensaio realizado com eletrodo face esférica e com força constate entre os eletrodos de 500kgf.....	67
5.2.5 Ensaios de tração.....	69

5.2.6 Diagrama de soldabilidade para determinação dos parâmetros otimizados de soldagem (ponto ótimo), utilizando eletrodo de face plana (08mm) e força constante de 1000Kgf.	76
5.2.7 Diagrama de soldabilidade para determinação dos parâmetros otimizados de soldagem, utilizando eletrodo de face esférica (4,6 mm) e força constante de 500Kgf.	77
5.3 Comparação das dimensões (macrografia) e resistência mecânica (ensaio de tração), utilizando os parâmetros otimizados de soldagem (ponto ótimo) entre o eletrodo de face plana e o eletrodo de face esférica.	78
5.3.1 Dimensões (macrografia) e resistência mecânica (ensaio de tração), utilizando os parâmetros otimizados de soldagem (ponto ótimo) para eletrodo de face plana (08 mm) com força constante de 1000Kgf.	78
5.3.2 Dimensões (macrografia) e resistência mecânica (ensaio de tração), utilizando os parâmetros otimizados de soldagem (ponto ótimo) para eletrodo de face esférica (4,6 mm) com força constante de 500Kgf.	82
5.3.3 Comparação dos resultados das médias das dimensões e da resistência mecânica do ponto de solda, entre o eletrodo de face plana e o de eletrodo de face esférica.	86
5.3.4 Análise da correlação entre a pressão versus densidade de corrente de soldagem, entre o eletrodo de face plana e o de eletrodo de face esférica.	87
6. CONCLUSÕES.	91
7. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.	92
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:	93

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA.

Desde os primórdios, o homem da pré-história executava atividades de produção, quando polia a pedra com objetivo de transformar em um utensílio mais eficaz, esse tipo de utensílio era para quem produzia, não existia o comércio. A produção passou por vários momentos de transição, mudando para a forma artesanal, e em 1764 com a descoberta da máquina a vapor por James watt, inicia a substituição da força humana pela força da máquina, "revolução industrial", em meados de 1790 os primeiros conceitos de padronização de componentes e o projeto do produto com Eli Whitney, e no fim do século xix, foi criado o conceito de produtividade com o pai a administração científica Frederick W. Taylor. Por volta de 1910, Henry Ford, surge com a produção em série, conceituando a produção em massa, com baixa variação nos tipos de produto extremamente padronizado, surge à necessidade de melhoria da produtividade por meios de técnicas com a engenharia industrial. A predominância da produção em massa foi até 1960 quando novo conceito de produção o "toyotismo", conhecido como produção enxuta começa a ser introduzida nas fábricas [1]. Nas últimas décadas, em função da competitividade do setor, as indústrias automotivas vêm passando por grande reestruturação, principalmente na área de manufatura, onde são exigidas desta área grande flexibilidade, capacidade de mudança e cada vez mais aumento de produtividade para suprir o mercado interno e as exportações. O processo de soldagem a ponto por resistência elétrica vem sendo utilizado na indústria automobilística há varias décadas, sendo atualmente o processo mais aplicado, na união dos variados tipos de conjuntos de peças em chapas de aço, que compõem a carroceria de um veículo. Com a busca incansável pela melhoria e a competitividade, entende-se a necessidade da otimização de tempos de processo, economia de energia elétrica e menores custos dos meios de produção. Portanto, o presente trabalho será voltado para o estudo da otimização dos parâmetros no processo de soldagem a ponto por resistência em chapas de aço carbono de 2,5 mm utilizada no setor automotivo. As variáveis estudadas foram: a geometria de contato do eletrodo/chapa, a corrente e tempo de soldagem, força entre os eletrodos e a propriedade mecânica de tração do ponto de solda, a fim de compreender os

fenômenos que ocorrem durante a soldagem, mas também o atendimento aos requisitos mínimos de norma para a qualificação de um procedimento de soldagem.

2. OBJETIVO.

O objetivo deste trabalho é estudar a otimização dos parâmetros para o processo de soldagem a ponto por resistência: tempo, corrente elétrica, força e a geometria de contato do eletrodo, em chapas de aço carbono sem revestimento com espessura de 2,5 mm utilizadas na indústria automotiva.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.

3.1 História da soldagem por resistência.

Atribui-se o nome de soldagem toda a realização contínua ou método utilizado para união de materiais entre duas partes metálicas, usando uma fonte de calor com ou sem aplicação de pressão, e a solda como efeito desta ação [2].

Os métodos de soldagem tiveram seu momento de estímulo durante a segunda Guerra Mundial, tendo foco em processos de navios e aviões soldados [2].

A autoria pela descoberta do princípio da solda por resistência elétrica geralmente é dada a James Prescott Joule (1818-1889). Em 1856 Joule com fios aquecidos pela passagem da corrente forçou juntamente com pressão para completar a solda [3].

A temperatura produzida pela passagem de corrente através da peça de trabalho a ser soldada são mais alta no ponto de contato entre as peças, obviando assim a necessidade de aquecimento estendido ao longo de toda a sua espessura. Esta característica promove a rápida produção de soldas de alta qualidade [3].

Dentre os princípios de funcionamento da soldagem por resistência, a energia térmica total gerada no decorrer das etapas do processo de soldagem pode ser calculada pela lei de Joule de acordo com a equação 1 [4].

$$Q = k \int_0^t R(t) \cdot I^2 \cdot dt \quad (1)$$

Onde:

k = 1/4, 185 J

I = Corrente de soldagem (A)

R= Conjunto de resistência elétrica Ohms (Ω)

t=Intervalo de tempo de passagem da corrente em segundos

Q= Calor gerado (cal).

Porém em 1877, depois de duas décadas, o processo de soldagem por resistência foi inventado por um inglês, Elihu Thonsom (1853-1937), nos EUA e Thonsom ficou conhecido como pai da soldagem por resistência, por volta de 1886 publicou sua primeira patente seguido de outras 150 [5].

A figura 3.1 uma das patentes de Thomson, demonstra os métodos de soldagem por resistência elétrica, com uma pressão mecanizada, como mostrada em desenho feito em 1891 [5].

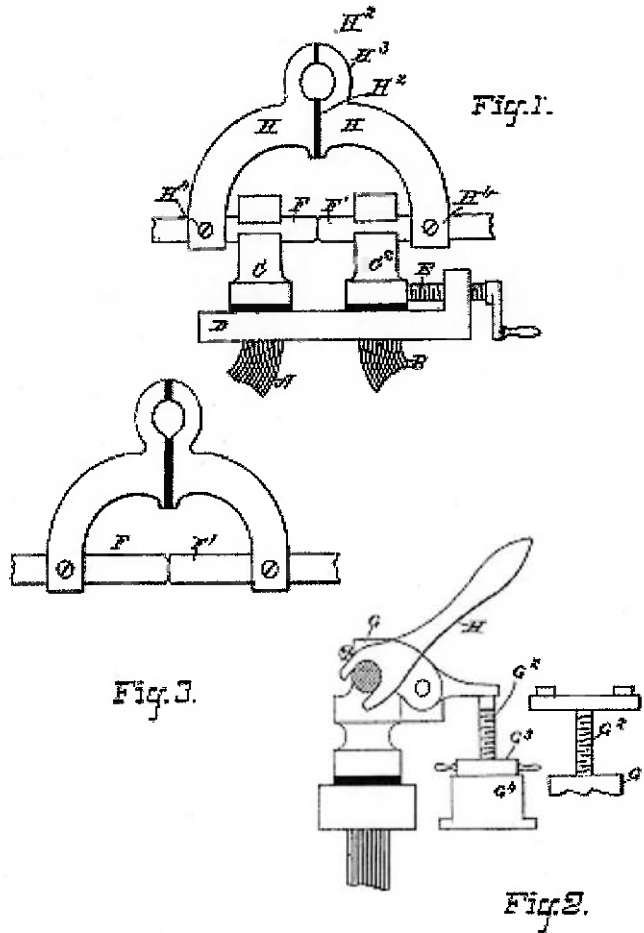
(No Model.)

4 Sheets—Sheet 1.

E. THOMSON.
METHOD OF ELECTRIC WELDING.

No. 451,345.

Patented Apr. 28, 1891.



ATTEST:
J. Hurdle
J. H. Hurdle

INVENTOR:
E. Thomson
By H. C. Townsend
Attorney

THE GREAT BRITAIN PATENT OFFICE, LONDON, E.C. 4.

Figura 3.1: Método de soldagem por resistência inventado por E.Thomson em 1891 [5].

3.1.1 A lei de ohm.

A lei de Ohm também está relacionada diretamente com a lei de Joule, a lei de Ohm ajuda a explicar o funcionamento da soldagem por resistência, sendo uma homenagem ao seu formulador o físico alemão Geog Simon Ohm, está formula afirma que para um condutor mantido em uma temperatura constante, a razão entre a tensão entre dois pontos e a corrente elétrica é constante, essa constante fica denominada de corrente elétrica [6].

A resistência de um condutor é dada pela formula 2:

$$R = \frac{V}{I} \quad (2)$$

Onde:

R= diferença de potencial elétrica (ou tensão) medida em volts.

I= intensidade de corrente elétrica (A).

V= resistência elétrica medida em Ohm (Ω)

A segunda lei de Ohm também tem ralação com a soldagem por resistência, está lei diz que a resistência de um condutor homogêneo e de seção transversal constante é proporcional ao seu comprimento, e inversamente proporcional à sua área transversal, dependendo da temperatura e do material de que é feito o condutor [6].

As resistividades de alguns materiais estão relacionadas partindo de um diferencial de potencial, sendo relacionados em condutores e isolantes. Os materiais condutores são determinados pela fraca ligação dos elétrons ao núcleo do átomo, proporciona um fluxo de elétrons ordenado. Os materiais isolantes são inversamente aos matérias condutores, pois tem uma forte ligação entre os elétrons e o núcleo do átomo, dificultando a passagens dos elétrons [6].

Esta lei da física descoberta por Georg, conhecida como a 2º lei de Ohm, é determinada pela equação 3 [6].

$$R= P \frac{l}{s} \quad (3)$$

Onde:

R= Resistência elétrica do condutor.

P= Resistividade do material.

l = Comprimento.

S= Seção transversal.

3.2 Conceitos e os principais tipos de soldagem por resistência.

Solda por resistência é um grupo de processos de soldagem em que a união é realizada pelo calor obtido a partir da resistência do trabalho para o fluxo de corrente elétrica, num circuito de que o trabalho é uma parte, e por a aplicação de pressão. Não há nenhuma fonte externa de calor, o calor é desenvolvido na peça a ser soldada, e a pressão é aplicada por uma máquina de soldar por meio dos eletrodos, não são usados fluxos ou metais de enchimento no processo. Portanto, se as propriedades metalúrgicas, química particular ou se desejado na soldagem, os elementos que conferem estas propriedades deve ser incluído na parte de trabalho ou ser um resultado direto da própria operação de soldagem.

A corrente para a soldagem resistência é normalmente fornecido através de um transformador de solda que transforma a alta tensão, baixa fonte de alimentação, amperagem, para amperagens elevadas utilizáveis em tensões baixas.

Pressão, ou mais corretamente, a força de eletrodo é fornecido quer por pressão de ar ou a pressão do óleo através de cilindros mecânicos, o acionamento é feito manualmente, pelo pé ou da mão, por alavancas através de ligações ou outros meios.

A corrente de soldagem para produzir uma solda é aproximadamente inversamente proporcional à raiz quadrada do tempo. No entanto, se o tempo é extremamente curto, a corrente necessária é anormalmente alta, com esta combinação de alta corrente e baixo tempo de solda, pode haver uma distribuição de

calor indesejáveis na zona de soldadura, resultando na fusão de superfície e grave deterioração rápida do eletrodo [7].

Solda por resistência pode ser classificado nos seguintes processos:

- Soldagem a Ponto (Resistance Spot Welding- RSW).
- Soldagem por costura (Resistance Seam Welding-RSEW).
- Soldagem por Projeção (Projection Welding-(RPW).
- Soldagem topo a topo (Upset Welding-UW).
- Soldagem por centelhamento (Flash Welding-FW).

Como se pode visualizar alguns métodos de soldagem por resistência na figura 3.2 [4].

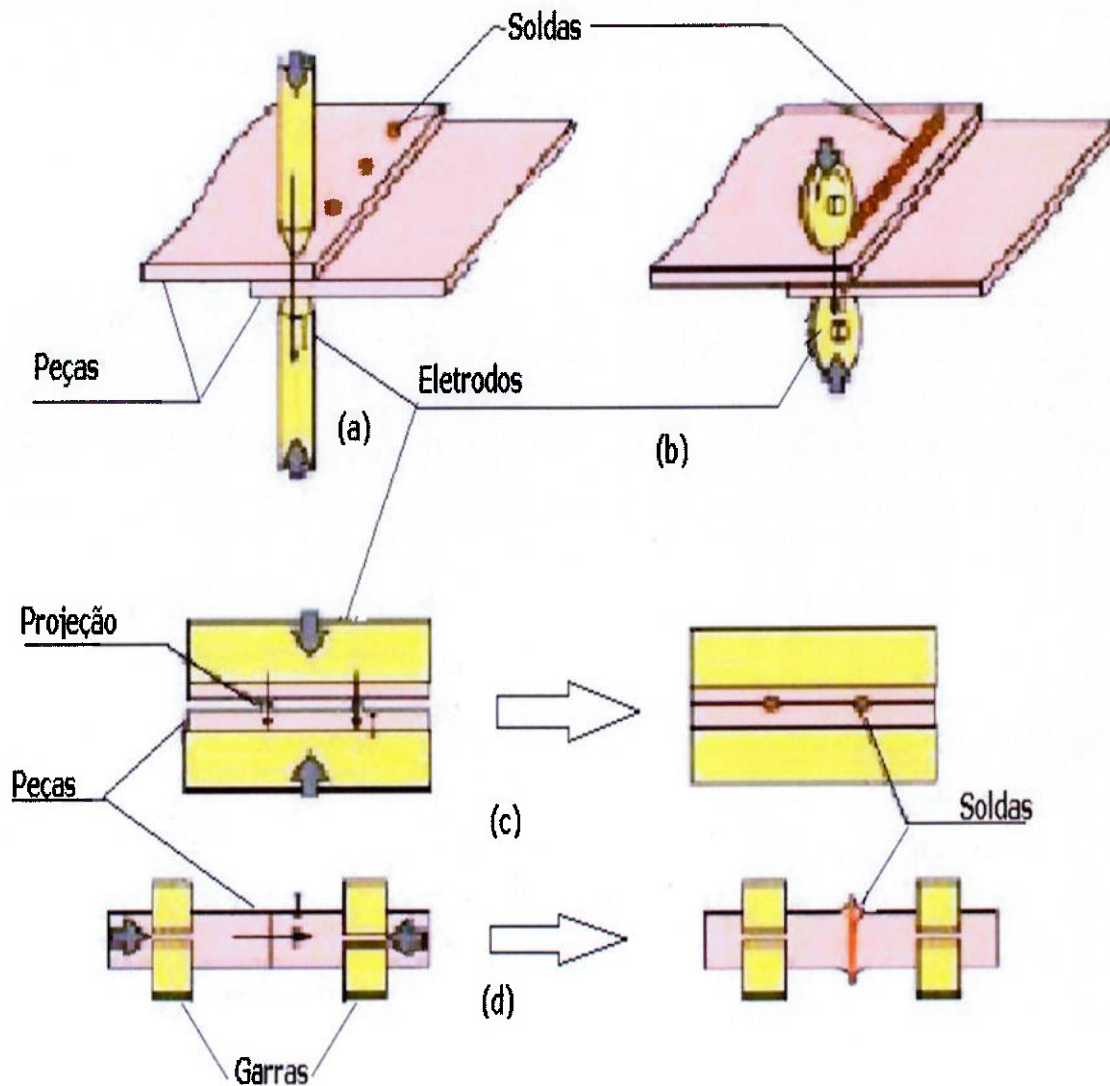


Figura 3.2: Principais tipos de soldagem por soldagem por resistência(adaptado) [8].

3.2.1 Soldagem a ponto por resistência.

No processo de soldagem a ponto por resistência as chapas sofrem uma pressão de eletrodos passando uma corrente de alta intensidade que fornece um calor até o material passar do estado sólido para o líquido e resfriamento, formando a união dos materiais [9].

3.2.2 Ciclo de soldagem (tempo de solda).

O ciclo de soldagem é caracterizado pelo tempo em que a corrente elétrica passa em um determinado ciclo de solda. O tempo de solda é conhecido em ciclos e no Brasil a frequência de corrente alternada em sua grande maioria é de 60 HZ, ou seja, $1s/60$ ciclos igual a $0,01667s$ ou $16,67ms$, como mostrado na figuras 3.3 [10].

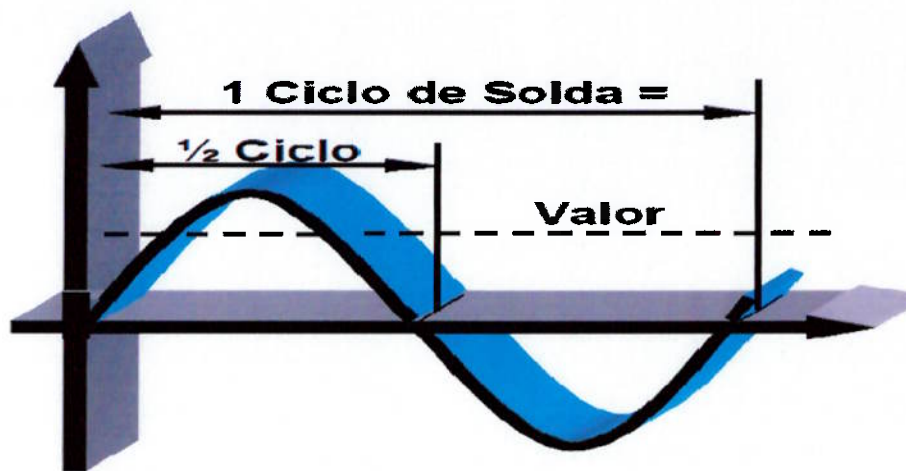


Figura 3.3: Ciclo de soldagem ou tempo de soldagem (adaptado) [10].

O ciclo de soldagem completo é a somatória de todos os tempos utilizados, sendo o tempo de pré-pressão, tempo de pré-aquecimento, tempo do aumento gradual de corrente, tempo de resfriamento, tempo de queda de corrente, tempo de tempera, tempo de revenido e tempo de pausa, como mostra a figura 3.4[10].

O ciclo de soldagem completo.

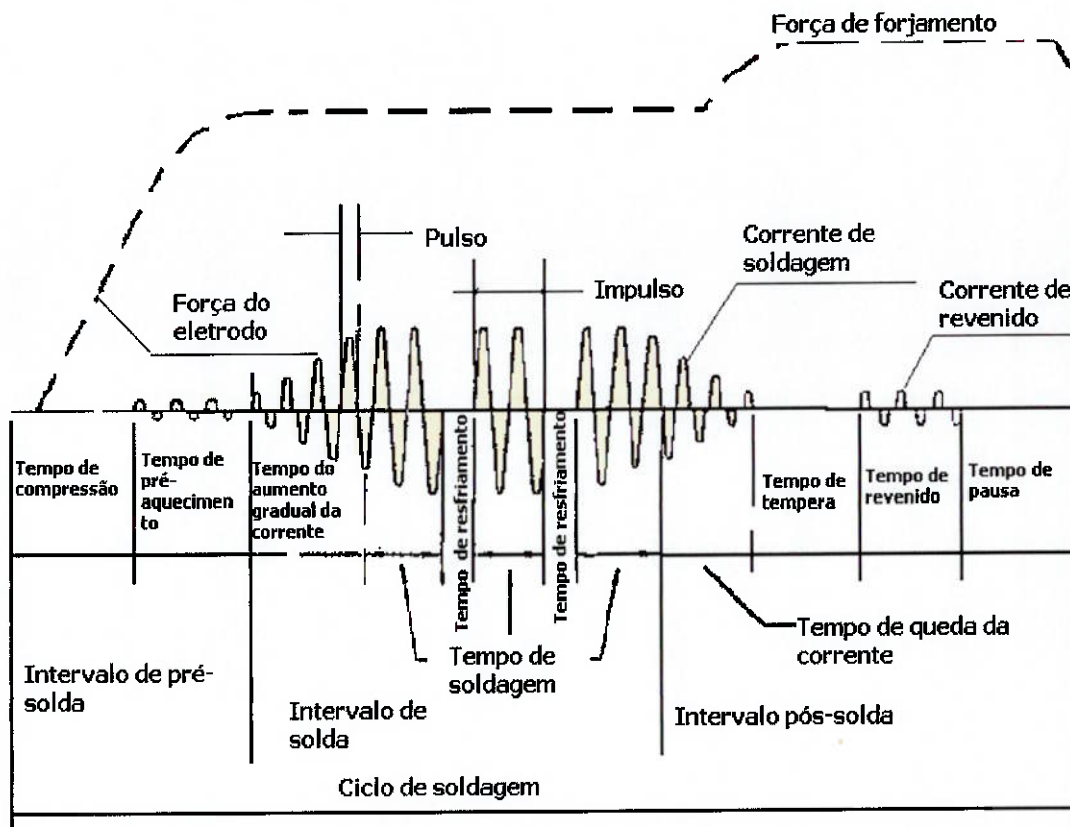


Figura 3.4: Ciclo de soldagem completo. (adaptado) [10].

3.3 Fundamentos do processo de soldagem por resistência.

A base de este processo dar-se a dois contatos elétricos em eletrodos, ligados a uma fonte de tensão elétrica, a área de contato forma uma resistência elétrica que com a passagem da corrente gera calor, alterando a temperatura dos materiais que alcançam o ponto de fusão [11]. O calor gerado deve ser o necessário para a área a ser soldada atinja o estado plástico, instante antes de fundir, para que a pressão possa fazer a solda dos metais [12].

3.3.1 Resistência elétrica no ponto de solda.

Como se pode observar verificar na figura 3.5 existe várias resistências encontradas em todo o circuito secundário da máquina de soldagem todos são

relevantes para a soldagem, sendo a maior resistência na interface do material em seguida entre eletrodos [13].

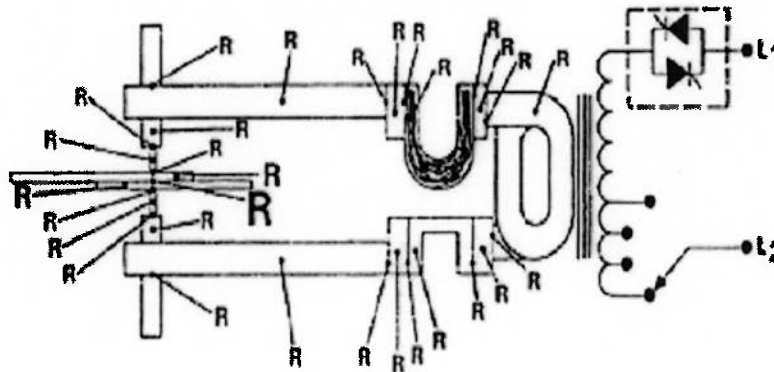


Figura 3.5: Resistência elétrica da máquina. (Adaptado) [13].

Entre as resistências dos eletrodos podem-se citar na totalidade cinco resistências elétricas, sendo a somatória das resistências parciais resulta em uma resistência total R_T , como mostra a equação abaixo 4 [4].

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5. \quad (4)$$

Resistência encontrada entre eletrodos.

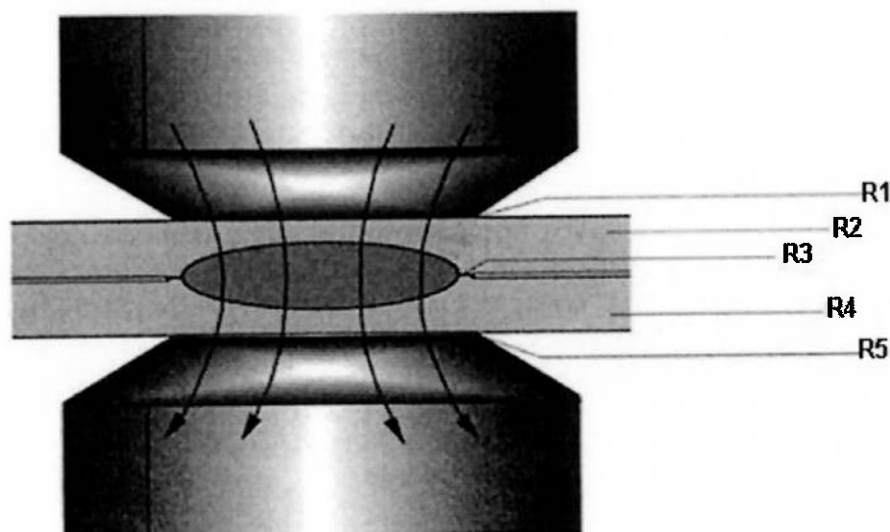


Figura 3.6: Resistências elétricas nos eletrodos/chapa (adaptado) [14].

As resistências citadas na figura 3.6 podem ser definidas como:

- R1, resistência de contato entre eletrodo e peça.
- R2, resistência de peça superior.
- R3, resistência de contato peça superior e inferior.
- R4, resistência da peça inferior.
- R5, resistência de contato entre eletrodo e peça.

3.3.2 Distribuição de temperatura no ponto de solda.

As perdas de calor são de dois tipos: radiação e condução. As perdas de radiação para a atmosfera ambiente são insignificantes. Perdas de condução são as perdas para os eletrodos e para o contorno do metal de base. Estas perdas são diretamente proporcionais às diferenças de temperatura. O maior o diferencial de temperatura esta entre a zona de soldagem e o contorno metal, são maiores as perdas. As perdas devem ser minimizadas para reduzir a descoloração, empenamento e alterações metalúrgicas indesejáveis no metal que cercam

imediatamente ao ponto de solda. Esta ação é realizada usando o menor tempo prático do fluxo de corrente [7].

O fluxo de corrente na marcação de uma soldagem, a corrente é passada a partir de um eletrodo que o metal de base para o outro eletrodo. Durante esta passagem, encontra resistência sete zonas separadas, como se mostra na figura 3.7 [7].

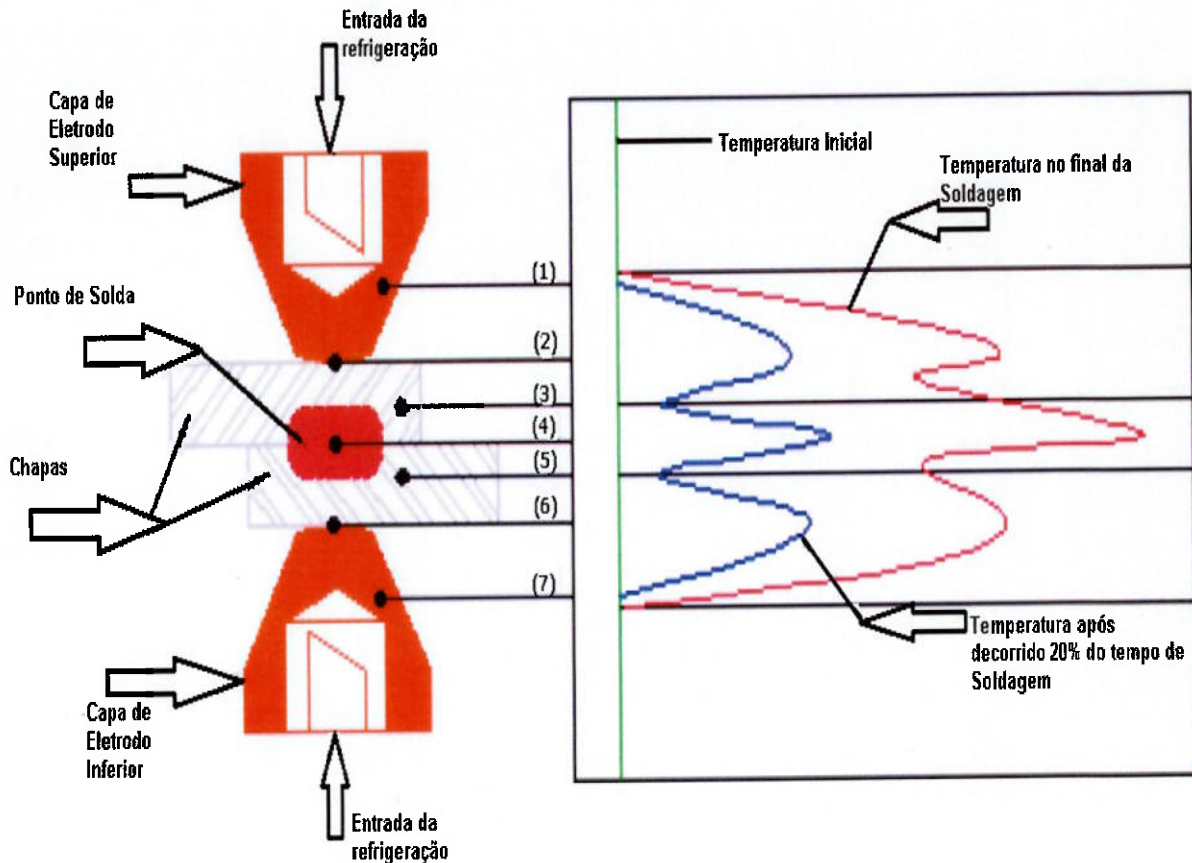


Figura 3.7: Distribuição de temperatura no ponto de solda [7].

A passagem da corrente de um eletrodo para o outro, encontra estas sete zonas de resistências, que podem ser verificadas entre estes pontos da figura 3.7 são elas:

- (1) e (7): a resistência elétrica do material e do eletrodo.
- (2) e (6): a resistência de contato entre o eletrodo e metal de base. A importância da condição da superfície do metal de base e eletrodo, o tamanho e o contorno da face do eletrodo, e a força de eletrodo. (A resistência é aproximadamente inversamente proporcional à força entre os contatos). Este é o ponto de geração de calor elevado, mas devido à alta condutividade térmica do material do eletrodo ($1e7$), e o fato de

que é resfriado por água, a superfície do metal de base não atingi a temperatura de fusão durante a passagem da corrente.

(3) e (5): a resistência total do próprio metal de base, que é diretamente proporcional à resistividade do metal de base e a sua espessura e inversamente proporcional à área de secção transversal da passagem de corrente.

(4): a interface de base de metal é o lugar onde a formação de solda começa. Este é o ponto de maior resistência, e por conseqüência, o ponto de maior geração de calor. Também, uma vez que os pontos quentes no (2) e (6), situar-se entre ele e os elétrodos altamente condutores, o calor gerado nesta interface não é facilmente perdido para os eletrodos mais frios [7].

3.3.3 Resistência elétrica de contato.

A resistência elétrica de contato tem como principal motivo a existência de um filme óxido encontrado nas superfícies de contatos das peças, sendo não condutor. O valor das resistências de contatos está no valor de 50-100 m W, no entanto o alumínio o valor é menor 20 m W. [15]. Existe uma relação de na superfície de contato com a pressão nos eletrodos e as superfícies a serem soldadas, podendo ser verificada no gráfico da figura 3.8 e figura 3.9 [15].

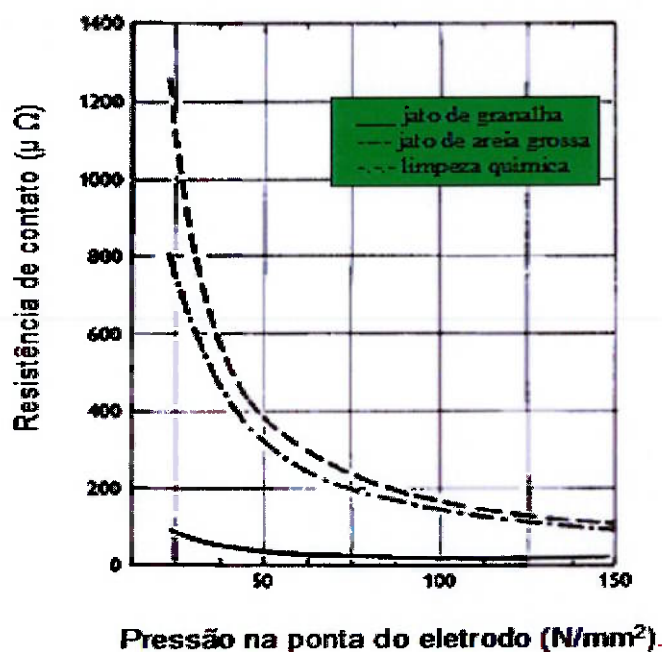


Figura 3.8: Variação da resistência com a pressão dos eletrodos e as condições da superfície. (Adaptado) [15].

O filmes óxidos encontrado na superfície da peça (chapa/chapa) é um dos maiores influentes nas resistências elétricas encontradas durante o processo de soldagem [4], como mostra a figura 3.9 [16].

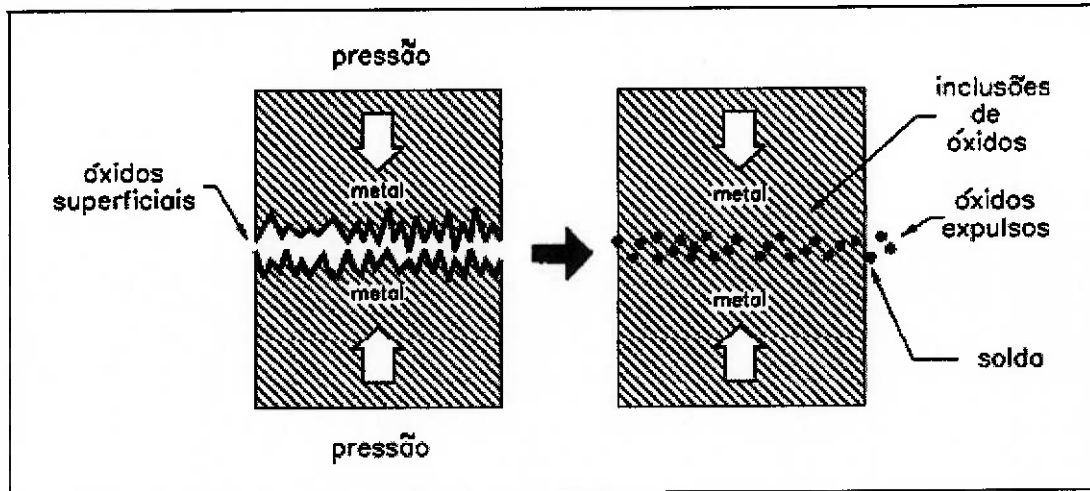


Figura 3.9: Variação da resistência com a pressão dos eletrodos e as condições da superfície com óxidos. (Adaptado) [16].

3.3.4 Resistência dinâmica de contato.

Em um processo de soldagem por resistência de contato, tem uma mudança rápida no processo de soldagem durante a formação do ponto, portanto, essa mudança é de natureza dinâmica. A resistência dinâmica tem sido estudada por anos, para se compreender a evolução do ponto de solda. Em tempos recentes tem sido usada como parâmetros de qualidade. Na figura 3.10, abaixo podemos observar os principais estágios da resistência dinâmica durante a formação do ponto de solda [17].

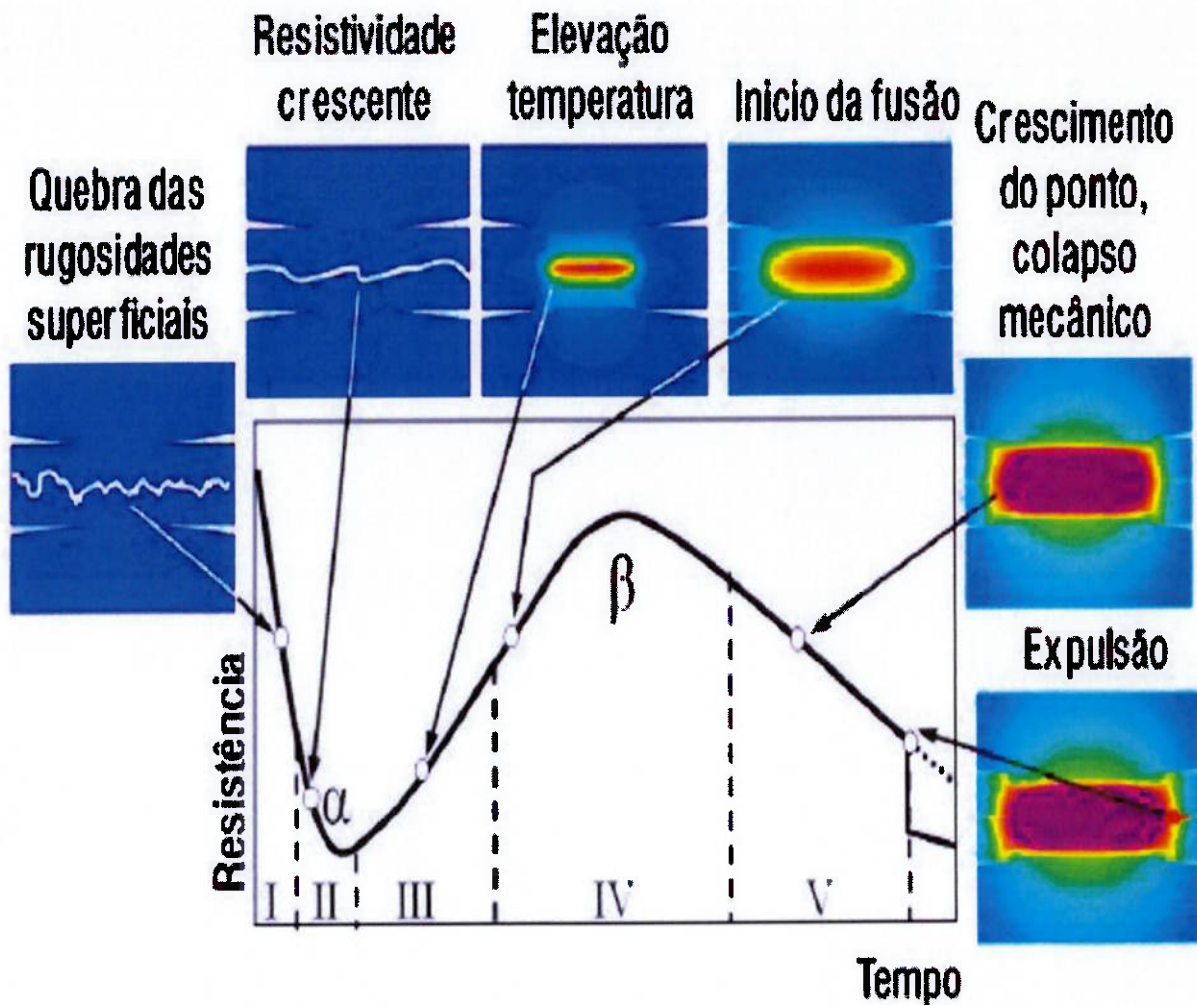


Figura 3.10: Sequências dos principais estágios da resistência dinâmica no período da formação do ponto de solda (adaptado) [18].

Avaliando a seqüência dos estágios tem-se:

- **Estágio I:** Fragmentação de óxidos ou contaminações superficiais e colapso da rugosidade superficial nas interfaces das chapas.
- **Estágio II:** Com o contato metal-metal há um aquecimento concentrado na interface entre as duas chapas. Este fato faz com que a área de contato aumente, diminuindo a resistência elétrica. Em contra partida a resistividade elétrica aumenta com o aumento da temperatura. Portanto, a competição entre estes dois mecanismos define o ponto α

- **Estágio III:** Aumenta a resistividade com o aumento da temperatura; transição para o estágio IV na inflexão da curva (IC); começa a fusão.
- **Estágio IV:** Fusão por três mecanismos:
 - Temperatura do material continua aumentando, aumentando a resistividade;
 - A fusão na interface aumenta a área da seção transversal, diminuindo a resistência elétrica;
 - A resistência mecânica do material diminui com o aumento da temperatura. Devido a este fato ocorre um aumento da área de contato (indentação). Por consequência disso a resistência elétrica diminui; ponto β indica início do crescimento do ponto de solda.
- **Estágio V:** O ponto cresce e pode ocorrer o colapso mecânico e a expulsão.

3.4 Principais parâmetros de soldagem.

3.4.1 Pré-pressão.

Pré-pressão: É o tempo que se inicia o ciclo da soldagem, onde os eletrodos pressionam as peças a serem soldadas até o início da passagem da corrente de solda, sendo necessária uma compressão na peça sem irregularidades [7].

3.4.2 Tempo de solda.

Tempo de solda: É o ciclo onde a corrente flui entre as peças pressionadas até a formação do ponto, o tempo muda de acordo com o material a ser soldado [9].

3.4.3 Pós-pressão.

Pós-pressão: É o ciclo após o tempo de soldagem onde os eletrodos mantêm as peças pressionadas para a dissipação do calor, tendo como ação o resfriamento do ponto [9].

3.4.4 Tempo de pausa.

Tempo de pausa: É o ciclo em tempo que estabelece um intervalo entre os pontos de solda, ou quando estabelecido pontos em série ou impulsos [9].

3.4.5 Corrente.

A alteração da corrente influencia diretamente na geração de calor, se reduzir o percentual da corrente a geração de calor é aproximadamente o dobro de perda [12]. A densidade da corrente pode variar na interface da solda, pois está relacionado com a intensidade da corrente, quando se aumenta a área de contato do eletrodo ou da dimensão projetada da solda diminui a densidade de corrente e o calor de soldagem, o que pode causar alteração nas propriedades mecânicas da solda. A corrente de soldagem com densidade excessiva pode causar expulsão do metal fundido e vazios internos nos pontos de solda, trincas e propriedades mecânicas não desejadas [19].

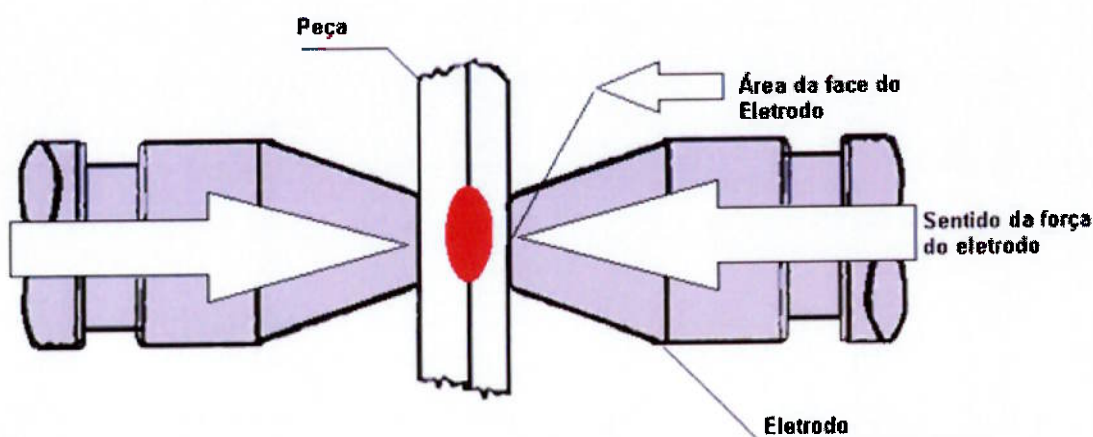
3.4.6 Pressão e força nos eletrodos.

A pressão é uma variável importante no processo de solda por resistência, quanto menor for a pressão maior vai ser o calor produzido, isso se deve ao aumento da resistência elétrica na superfície de contato quando se tem menor pressão [12]. A pressão e força têm conceitos diferentes e costumam ser confundida, pressão é aplicada em uma região onde a força é desenvolvida, sendo a força uma resultante do tempo de pressão que a área recebe como mostrado na figura 3.11 e na equação 5:

$$\text{FORÇA (KN)} = \text{ÁREA (mm}^2\text{)} \times \text{PRESSÃO (BAR)}. \quad (5)$$

A força é transportada pelo cilindro para a face dos eletrodos [12].

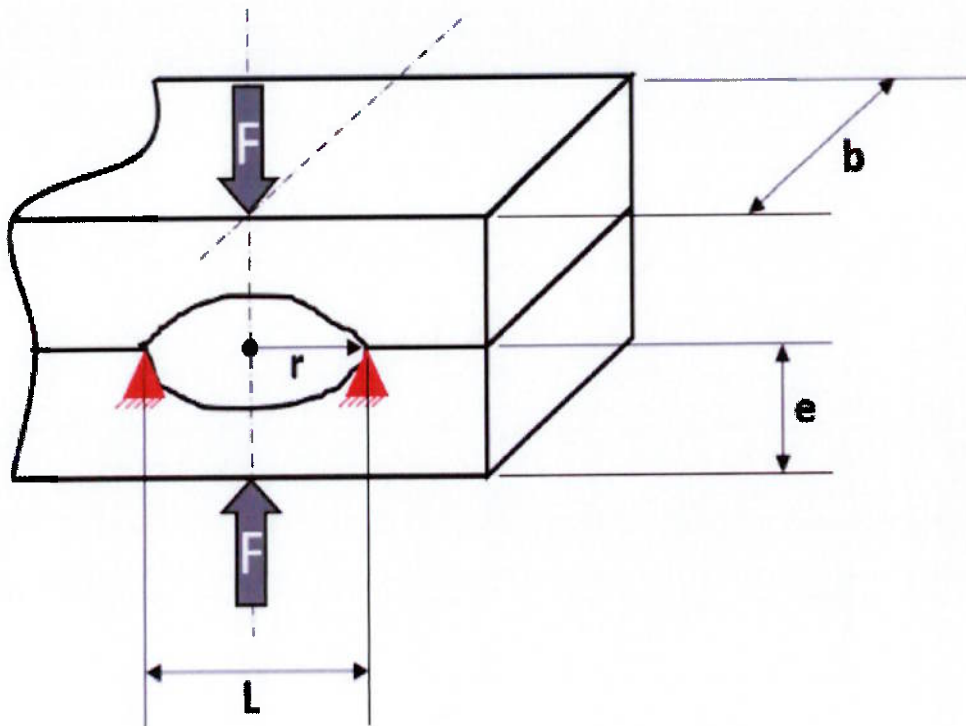
RELAÇÃO ENTRE PRESSÃO E FORÇA



$$\text{PRESSÃO} = \frac{\text{FORÇA (kgf)}}{\text{ÁREA (mm}^2\text{)}}$$

Figura 3.11: Figura demonstrativa de pressão e força (adaptado) [20].

Admitindo que durante a soldagem a ponto a chapa estará sujeita a duas forças: força de compressão e força de flexão. A força de compressão é responsável por melhorar o contato entre as chapas comprimindo os picos e vales encontrados na rugosidade superficial [21]. A força de flexão é responsável por corrigir a flecha encontrada no centro do ponto de solda durante a soldagem, admitindo que os extremos do raio de contato "r" tem a função de apoio quando aplicado conceito de viga bi apoiada [21]. Na figura 3.12 mostra uma representação esquemática da região de solda na qual a força de soldagem atua, fazendo uma analogia com uma viga bi apoiada [21].



Onde:

F = força (Kgf)

b = Diâmetro de contato do eletrodo (mm)

e = Espessura da chapa (mm)

L = Diâmetro de contato do eletrodo (mm)

r = Raio de contato na interface de soldagem (mm)

Figura 3.12: Representação esquemática das forças que atuam na região de soldagem a ponto por resistência [21].

Portanto, a força total de soldagem será a somatória destas duas forças (compressão + flexão). Decompondo estas duas forças obtêm-se a equação 6 [21].

$$F_{\text{Total}} = \sigma_{\text{esc}} \left[\left(\frac{e^2}{0,75} \right) + (\pi \times r^2) \right] \quad (6)$$

Onde:

σ_{esc} = Tensão de escoamento (Kgf/mm²)

e = Espessura da chapa (mm)

r = raio de contato do eletrodo (mm).

3.5 Refrigeração dos eletrodos.

A refrigeração dos eletrodos é obtida através da condução de água no sistema interno dos tubos, através de tubos a água chega às extremidades dos eletrodos e retornando nas secções externa dos tubos e interna dos eletrodos, como pode observar na figura 3.13 [22]. A refrigeração é de grande importância para a manutenção dos eletrodos devendo ser um processo contínuo e verificado, a refrigeração certa garante aos eletrodos a vida útil maior, confiabilidade na soldagem, estabilidade na soldagem, ponto de solda dentro do especificado, não deforma ou marca a peça, não aderência a peça, garante a aplicação da compensação correta de desgastes [11].

Sistema de refrigeração de soldagem por resistência.

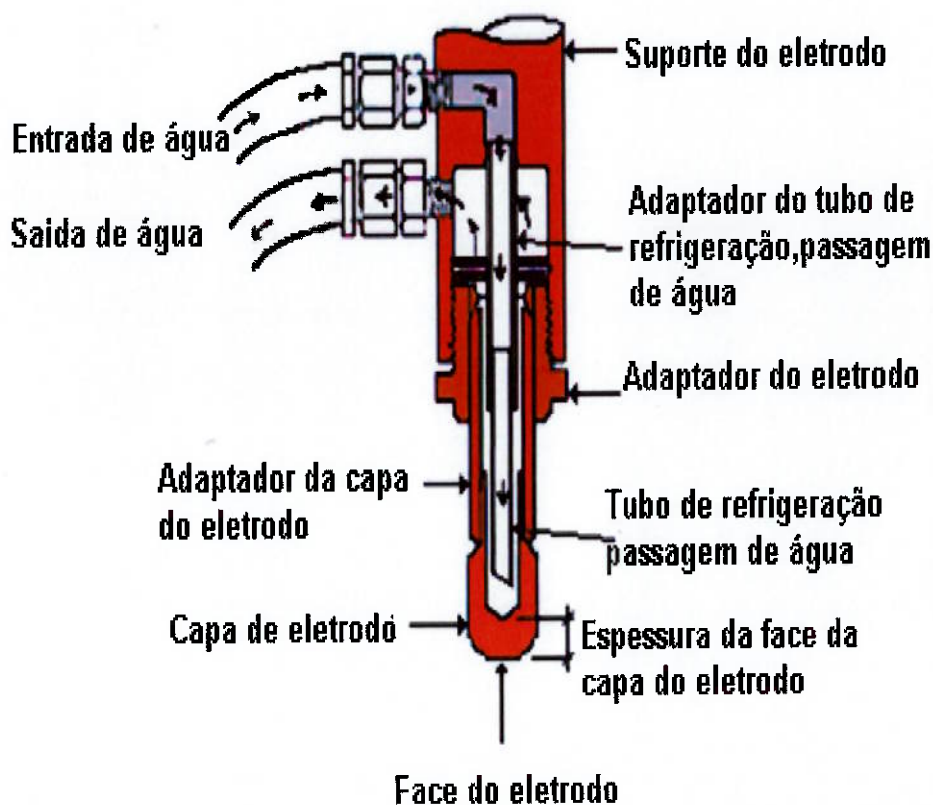


Figura 3.13: Sistema de refrigeração do eletrodo [13].

Em experimentos realizados a influência da refrigeração melhora tanto na vida útil do eletrodo como na eficiência aumentando a quantidade de pontos, a temperatura de 13°C atingiu 800 pontos quanto com 25°C atingiu 400 pontos, a vazão influencia da mesma forma, com uma vazão de 4,3L/m foi possível atingir 800 pontos e com uma vazão de 1,7L/m foi possível atingir 600 pontos. Concluiu-se também que a temperatura da água de refrigeração tem maior taxa de transferência de calor que comparado com a vazão de água, utilizando mesmo parâmetros [23].

3.6 Diagramas de soldabilidade ou janela operacional.

O diagrama de soldabilidade pode ser produzido em função do tempo da corrente e tempo de soldagem. Eles indicam a combinação do tempo e corrente para alcançar uma solda aceitável. O mínimo de corrente em um determinado tempo de solda corresponde ao requisito mínimo aceitável para o tamanho do ponto, como mostra na figura 3.14. As áreas do diagrama de soldabilidade apresentam resultados diferentes quanto a chapas revestidas ou não revestidas ou em soldagem CC ou AC [24].

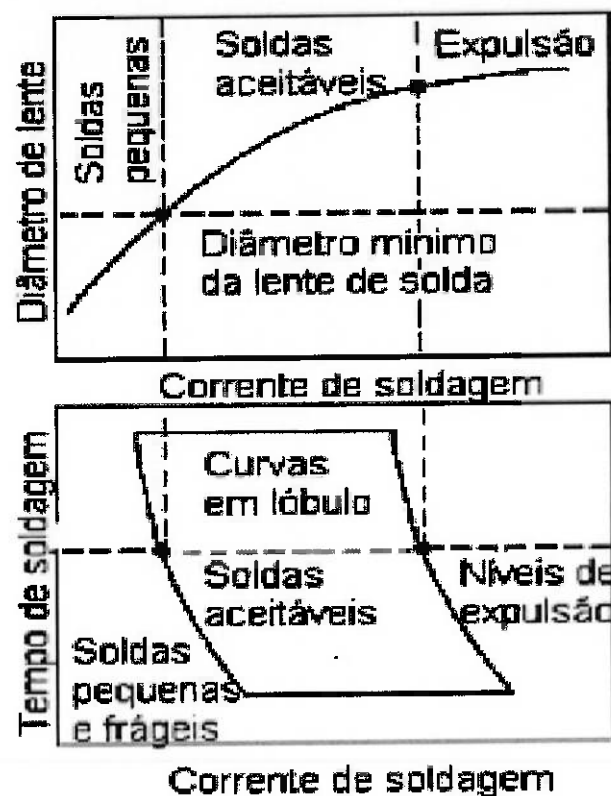


Figura 3.14: Diagrama de soldabilidade ou janela operacional [25].

3.7 Eletrodos utilizados na soldagem a ponto.

Os eletrodos são peças que sofrem trocas, feitas de ligas de cobres, pertencentes à máquina, são os condutores de corrente e força, aplicada na região a

ser soldada, sendo fixado no braço da máquina com forma, tamanho e sistema de fixação diferente [20].

Os eletrodos têm quatro principais funções:

- 1° ser o condutor de corrente a peça em uma determinada área da face do eletrodo.
 - 2° Transmitem uma determinada força no seu total em uma área da face do eletrodo, a força determinada pela face do eletrodo determina a pressão da área soldada.
 - 3° Dissipam rapidamente o calor, por condução, das superfícies externas soldadas, por serem condutores térmicos e serem refrigerados por água.
 - 4° Os eletrodos são como fixadores mantendo o alinhamento da peça soldada, devendo ser de grande resistência a deformação [20].
- Pode-se considerar que as faces dos eletrodos em sua área de contato o diâmetro 1,6 mm superior a área do ponto de solda, obedecendo a uma equação 7, que relaciona espessura e diâmetro do ponto [4].

$$d=5\sqrt{S} \quad (7)$$

ou $d=2,5 + 2S$

Onde:

d= diâmetro do ponto (mm)

S= espessura da chapa (mm). [4]

3.7.1 Geometria dos eletrodos.

A geometria e forma dos eletrodos serão determinadas de acordo com o formato da peça a ser soldada e o diâmetro do ponto a ser obtido conforme especificado por normas de solda de cada fabricante, conforme mostra a figura 3.15 [26].

Modelos de eletrodos para soldagem ponto por resistência.

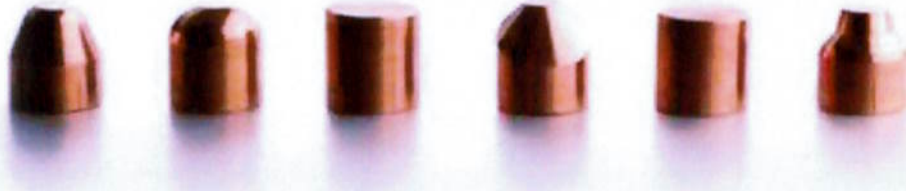
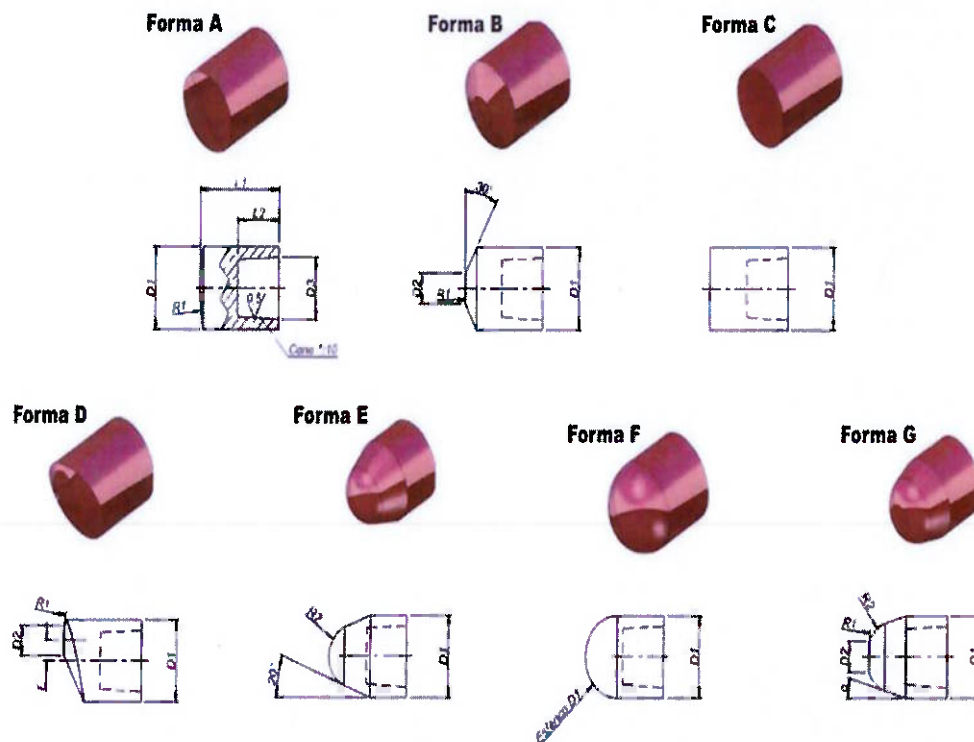


Figura 3.15: Modelos de eletrodos utilizado nas industrias automotiva [26].

Outro exemplo de formas geométricas de eletrodos como mostra figura 3.16 [27].



D1 h11	D2	D3	L1	L2 ^{+0,5} ₀	E	R1	R2	α	Força máxima no eletrodo (kgF)
13	5	10	18	5	3	32	5	-	255
16	6	12	20	10,5	4	40	6	15°	408
20	8	15	22	11,5	5	50	8	22,5°	642

Figura 3.16: Dimensões dos eletrodos utilizados nas industrias automotiva [27].

3.7.2 Características dos eletrodos.

Características de materiais de eletrodos podem ser observadas conforme a tabela 3.1 classificação RWMA.

Tabela 3.1: Características de materiais de eletrodos [27].

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

Classe 1 (CuZr, RWMA). Característica de condutividade elétrica superior, resistência ao grudamento (sticking) e recozimento faz com que esta liga de cobre uma das melhores performance, utilizando em chapa de aço tratada ou não [27],

Classe 2 (CuCrZr, RWMA). Característica com baixa porcentagem de cromo em comparação ao material padrão classe 2 CuCr, e a adição de zircônio nesta liga desestimulam a formação de latão a formação de latão, efeito do zinco e cobre, na face do eletrodo [27].

Classe 20 (CuAl₂O₃, RWMA) 1,1% Al₂O₃ em Cobre. Característica de cobre endurecido por dispersão eletrodo com menor custo efetivo [27].

As partículas de dióxido de alumínio (Al₂O₃) se mantém estáveis dentro da sólida matriz de cobre até os + 900 °C, o Nitrode é mais resistente ao recozimento, o eletrodo resiste à temperatura melhor que as outras ligas [12].

3.7.3 Alinhamento dos eletrodos.

A posição do alinhamento entre os eletrodos em sua superfície de contato deve ser observada com freqüência, pois havendo descentralização entre os eletrodos ocorreram pontos de soldas de forma irregular, alterando seu formato, reduzindo ou distorcendo a geometria do ponto.

O alinhamento dos eletrodos tem importância relevante na geometria do ponto e na vida útil do eletrodo [11].

Alguns exemplos de alinhamentos dos eletrodos podem ser observados na figura 3.17.

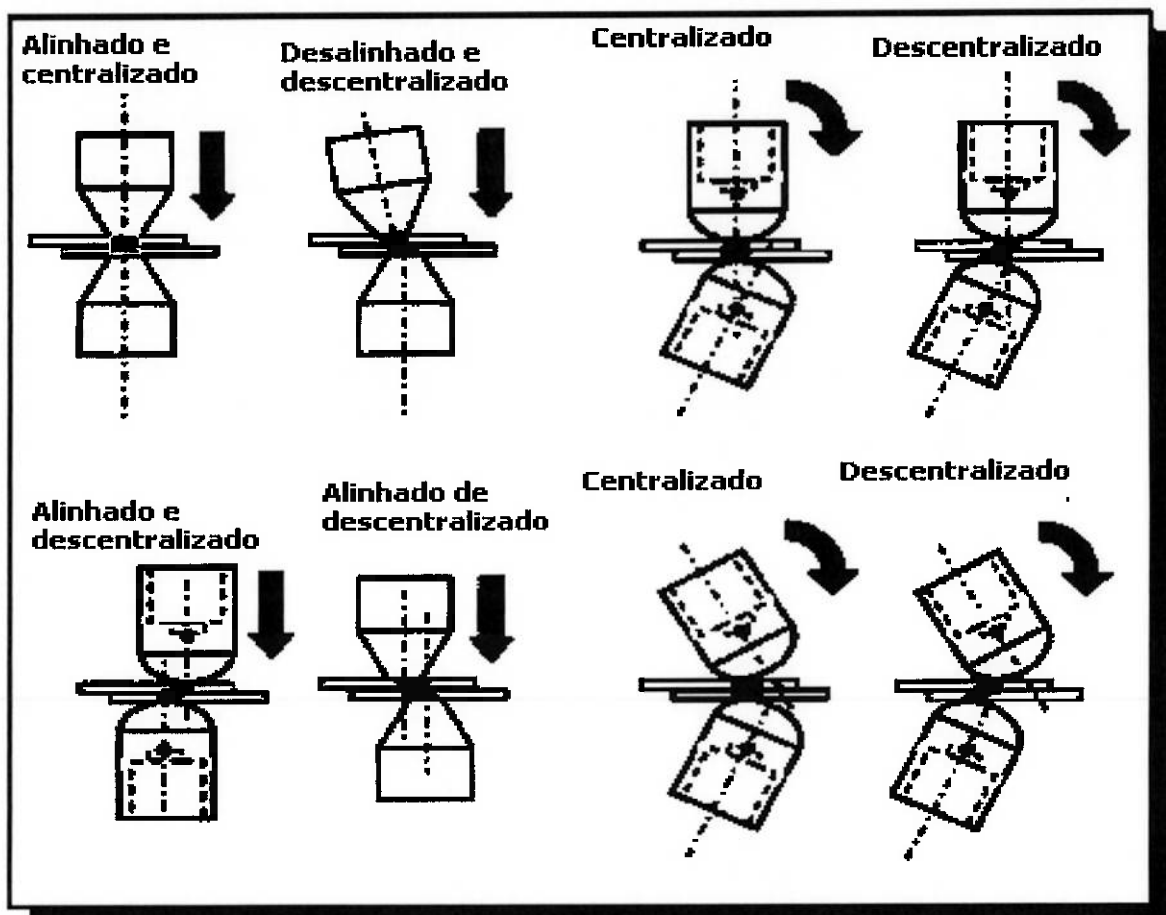


Figura 3.17: Exemplos de alinhamento e desalinhamento [11].

3.8 Equipamentos de soldagem a ponto por resistência.

3.8.1 Transformadores primários e secundários.

As máquinas de soldagem por resistência são compostas por transformadores primários e secundários, o qual transforma a corrente elétrica de alta voltagem e baixa amperagem em baixa voltagem e alta amperagem, como exemplo ilustrativo na figura 3.18 abaixo, a alta voltagem que geralmente é de 480 volts e a amperagem pode ser de 100 a 2000 amperes, o transformador secundário transformar para baixa voltagem 03 a 30 volts e 9000 a 30000 amperes. Esses valores são meramente ilustrativos para mostrar a relação entre correntes e transformadores [20].

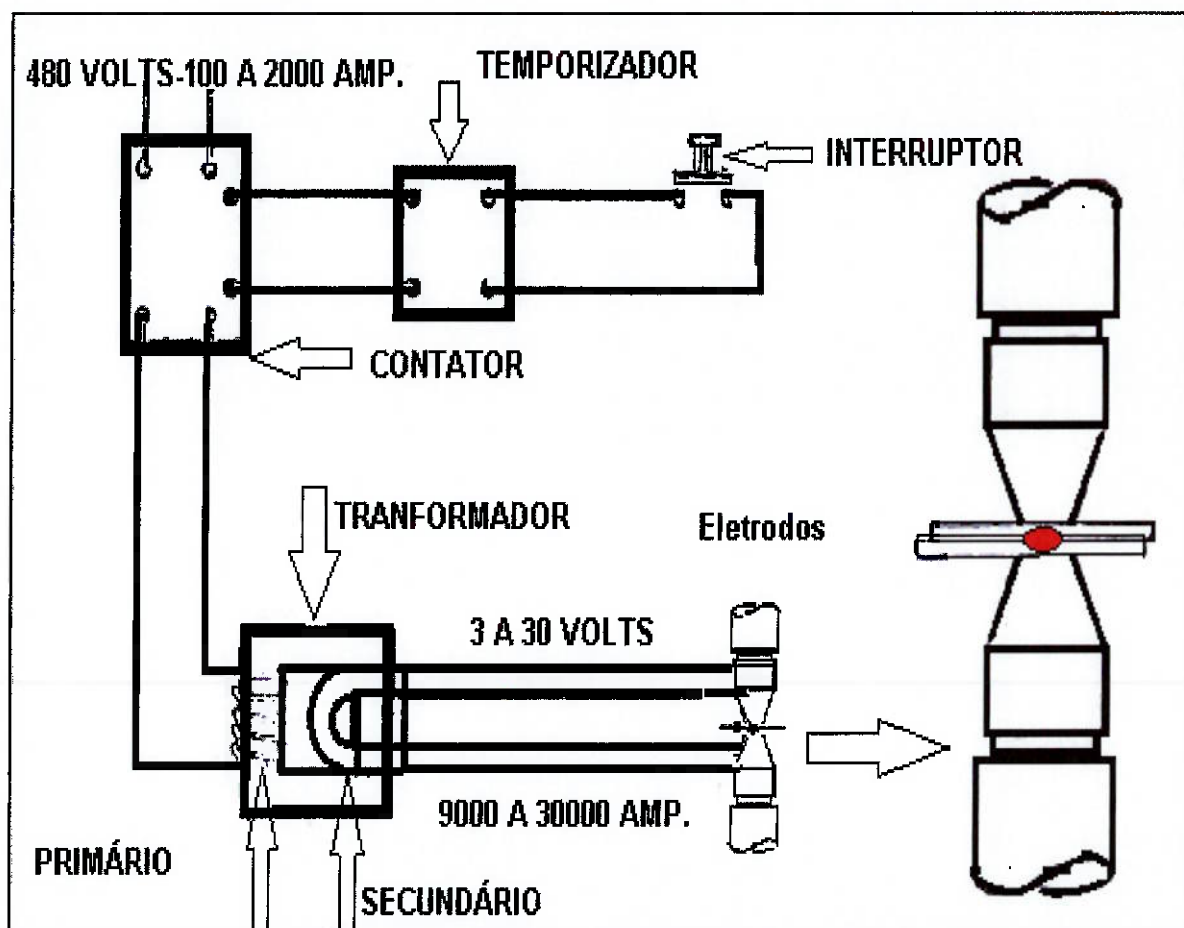


Figura 3.18: Exemplo ilustrativo de máquina de soldagem por resistência [20].

3.8.2 Máquinas de soldagem a ponto.

As máquinas de soldagem por resistência são usadas para soldagem de alta produtividade e baixo custo de fácil manuseio operacional, não requer mão de obra qualificada, com treinamentos específicos de soldagem pode qualificar operadores, como modelo de máquinas mostra a figura 3.19.

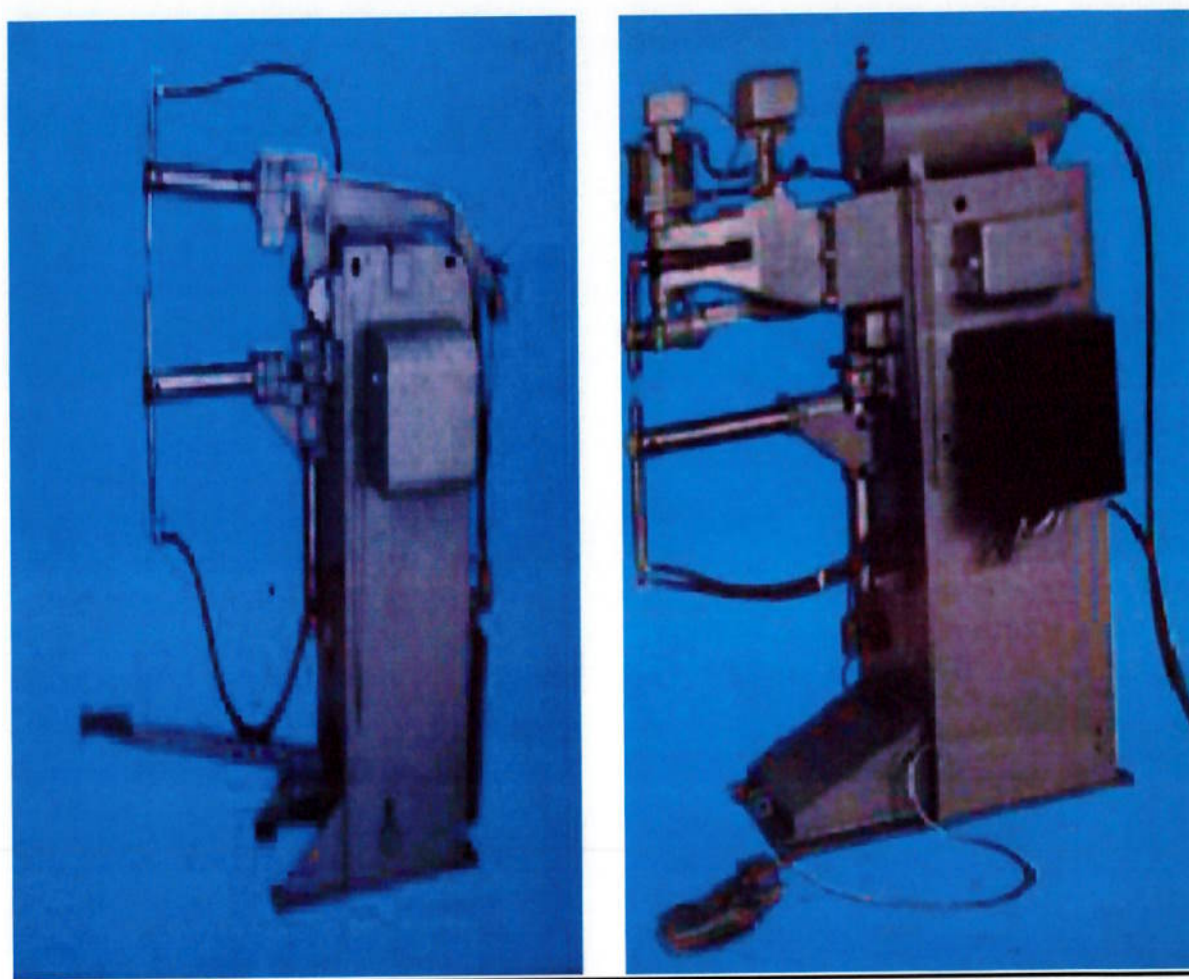


Figura 3.19: Máquinas de soldagem por resistência (Ponteadeira) [28].

3.8.3 Dressador ou Fresador.

Para corrigir as pontas dos eletrodos para trazê-los para as dimensões determinadas, podendo fazer tais ajustes na mesma máquina pode-ser usado um Fresador ou Dressador. Como mostra a figura 3.20 [28].

Equipamento para ajuste da face de contato do eletrodo.

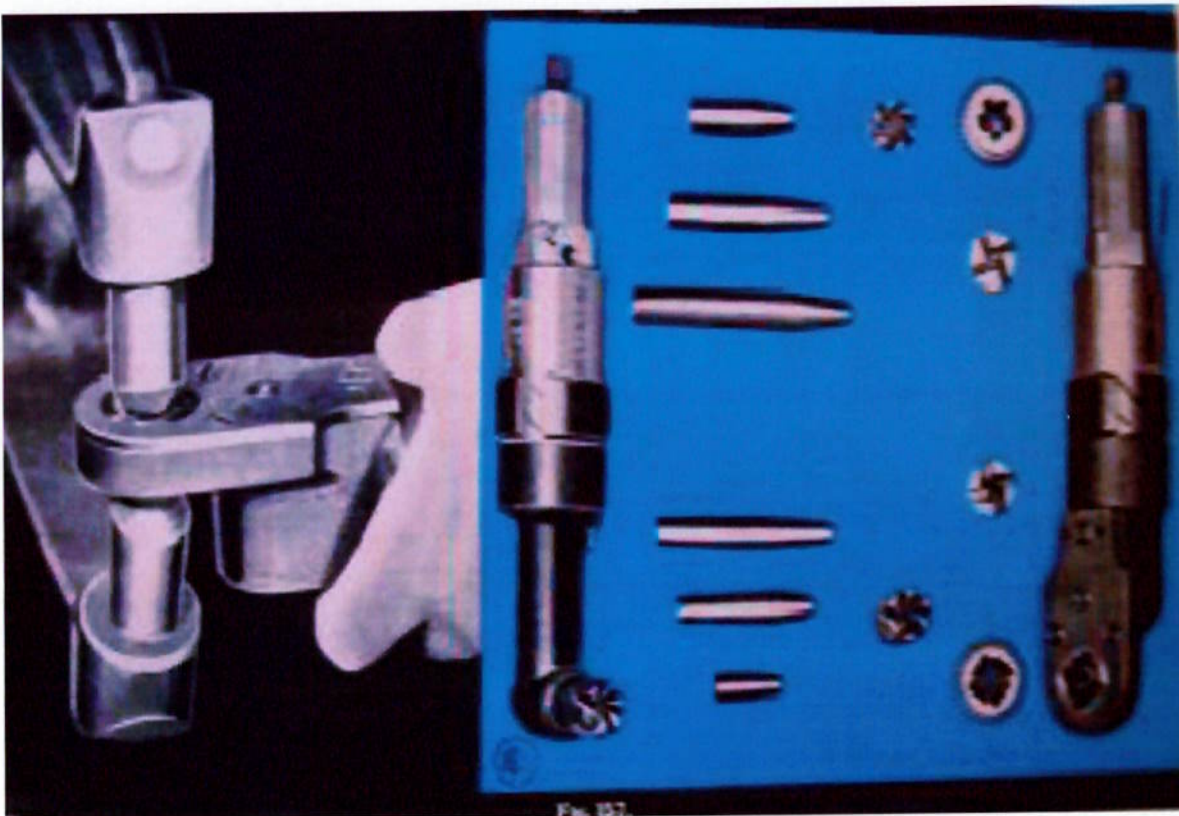


Figura 3.20: Fresador para ajuste da ponta do eletrodo [28].

3.9 Aços carbono.

O aço é uma liga metálica que tem em sua composição o ferro e o carbono que é primordial, sendo que o carbono tem sua porcentagem de 0,008 a 2,11%, para diferenciar-se do ferro fundido que com teor de carbono entre 2,11% a 6,67%, o que os torna diferentes é a ductilidade, enquanto o primeiro é deformável o segundo é frágil [29].

3.9.1 Metalurgia de soldagem a ponto por resistência.

Durante o processo de soldagem por resistência a nucleação do ponto consiste em duas etapas: A nucleação de uma fase sólida e subseqüentemente o crescimento dos cristais. O processo de cristalização é controlado pelo calor, a dissipação entre o metal de base e os eletrodos. A direção e a velocidade de resfriamento somado com a composição química do metal de base são decisivas para o tipo, o tamanho e a direção formando diferentes microestruturas de fundição. As microestruturas podem aparecer de várias formas dentro do ponto de solda, que está relacionado ao parâmetro de soldagem e outras condições como a composição química do material. No centro do ponto de solda a solidificação que se forma por ultimo forma grão equiaxiais devido ao superresfriamento na região. A situação mais desejável é quando ocorre a solidificação de maneira uniforme em todos os lados e ao redor do sólido, entre os eletrodo e direção do metal de base, como mostra a figura 3.21 [14].

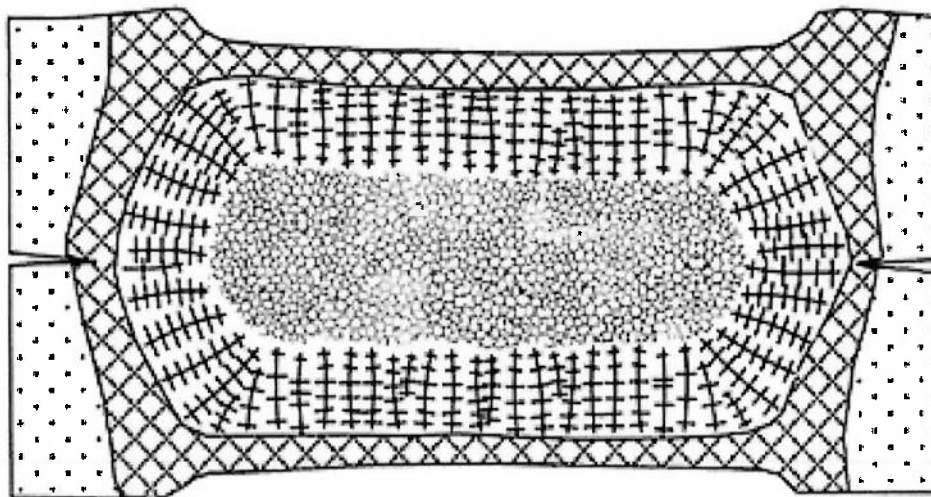


Figura 3.21: Ponto de solda desejável, resfriamento uniforme [14].

Quando os parâmetros não são os corretos e o sistema de refrigeração não está bem determinado ou quando existem barreiras térmicas indesejáveis entre o eletrodo e a peça, existe a possibilidade de surgir trincas ou vazios no ponto de solda, apresentando grão colunares crescendo no sentido dos eletrodos, uma das causas pode ser o super-resfriamento dos eletrodos, como a taxa de solidificação tende a ser de maior velocidade na direção dos eletrodos, podendo ocorrer trincas no centro do ponto de solda, como podemos observar na figura 3.22 [14].

Grão crescendo no sentido do eletrodo.

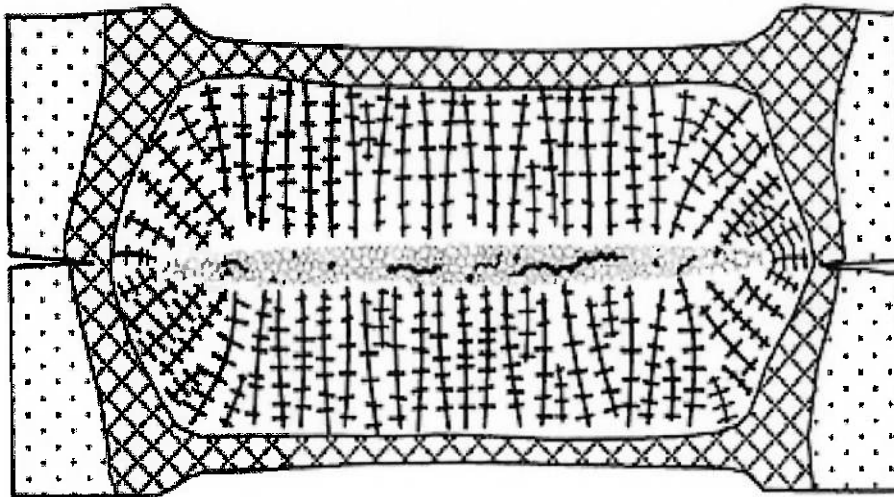


Figura 3.22: Ponto de solda indesejável com resfriamento rápido através dos eletrodos e metal de base [14].

Quando o sistema de refrigeração não está correto e os eletrodos estão impedidos de refrigerar, ou os eletrodos estão gastos ou a área entre metal/eletrodo é pequena, a maior parte é conduzida para fora do metal. Por isso, a última porção do líquido assume forma alongada perpendicular à face do eletrodo, ao redor do centro do ponto de soldagem. Portanto é inevitável a formação de trincas e porosidades devido ao pequeno volume líquido no centro do ponto de solda, como se pode observar na figura 3.23 [14].

Ponto de solda com formação de trinca.

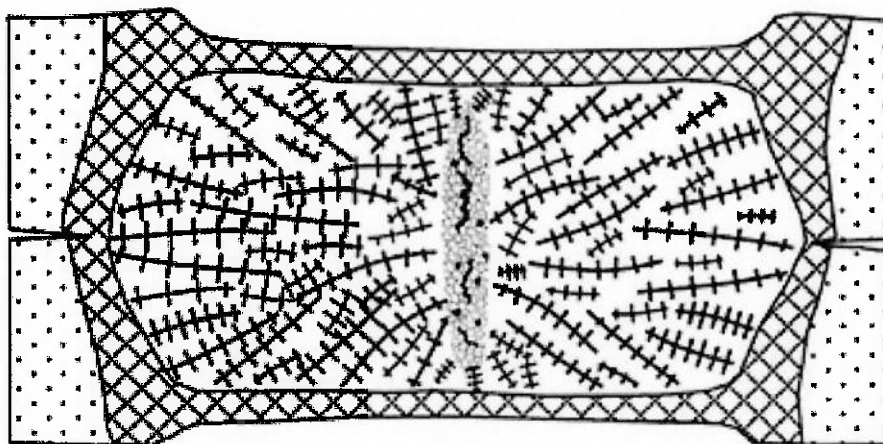


Figura 3.23: Ponto de solda indesejável, resfriamento lento através do metal e dos eletrodos (Adaptado) [14].

3.10 Análises de qualidade da solda.

Existem vários métodos de avaliação da qualidade de solda, cada situação determinará os métodos mais viáveis para avaliação da qualidade da solda, os critérios de avaliação podem ser modo geral estão em métodos de inspeção visual, ensaio destrutivo e ensaio não destrutivo [11].

3.10.1 Inspeção visual.

A inspeção visual é um dos métodos adotados através amostras de lote, podendo ser avaliados pelo operador ou pelo inspetor de qualidade. A inspeção tem que ter poucos itens de observação devendo ser bem definido para uma correta qualificação do ponto de solda. É um método não muito preciso não devendo ser usado como único tipo de avaliação [11].

Itens básicos para inspeção visual de soldagem a ponto conforme tabela 3.2 [11].

Tabela 3.2: Tabela de auxílio de inspeção visual.

INSPECIONAR	POSSÍVEIS PROBLEMAS	POSSÍVEIS CAUSAS
<p>Coloração da superfície da fundida:</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Superfície sem alteração de cor (ponto claro) ou sem marca de aquecimento da superfície de contato com os eletrodos. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Baixa temperatura ocasionando diminuição na área de fusão. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Aumento da força entre eletrodos. ✓ Diminuição da corrente ou tempo de solda. ✓ Desgaste ou fim da vida útil do eletrodo. ✓ Erro na curva do stepper. ✓ Produto fora da especificação dimensional ou físico química. ✓ Fuga de corrente na máquina. ✓ Controlador programado para sem solda. ✓ Eletrodo fora de especificação.
<p>Coloração da superfície da área fundida e luz emitida:</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Superfície escura além da área de fusão dos materiais. Área em torno do ponto fica marcada pela alteração da temperatura dos materiais. ✓ Grande quantidade de luz gerada na área de contato dos eletrodos com o produto ou na superfície de fusão. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Alta temperatura de fusão, aumentando a zona afetada pelo calor (ZAC), ocasionando grande endentação e dependendo do material, fragiliza a ZAC, gera trincas, contamina a superfície com o material do eletrodo e outras implicações metalúrgicas. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Elevação no tempo ou corrente de soldagem. ✓ Falha na refrigeração dos eletrodos. ✓ Produto fora de especificação físico ou química.
<p>Expulsão de material.</p>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Alta temperatura de fusão com retirada de material (respingo), ocasionando vazio na zona de fusão, rebarbas na superfície da área de contato, aumento da endentação, contamina a superfície com o material do eletrodo e outras implicações metalúrgicas. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Elevação da corrente de solda. ✓ Diminuição de força de contato entre eletrodos. ✓ Falha na refrigeração dos eletrodos. ✓ Produto fora da especificação dimensional ou físico química. ✓ Folga nos sistemas de acionamento dos eletrodos. ✓ Desalinhamento dos eletrodos. ✓ Assentamento ruim das chapas. ✓ Material contaminado com impurezas. ✓ Eletrodo fora de especificação.
<p>Geometria da área fundida:</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Área de fusão ovalizada. ✓ Amassamento irregular do produto. As partes do produto fundem diferentemente. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Alteração da área de contato ocasionando diminuição na área de fusão. ✓ Projeção do material. ✓ Aumento da indentação. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Alteração da força entre os eletrodos. ✓ Desgastes ou fim da vida útil dos eletrodos. ✓ Produto fora de especificação dimensional ou físico química. ✓ Eletrodo fora de especificação. ✓ Folga no sistema de acionamento dos eletrodos. ✓ Desalinhamento dos eletrodos.

3.10.2 Ensaios não destrutivos.

Os ensaios realizados sobre as peças não acabadas, não danificam sua estrutura e nem interferem em sua utilização. Sendo realizados por Raios-X, Partículas magnéticas, Ultrason e Líquido Penetrante. Os ensaios não destrutivos permitem inspeções contínuas durante a vida útil do produto sem danificar [30].

3.10.3 Ensaios destrutivos.

Ensaios realizados com corpos de provas com as mesmas características do material a ser soldado. As especificações para os testes de verificação da qualidade da solda variam de acordo com cada empresa, sendo que a força de rompimento do material, e de sua utilização seja definida em seu produto [11].

A figura 3.24, mostra os testes mais comuns usados no ensaio destrutivo. [11].

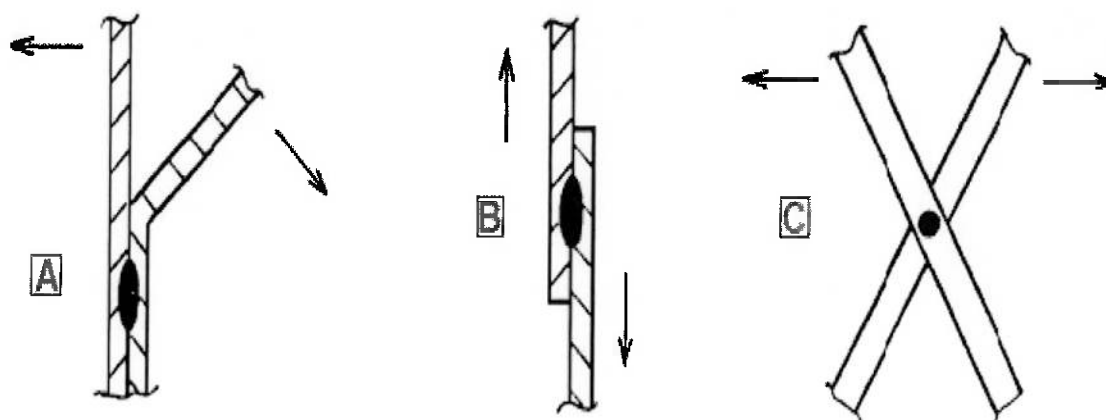


Figura 3.24: Ensaios destrutivos (Adaptado) [11].

[A] Ensaio por arrancamento; **[B]** Ensaio por torção (cisalhamento); **[C]** Ensaio por torção [11].

3.11 Indentação.

A indentação é a profundidade da deformação formada pela pressão do eletrodo na superfície da chapa durante a soldagem, como se pode observar na figura 3.25.

Marca deixada pelo eletrodo na soldagem.

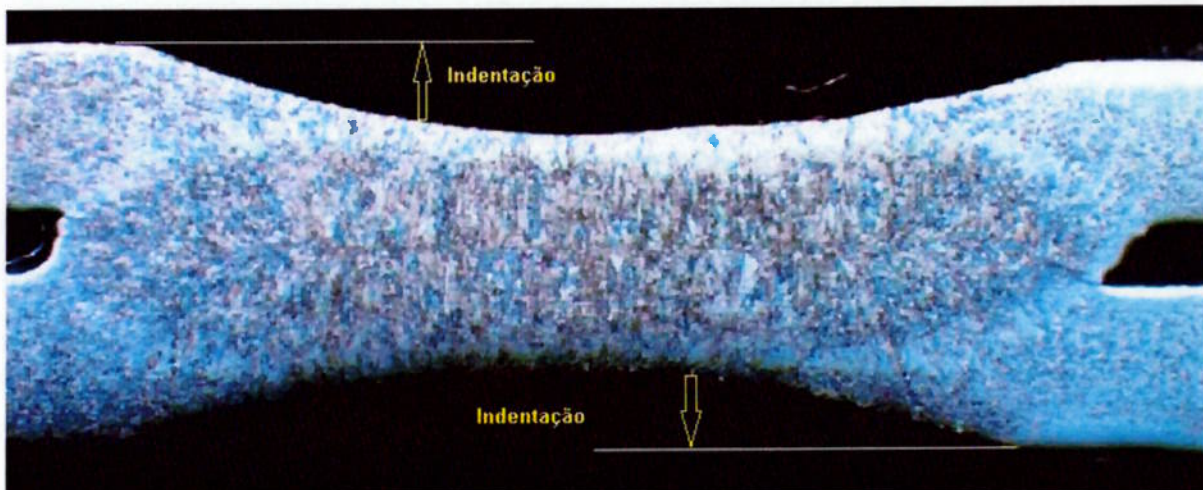


Figura 3.25: Profundidade de Indentação [11].

A indentação na indústria automobilística se torna uma situação indesejável quando é uma peça exposta podendo causar uma impressão desfavorável ao consumidor. Em algumas normas se torna uma situação aceitável uma indentação de até 30% da espessura do material a ser soldado. A indentação excessiva em alguns pontos não é permitida, pois pode causar uma ligação fraca entre as chapas devido à redução da área na espessura no ponto de solda. Outro problema pode ser a expulsão de material devido a profundidade em excesso. A tensão residual que é o resultado da interação termodinâmica pode resultar em falha por fadiga. A escolha correta do parâmetro pode-se controlar a profundidade da indentação [14].

4. MATERIAIS E MÉTODOS.

4.1 Máquinas Ponteadeira.

A máquina utilizada para os experimentos é do tipo estacionária, com corrente alternada, alimentação primária de 440votls e 60Hz, com um transformador de 100 KVA e sistema de acionamento pneumático como mostra a figura 4.1.

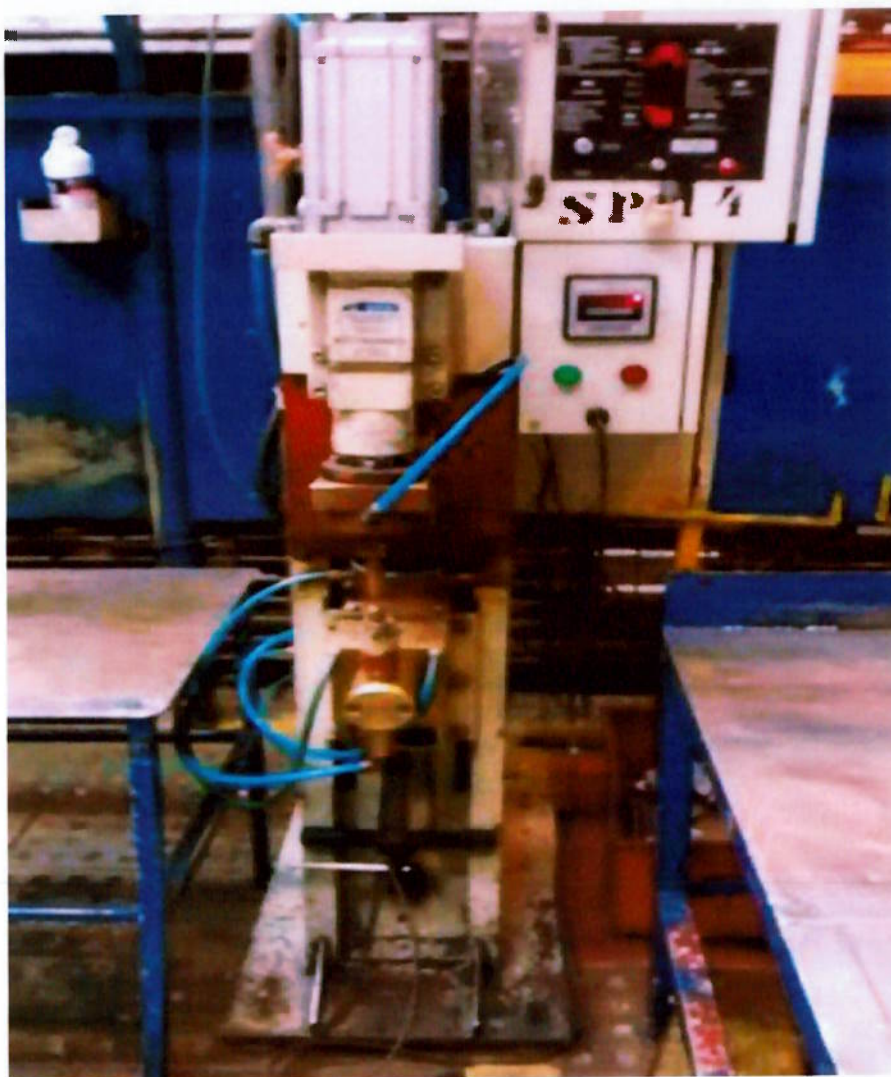


Figura 4.1: Máquina de solda por resistência estacionária, utilizada em experimentos.

4.2 Eletrodos utilizados nos experimentos.

4.2.1 Características do eletrodo.

Para execução da soldagem utilizou eletrodo cobre cromo zircônio (CuZrCr,1%Cr,0,25%Cr,condutividade 85%,dureza 83HB e mecanismo de endurecimento por precipitação) conforme Classe 2 apresentado no item 3.7.2.A figura 4.2 apresenta os eletrodos utilizados nos experimentos: eletrodo de face esférica e o eletrodo de face plana, respectivamente.



Figura 4.2: Eletrodos utilizados nos experimentos: eletrodo face esférica e eletrodo face plana , respectivamente.

4.2.2 Geometria e dimensões dos eletrodos:

As figuras 4.3 e 4.4 apresentam as características geométricas e as dimensões dos eletrodos utilizados nos experimentos. O eletrodo de contato esférico mostrado na figura 4.3 possui raio esférico de 10 mm e comprimento de 20 mm.

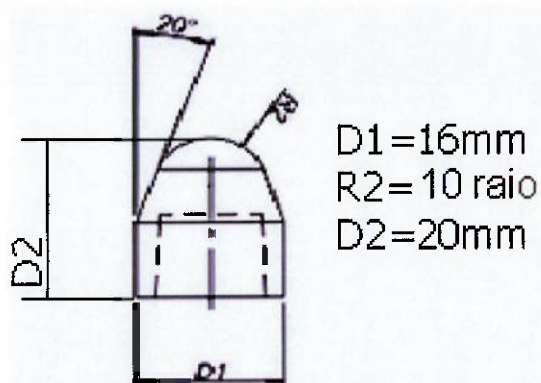


Figura 4.3: Geometria e dimensões do eletrodo de face esférica de contato.

Outro eletrodo utilizado nos experimentos é com superfície reta com área de contato de 08 mm, diâmetro de 16 mm e altura de 20 mm, conforme mostrado na figura 4.4.

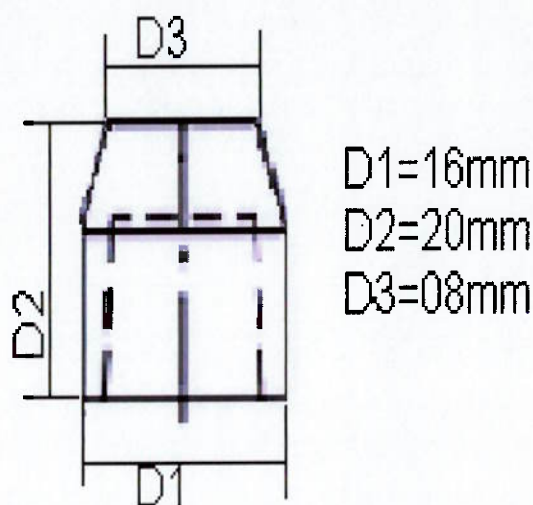


Figura 4.4: Geometria e dimensões do eletrodo face plana de contato.

4.3 Características dos corpos de provas utilizados nos experimentos.

O material utilizado para a soldagem nos experimentos foram chapas de aço carbono laminados a quente, para construção de componentes para indústria automotiva, sem revestimento superficial. A figura 4.5 apresenta as dimensões do corpo de prova utilizado nos ensaios. O material é FEP 12, com dimensões de: espessura de 2,50 x 20 x 100, conforme mostra a figura 4.5.

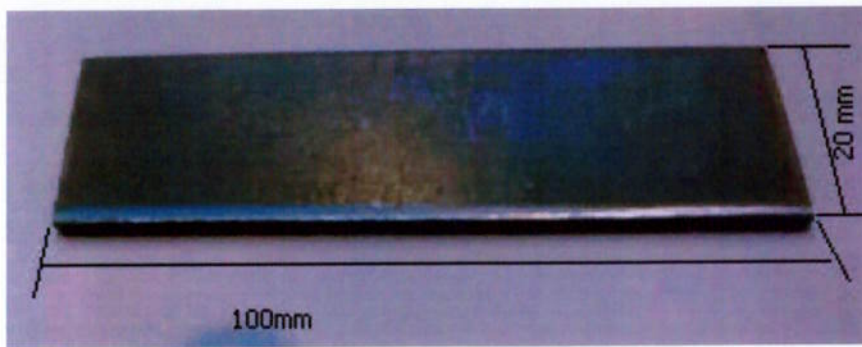


Figura 4.5: Exemplo de corpo de prova e suas dimensões utilizadas nos experimentos.

Propriedades mecânicas do material (Fep 012) utilizado nos experimentos segundo a norma 52807 são:

- Resistência Tração: 270 a 400 MPa.
- Limite de Escoamento: 180 a 290 MPa.
- Alongamento: 30% mín.

Na figura 4.6 apresenta o relatório das propriedades mecânicas da bobina onde foi retirado o material para a fabricação dos corpos de prova.

As propriedades mecânicas encontradas foram:

- Resistência a Tração: 343.5 MPa.
- Limite de escoamento: 275,7 MPa.
- Alongamento: 33.76%.

Relatório de Ensaio de Tração

Máquina: **Emic DL10000MF** Célula: **Trd 28** Extensômetro: - Data: **15/04/15** Hora: **13:23:38** Trabalho n° **0063**
 Programa: **MTest versão 3.00** Método de Ensaio: **TRAÇÃO EXTENSOM**
 Ident. Amostra: >>>>>>>> MATERIAL / LOTE: **MTFIAT00011 LOTE 420561-0614** NORMA: **5906 EM** ESPESSURA: **2.50 mm**

Parâmetro >>	Tensão	Tensão	Def.Especif.	Força
Evento >>	Força Max.	Escoam. ES1	Colapso1	Força Max.
Unidade >>	(MPa)	(MPa)	(%)	(N)
CP 1	343.5	275.7	33.76	17040
CP 2	346.9	272.3	34.91	17210

Legenda >>> Escoam. ES1: Def.Especif. .2000 % Colapso1: 15.00 %

Tensão (MPa)

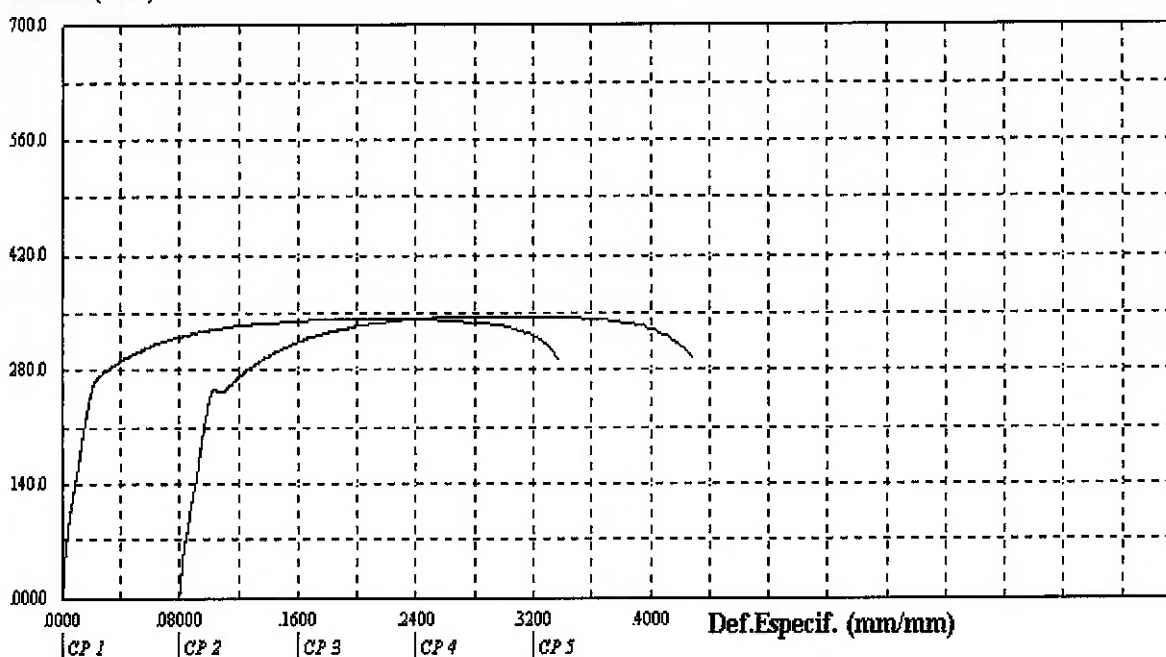


Figura 4.6: Relatório das propriedades mecânicas da bobina onde foi retirado o material para a fabricação dos corpos de prova.

A figura 4.7 mostra a composição química do material realizado através de um espectrômetro, este é um aparelho no qual através de um eletrodo é feita a queima do aço, e desta queima é emitida uma energia em forma de luzes coloridas (cada cor de luz, um elemento) e dependendo da intensidade destas luzes se identifica o percentual de cada elemento químico em uma determinada liga em três pontos do metal.

Codigo do Mat.:		Material:					
Fornecedor:		Identificacao:					
	C %	Si %	Mn %	P %	S %	Cr %	Mo %
1	0.0349	<0.0100	0.2531	0.0304	0.0152	<0.0100	0.0194
2	0.0390	<0.0100	0.2527	0.0326	0.0160	<0.0100	0.0188
3	0.0287	<0.0100	0.2540	0.0320	0.0151	<0.0100	0.0193
	Ni %	Al %	Co %	Cu %	Nb %	Ti %	V %
1	0.0099	0.0725	0.0185	0.0285	0.0205	0.0020	0.0109
2	0.0093	0.0725	0.0191	0.0293	0.0197	0.0020	0.0114
3	0.0104	0.0732	0.0227	0.0299	0.0204	0.0020	0.0106
	W %	Sn %	Fe %				
1	<0.0500	<0.0050	99.5				
2	<0.0500	<0.0050	99.5				
3	<0.0500	<0.0050	99.5				

Figura 4.7: Composição química do corpo de prova realizado através de um espectrômetro.

A tabela 4.1 apresenta as médias dos componentes químicos do material após os ensaios de composição química.

Tabela 4.1: Média dos resultados da composição química do material.

Fe %	Mn %	Al %	W %	C %	P %	Cu %	Co %	Nb %	Mo %
99,5	0,253267	0,07273	0,05	0,0342	0,03166	0,0292	0,0201	0,0202	0,019167
S %	V %	Si %	Cr %	Ni %	Sn %	Ti %			
0,015433	0,010967	0,01	0,01	0,00986	0,005	0,002			

4.4 Equipamentos de ajuste, calibração e monitoramento utilizados nos experimentos.

4.4.1 Fresador ou Dressador.

Foi utilizado um modelo pneumático de fresador, para ajuste da superfície do eletrodo e para manter a forma original da face de contato, conforme mostra a figura 4.8.

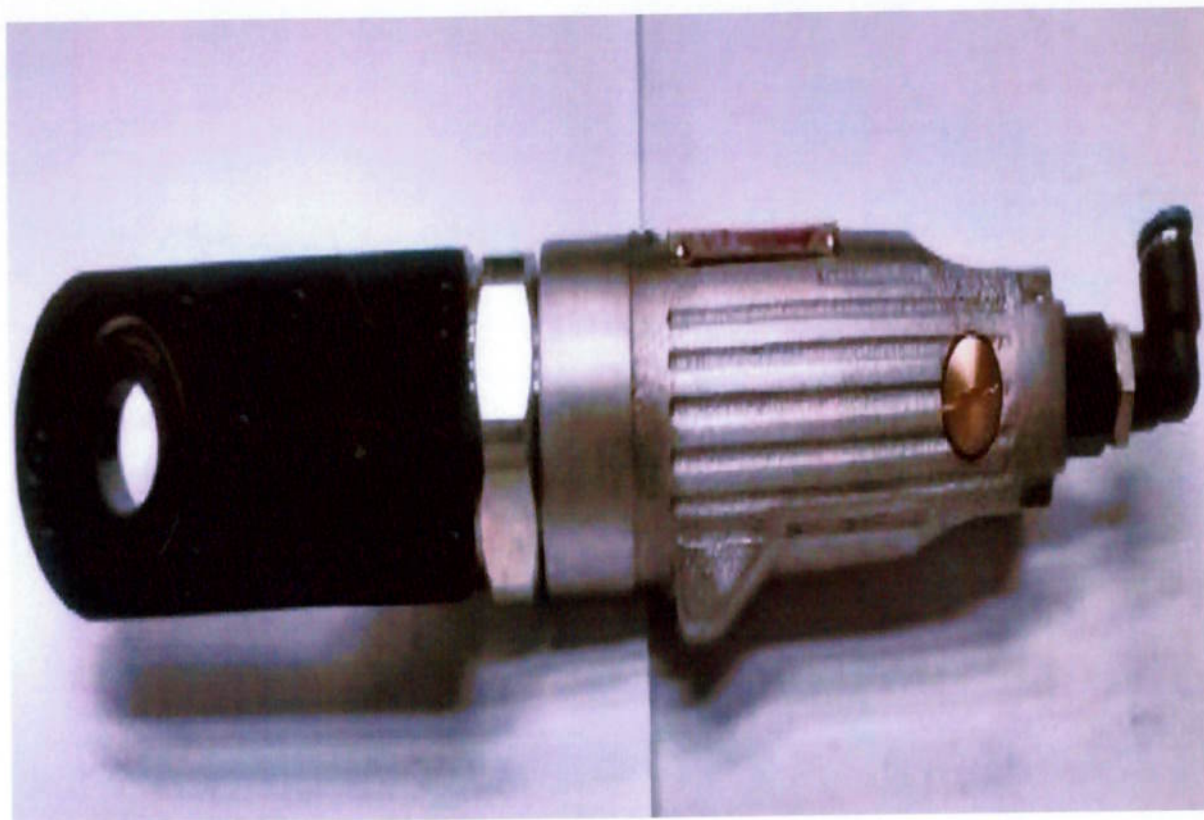


Figura 4.8: Fresador de eletrodo utilizado nos experimentos para ajuste dos eletrodos.

4.4.2 Laminas para Fresador ou Dressador utilizadas nos experimentos.

Na figura 4.9 mostra as laminas utilizadas no fresador para ajustar os eletrodos de face de contato esférico (4,6 mm) e eletrodos de face de contato plano (08 mm), respectivamente.



Figura 4.9: Laminas utilizadas no frezador para ajustar os eletrodos de face de contato esférico (4,6 mm) e eletrodos de face de contato plano (08 mm), respectivamente.

4.4.3 Equipamento de calibração e monitoramento da corrente, tensão e tempo de soldagem utilizados nos experimentos.

A figura 4.10 mostra o equipamento que foi utilizado nos experimentos para a calibração e monitoramento da tensão, corrente elétrica e o tempo de soldagem. Pode-se observar na figura 4.10 um exemplo de medição durante a soldagem:

- Corrente: 9,15KA;
- Tempo: 16 ciclos ou 267 ms.



Figura 4.10: Equipamento utilizado nos experimentos para a calibração e monitoramento da tensão, corrente elétrica e o tempo de soldagem.

4.4.4 Paquímetro Digital.

Foi utilizado para medição dos diâmetros dos pontos de solda um paquímetro digital com escala de 0,01mm conforme mostrado na figura 4.11.



Figura 4.11: Paquímetro digital para medição dos diâmetros dos pontos de solda.

4.4.5 Equipamento para os ensaios de tração.

A determinação da força máxima obtida no ensaio de tração foi comparada com a força mínima (1060 Kgf) através dos ensaios de tração. O equipamento utilizado foi fabricado pela empresa EMIC, como mostra a figura 4.12.



Figura 4.12: Equipamento utilizado nos ensaios de tração.

4.4.6 Corpo de prova para ensaio de tração e cisalhamento.

A figura 4.13 mostra um exemplo de corpo de prova utilizado para os ensaios de tração. As chapas foram sobrepostas e unidas com um único ponto de solda.



Figura 4.13: Exemplo de corpo de prova utilizado para os ensaios de tração.

Nestes ensaios foram gerados gráficos, pelo programa do equipamento de tração, a fim de observar as forças máximas atingidas pelos pontos de solda. A figura 4.14 apresenta um corpo de prova sendo tracionado para a verificação da tensão máxima de cisalhamento.



Figura 4.14: Ensaio de tração do ponto de solda.

4.5 Ensaio em laboratórios.

A medição do diâmetro do ponto de solda no plano da junção entre as chapas foi executada por meio de macrografias. Com auxílio de uma politriz, lixas, óxidos de alumina e um computador.

4.5.1 Equipamento para acabamento na superfície do ponto de solda.

A figura 4.15 mostra o equipamento (politriz) utilizado para acabamento na superfície do ponto de solda para análise e dimensionamento.



Figura 4.15: Politriz para acabamento no ponto de solda utilizada nos ensaios.

A figura 4.16 apresenta as lixas utilizadas para acabamento da superfície do ponto foram lixas (grão 220) e lixas (grão 600), como mostradas na figura 4.16.

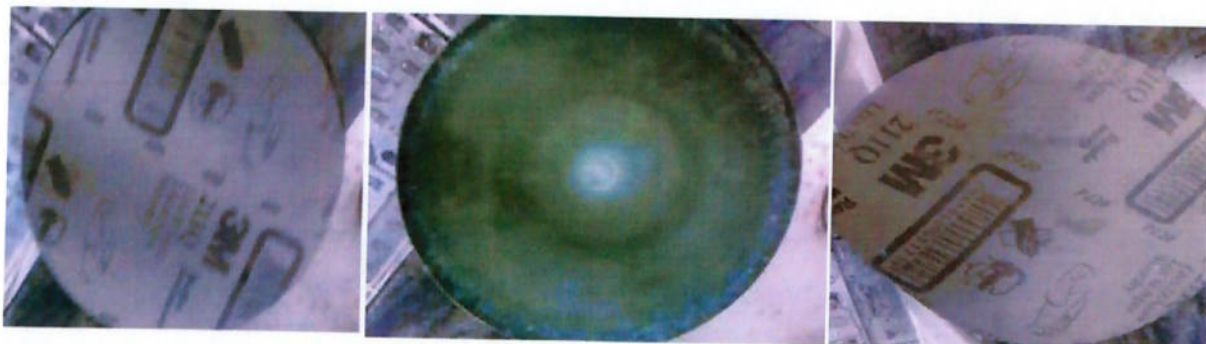


Figura 4.16: Lixas para o acabamento da superfície do ponto de solda .

4.5.2. Corpo de prova.

A figura 4.17 mostra a preparação dos corpos de prova para os ensaios de macrografia. Estes foram cortados das chapas sobrepostas e soldadas com um

único ponto de solda, com dimensões de 20 mm x 50 mm. Após isto, o ponto de solda foi cortado ao meio.

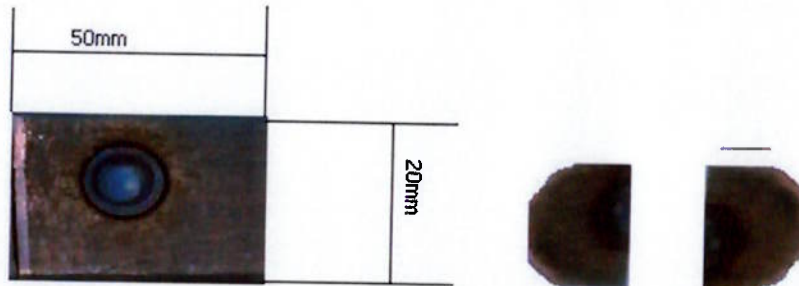


Figura 4.17: Corpo de prova para ensaios de macrografia.

A figura 4.18 apresenta um exemplo de medição do ponto de solda, executado no experimento por ensaio de macrografia.

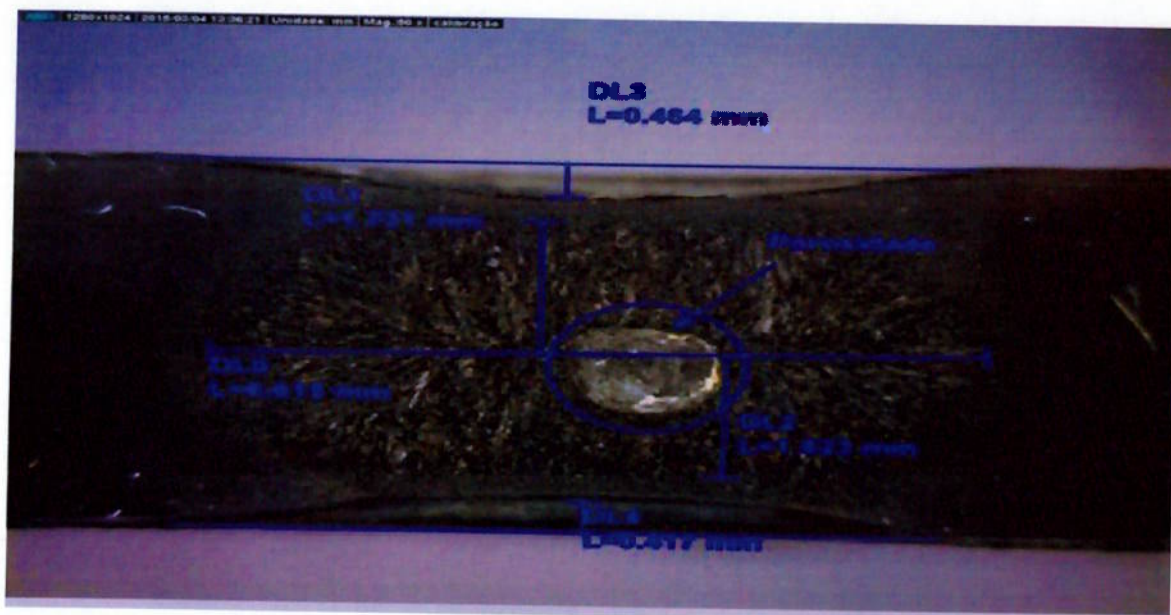


Figura 4.18: Exemplo de medição do ponto de solda, executado no experimento por ensaio de macrografia.

4.6 Ensaios Destrutivos.

Para os ensaios destrutivos foram utilizados os seguintes itens: uma morsa 12 polegadas, um martelo de 1 kg e uma talhadeira para romper os pontos de solda, como mostra na figura 4.19. Os pontos de solda foram rompidos com a talhadeira sem danificar a área soldada, com o intuito de se obter uma boa análise e dimensionamento.



Figura 4.19: Talhadeira, Morsa e Martelo para teste destrutivo.

4.6.1 Determinação do diâmetro mínimo do ponto de solda para os ensaios destrutivos.

Para a determinação do diâmetro mínimo do ponto de solda nos ensaios destrutivos (arrancamento) foram realizadas medições do eixo principal e do eixo

secundário (d1 e d2) do ponto de solda, com o auxílio de um paquímetro, conforme mostra a figura 4.20 [31].

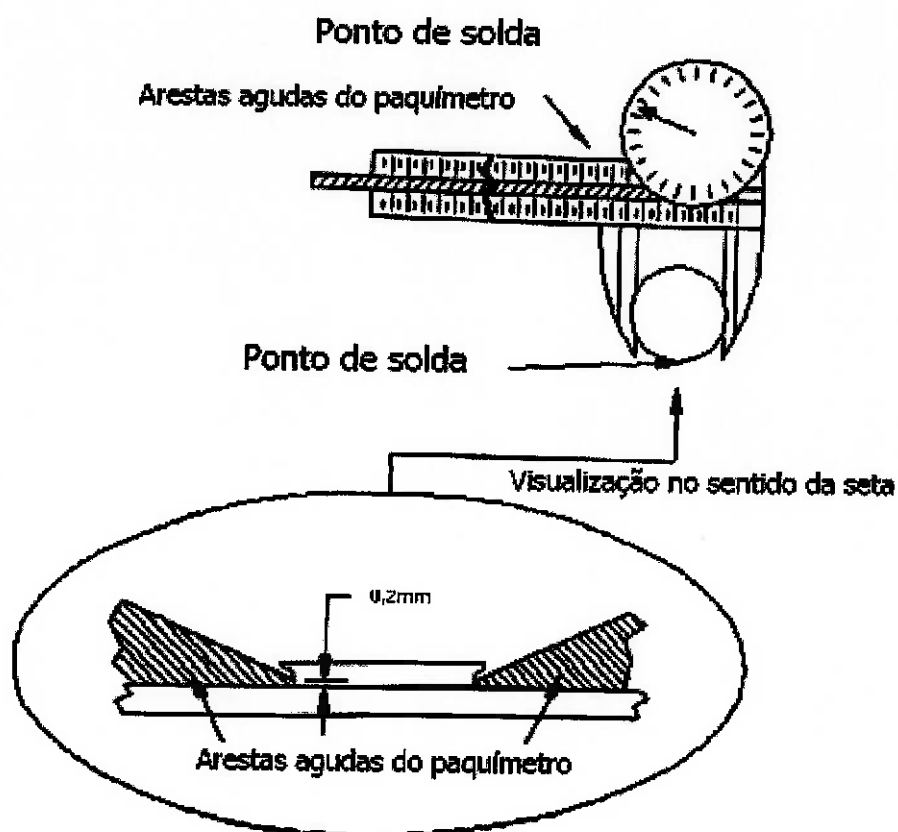


Figura 4.20: Medição do ponto de solda realizado nos ensaios destrutivos [31].

Sendo que, a segunda medição (d2) está defasada em 90° em relação à d1, conforme apresenta a figura 4.21. Portanto, o valor médio é determinado a partir das duas medições, obtido pela equação 8 :

$$DM = (d1 + d2) / 2 \quad (8)$$

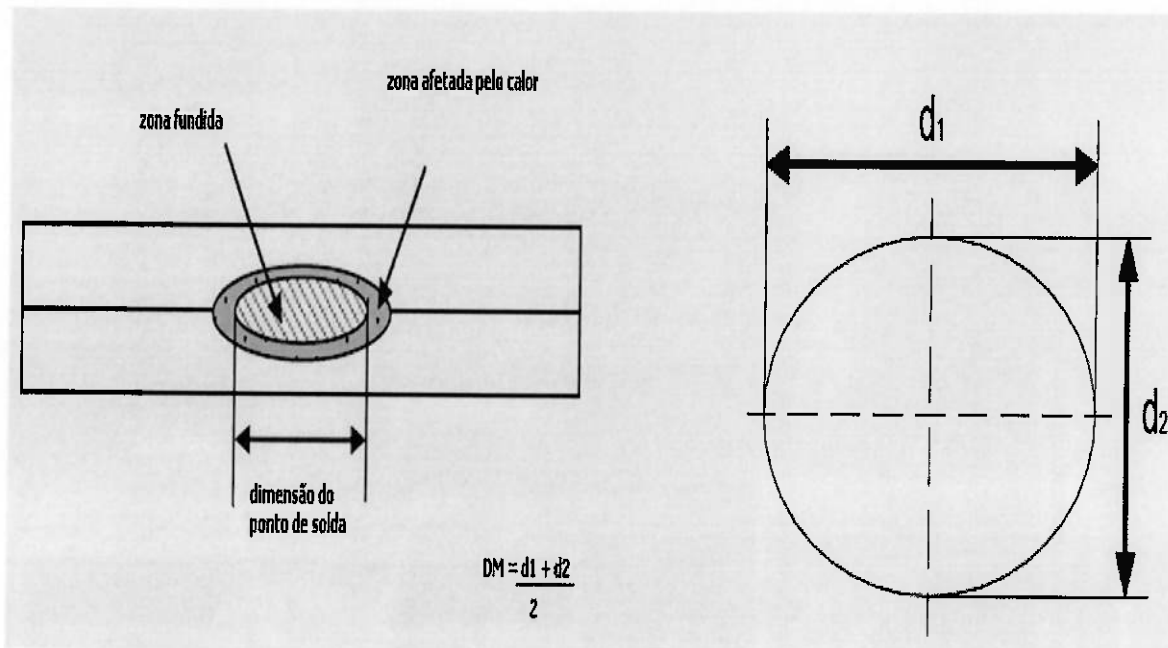


Figura 4.21: Determinação do valor médio do diâmetro do ponto de solda (DM) para os ensaios destrutivos [31].

Na tabela 4.3 apresenta o diâmetro mínimo do ponto de solda, aprovado conforme norma, em relação à espessura da chapa [31].

Tabela 4.2: Diâmetro mínimo do ponto de solda em relação à espessura da chapa, conforme norma [31].

Espessura determinada do material	Tamanho do ponto de solda
0,65 a 1,29 mm	4,0 mm
1,30 a 1,89 mm	5,0 mm
1,90 a 2,59 mm	6,0 mm
2,69 a 3,25 mm	7,0 mm

4.7 Determinação da dimensão da profundidade de indentação do ponto de solda.

A máxima profundidade de indentação do ponto de solda, aceitável conforme norma é de 30% em relação à espessura da chapa. O material utilizado nos ensaios é de espessura 2,5 mm, portanto, a profundidade máxima de indentação aceitável conforme norma é de 0,75 mm.

4.8 Determinação do diagrama de soldabilidade ou janela operacional.

Para a determinação do diagrama de soldabilidade ou da janela operacional (tempo versus corrente de soldagem) foi fixada uma força constante de 500 Kgf entre eletrodos de face esférica e uma força constante de 1000 Kgf entre os eletrodos de face plana. A aplicação da corrente no processo foi escalonada com intervalos de 100A, até que, pelo menos três amostras apresentassem o menor diâmetro do ponto atingível, igual ou acima do valor mínimo (6 mm) especificado no ensaio de arrancamento de acordo com a norma, utilizando talhadeira e martelo, conforme figura 4.19. Após o rompimento do ponto foi efetuada a medição com paquímetro e assim foi possível a aplicação da equação 08, a equação que determina o mínimo diâmetro do ponto de solda aceitável. A partir deste ponto foi acrescido 200A para a determinação final do limite mínimo da corrente de soldagem. Já para ser determinado o parâmetro máximo de corrente de soldagem, foi acrescido para cada ponto de solda 100A a partir do ponto mínimo, até o momento da expulsão de material. Portanto, foi determinado como ponto de máxima corrente, o ponto de expulsão menos 200A, conforme mostra figura 4.22.

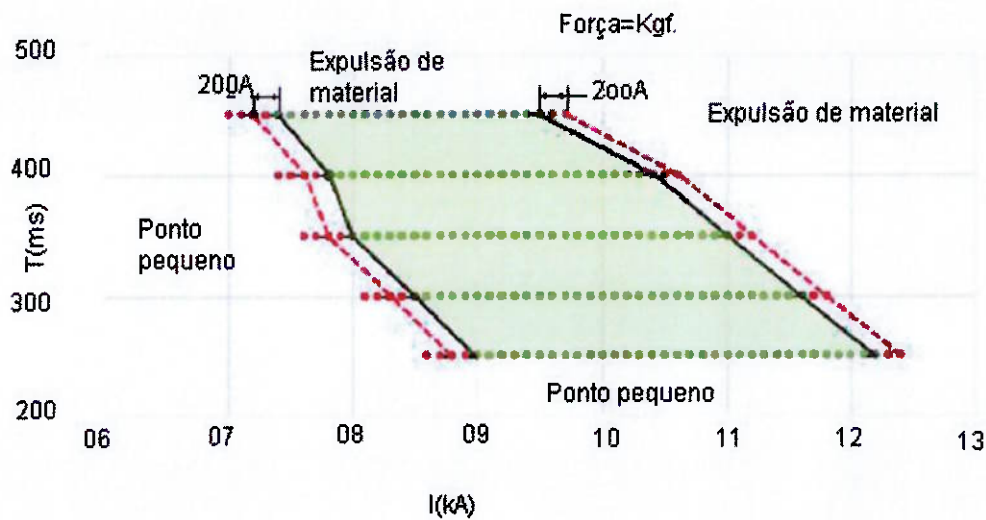


Figura 4.22: Metodologia para a determinação de Janela Operacional [21].

4.9 Determinação da força aplicada entre os eletrodos.

Para determinar a força aplicada entre os eletrodos, tanto para o eletrodo de face plana quanto para o eletrodo de face esférica, foi adotada a fórmula ou equação 6 apresentada no item 3.4.6 [21]:

$$F_{Total} = \sigma_{esc} \left[\left(\frac{e^2}{0,75} \right) + (\pi \times r^2) \right] \quad (6).$$

Onde:

σ_{esc} = Tensão de escoamento (Kgf/mm²)

e = Espessura da chapa (mm)

r = Raio de contato do eletrodo (mm)

4.9.1 Determinação da área de contato do eletrodo de face esférica (raio de 10 mm).

Para definir a área de contato do eletrodo de face esférica com raio de 10 mm, utilizou-se a técnica de impressão de carbono. Os eletrodos exercem força entre a folha de carbono e a folha de cartolina deixando uma impressão ou marca para o dimensionamento, como mostra a figura 4.23. A dimensão do diâmetro encontrado na área de contato do eletrodo esférico foi utilizada para definir a força total entre eletrodos e a densidade da corrente.

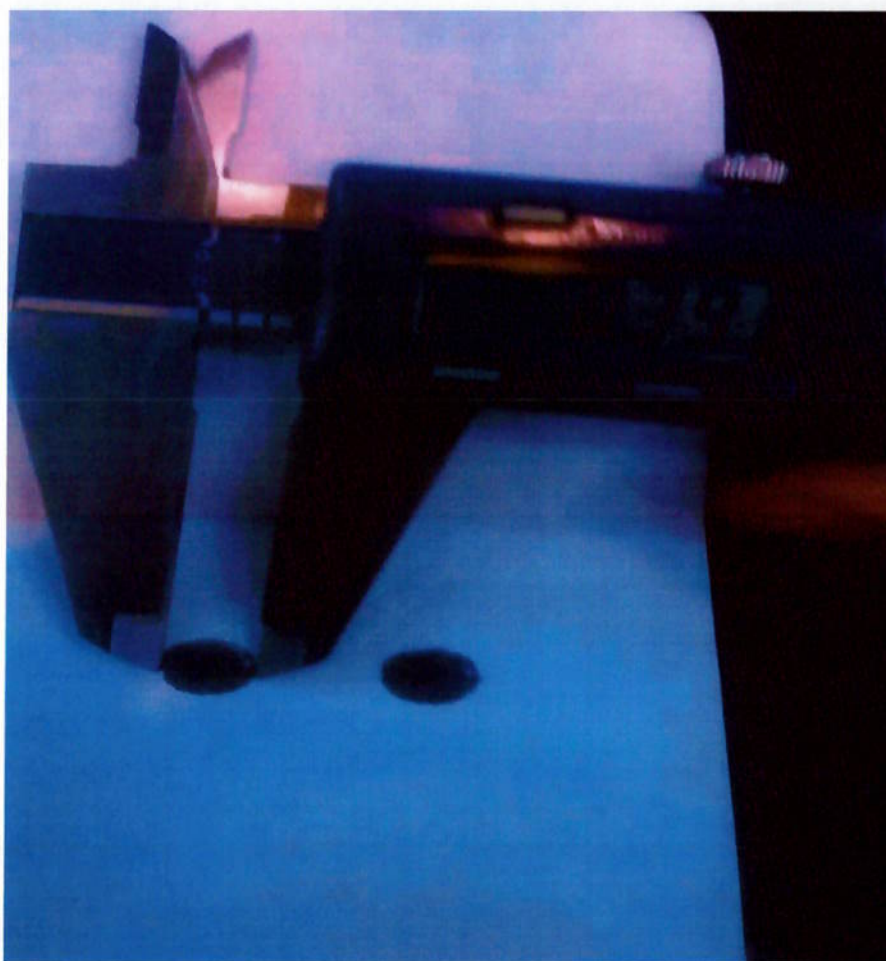


Figura 4.23: Técnica de impressão de carbono para determinação do diâmetro de contato para o eletrodo de face esférica.

4.10 Equipamento para monitorar as forças de soldagem durante os experimentos.

A figura 4.24 mostra o dinamômetro digital, com capacidade até 1330 Kgf, utilizado nos experimentos para calibração e monitoramento das forças entre os eletrodos durante as mudanças de parâmetros.

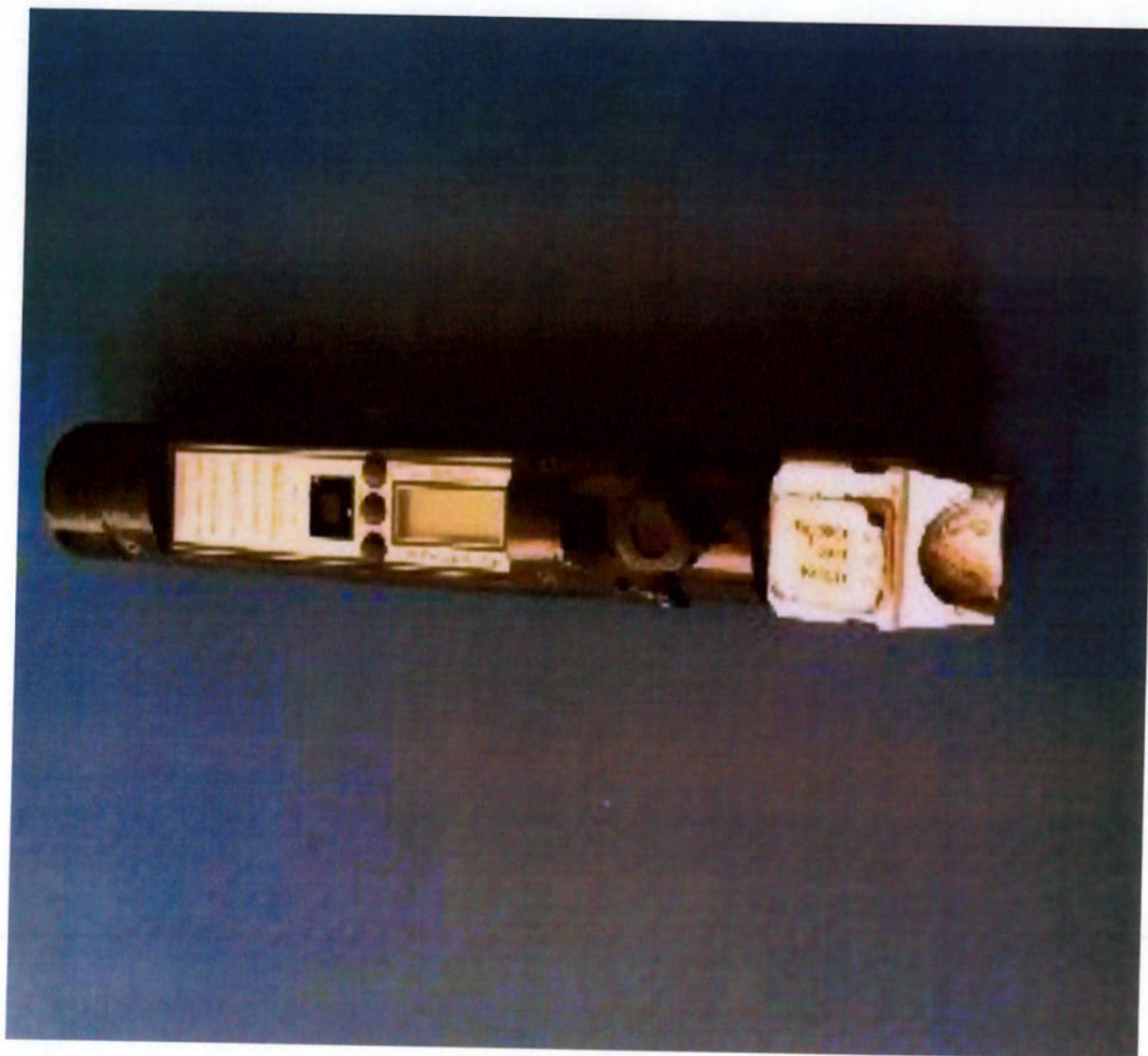


Figura 4.24: Dinamômetro digital utilizado nos experimentos para calibração e monitoramento das forças entre os eletrodos.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.

5.1 Determinação da força aplicada entre os eletrodos com face plana de contato e com face esférica de contato.

Para determinar a força total aplicada entre os eletrodos utilizou-se a equação descrita no item 4.8.1. Esta equação tem como variável a área de contato entre eletrodo/chapa, espessura e tensão de escoamento da chapa.

5.1.1 Cálculo da força aplicada entre os eletrodos com face plana de contato (diâmetro de 8 mm).

As variáveis para o cálculo da força necessária entre os eletrodos com diâmetro de contato de 08 mm (eletrodo/chapa) foram: raio de 04 mm, espessura da chapa de 2,5 mm e tensão de escoamento de 18kgf mm², conforme mostra a equação 9:

$$F_{\text{Total}} = 18 \left[\left(\frac{2,5^2}{0,75} \right) + (3,14 \times 4^2) \right] \quad (9)$$

$$F_{\text{Total}} = 1054 \text{ Kgf.}$$

Para o eletrodo de face plana foi utilizado uma força de 1000 kgf, devido que este valor é o máximo de força que o equipamento é capaz de aplicar.

5.1.2 Cálculo da força aplicada entre os eletrodos com face esférica de contato:

Para determinação da área de contato da face do eletrodo com raio esférico de 10 mm, utilizou-se a técnica da impressão de carbono, conforme apresentado no item 4.8.3. O diâmetro encontrado por esta técnica foi de 4,6 mm.

Portanto, as variáveis para o cálculo da força necessária entre os eletrodos com área de contato esférica (eletrodo/chapa) foram: raio de 2,3 mm, espessura da chapa de 2,5 mm e tensão de escoamento de 18kgf mm², conforme mostra a equação 10:

$$F_{\text{Total}} = 18 \left[\left(\frac{2,5^2}{0,75} \right) + (3,14 \times 2,3^2) \right] \quad (10)$$

$$F_{\text{Total}} = 448 \text{ Kgf.}$$

Foi utilizada uma força de 500 kgf, para ter um melhor monitoramento dos resultados com o dinamômetro.

5.2 Diagrama de soldabilidade para determinação dos parâmetros otimizados de soldagem (ponto ótimo):

Para a construção do diagrama de soldabilidade ou janela operacional foi levado em consideração o diâmetro mínimo (6 mm) e a força de tração mínima (1060Kgf) do ponto de solda. Com diagrama de soldabilidade foi possível encontrar os parâmetros ideais ou otimizados de soldagem, de acordo com a metodologia descrita no item 4.8. A força entre os eletrodos permaneceu constante em 500 Kgf e 1000 Kgf para os eletrodos de face esférico e face plana de contato, respectivamente, conforme mostrado no item 5.1.

5.2.1 Determinação dos diâmetros dos pontos de solda.

Os diâmetros dos pontos de solda foram dimensionados em seus extremos, onde se determinou a maior dimensão e a menor dimensão do ponto, para se obter o diâmetro médio "DM", conforme apresentado no item 4.6.1. Para este dimensionamento foi utilizado um paquímetro digital para maior precisão da área soldada como mostrado na figura 5.1.



Figura 5.1: Exemplo do dimensionamento do ponto de solda, utilizando um paquímetro digital.

Por exemplo, a maior dimensão no ponto: 7,68mm e a menor dimensão no ponto: 7,50mm, portanto, o diâmetro médio (DM) é:

$$DM = (7,68 + 7,50) / 2$$

$$DM = 7,59 \text{ mm.}$$

5.2.2 Ensaios com eletrodo de face reta com forças constantes de 500 kgf e 1000 Kgf.

Primeiro foi realizado a título de comparação, ensaios com o eletrodo de face plana de contato de 08 mm de diâmetro, com força constante entre os eletrodos de 500kgf. A figura 5.2 mostra o eletrodo de face plana utilizado nos ensaios com 500 kgf e 1000 Kgf.



Figura 5.2: Eletrodo de face plana com diâmetro de contato de 08 mm utilizado nos ensaios com 500kgf e 1000 Kgf.

A tabela 5.1 mostra os resultados do diâmetro médio (DM), obtido nos experimentos, utilizando o eletrodo de face plana (08 mm) com força constante de 500kgf.

Tabela 5.1: Experimentos com eletrodo face plana (08 mm) com força constante de 500 Kgf.

	Amostra	Corrente I (KA)	Tempo de soldagem (ms)	Observações	DM (mm)
500kgf	01	09	400		5,970
	02	08	450		4,650
	03	08	400		0
	04	10	400	Expulsão de material	0

Pode-se observar na tabela 5.1 que com o eletrodo de face plana de 08 mm utilizando uma força constante de 500 Kgf que não foi possível construir o diagrama de soldabilidade. Este resultado está relacionado com a instabilidade na formação

do ponto de solda, este fato é devido que a força entre os eletrodos é insuficiente para o completo assentamento entre as chapas. A figura 5.3 mostra um exemplo de uma medição do diâmetro médio do ponto de solda de 5,97 mm, que está abaixo do valor mínimo aprovado conforme norma (diâmetro 06 mm), realizado nos ensaios com eletrodo de face plana com força constante de 500 Kgf.

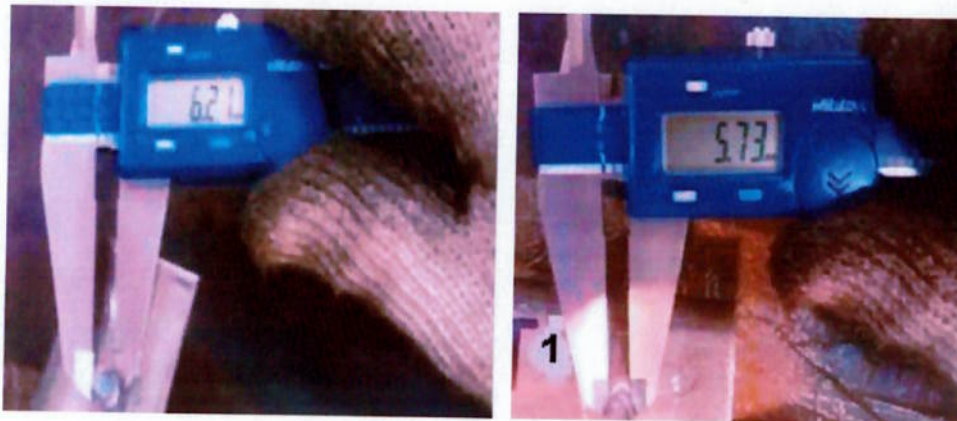


Figura 5.3: Dimensões da Amostra, diâmetro médio = $6,21 + 5,73 / 2 =$ DM= 5,97 (eletrodo de face reta com força constante de 500 kgf).

Ainda com relação aos resultados do eletrodo de face plana com força constante de 500 Kgf, a figura 5.4 mostra a falta de fusão, no ensaio de arrancamento, causada pela instabilidade na formação da área de contato entre as chapas.

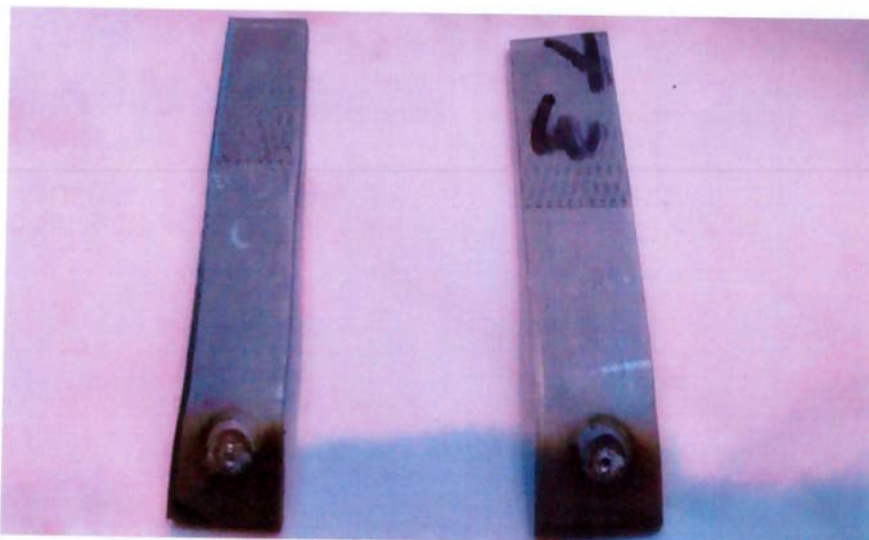


Figura 5.4: Amostra do ensaio de arrancamento com falta de fusão da área soldada.

Pode-se observar também nos experimentos com eletrodo de face plana com força constante de 500 Kgf um alto índice de material líquido expulso no ponto de solda. Este resultado está relacionado com uma alta densidade de corrente de soldagem. Isto é devido à falta de assentamento entre as chapas, causada por uma força insuficiente para o completo assentamento entre as mesmas, na área de contato durante a passagem de corrente elétrica.

A figura 5.5 mostra um ponto de solda com expulsão de material líquido, devido à alta densidade de corrente, causada por uma força insuficiente entre os eletrodos.



Figura 5.5: Expulsão de material líquido, devido a alta densidade de corrente causada por uma força insuficiente entre os eletrodos.

5.2.3 Ensaio com eletrodo de face plana com força constante entre os eletrodos de 1000kgf.

Para determinar o diagrama de soldabilidade ou janela operacional com eletrodo de face reta de diâmetro de contato (eletrodo/chapa) de 08mm com uma força constante de 1000kgf, foi utilizado a metodologia descrita no item 4.4.

A tabela 5.2, mostra os resultados do diâmetro médio obtido nos experimentos, utilizando o eletrodo de face plana (08 mm) com força constante de 1000Kgf.

Tabela 5.2: Experimentos com eletrodo face plana (08 mm) com força constante entre eletrodos de 1000kgf.

1000 KGF.	Amostra	Corrente I (KA)	Tempo de soldagem. (ms)	Observações	DM (mm)
	01	11	300		7, 590
	02	11	250		7, 636
	03	11	200		7, 146
	04	11	350		7, 442
	05	11	400		7, 650
	06	10.30	400		6, 477
	07	10.18	500		6, 876
	08	11	600		7, 350
	09	08	600	Ponto Pequeno	5, 400
	10	09	600	Ponto Pequeno	5, 800
	11	12	250		6, 500
	12	12	200	Ponto Pequeno	5, 800
	13	12	300		7, 030
	14	12	350	Expulsão de material	7, 456
15	12	400	Expulsão de material	7, 580	

Pode-se notar na tabela 5.2 que para o eletrodo de face plana (08 mm) com força constante de 1000 Kgf as correntes e os tempos de soldagem mínimo e máximo, considerando o ponto de solda acima do diâmetro mínimo conforme norma (06mm) e sem expulsão de material líquido, respectivamente, foram: 10,3 I(KA) e 12 I(KA) e 200 ms e 600 ms.

Ainda pela análise da tabela 5.2, é possível notar também que o diâmetro mínimo e máxima encontrados, considerando o ponto de solda acima do diâmetro mínimo conforme norma (06 mm), respectivamente, foram: 6,5 mm e 7,65 mm.

5.2.4 Ensaio realizado com eletrodo face esférica e com força constante entre os eletrodos de 500kgf.

Para determinar o diagrama de soldabilidade ou janela operacional com eletrodo de face esférica de diâmetro de contato (eletrodo/chapa) de 4,6 mm com uma força constante de 500kgf, foi utilizada a metodologia descrita no item 4.4.



Figura 5.6: Eletrodo de face esférica com diâmetro de contato de 4,6 mm utilizado nos ensaios com 500kgf.

A tabela 5.3 mostra os resultados do diâmetro médio (DM), obtido nos experimentos, utilizando o eletrodo de face esférica com diâmetro de contato de 4,6mm com força constante entre os eletrodos de 500Kgf.

Tabela 5.3: Experimentos com eletrodos de face esféricas com diâmetro de contato de 4,6mm e força constante entre eletrodos de 500kgf.

	Amostra	Corrente I (KA)	Tempo de soldagem (ms)	Observações	DM (mm)
500 kgf	01	09	400		6,994
	02	10	250	Porosidade	6,615
	03	09	300		6,341
	04	09	450		7,295
	05	08	400		6,602
	06	10	333	Expulsão de material	7,804
	07	10	360	Expulsão de material	7,161
	08	10	300		7,305
	09	10	266		7,832
	10	09	266	Ponto pequeno	5,152
	11	09	300		6,884
	12	09	333		6,948
	13	08	333		6,518
	14	08	366		7,224
	15	08	450		6,974

Observa-se na tabela 5.3 que para o eletrodo de face esférica com força constante de 500 Kgf as correntes e os tempos de soldagem mínimo e máximo, considerando o ponto de solda acima do diâmetro mínimo conforme norma (06 mm)

e sem expulsão de material líquido, respectivamente, foram: 8,0 I (KA) e 10 I (KA) e 250 ms e 450 ms.

Pode-se observar também na tabela 5.3, que o diâmetro mínimo e máxima encontrados, considerando o ponto de solda acima do diâmetro mínimo conforme norma (06 mm), respectivamente, foram: 6,34 mm e 7,83 mm.

Ainda pela análise das tabelas 5.2 e 5.3, é possível notar que, em geral, para o eletrodo de face esférica, as correntes e os tempos de soldagem mínimo e máximo, apresentaram-se menores em 22%, 17% e 0%, 25%, respectivamente, se comparado ao eletrodo de face plana. Este resultado está relacionado com maior à densidade de corrente apresentado para o eletrodo de face esférica. Este fato é devido à menor área de contato entre eletrodo/chapa.

De modo geral, também pode-se observar que os diâmetros dos pontos de solda encontrados dentro da janela operacional para o eletrodo de face plana, não apresentaram diferenças significativas, se comparado com os diâmetros dos eletrodos de face esférica.

5.2.5 Ensaio de tração.

Foram realizados ensaios de tração para todos os pontos de solda, tanto para eletrodo esférico quanto para eletrodos de face plana. O resultado da força máxima de tração em Kgf, para cada ponto de solda, foi descrito nas tabelas 5.4 e 5.5, respectivamente.

As figuras 5.7 e 5.8 mostram exemplos de gráficos gerados pelo programa do equipamento de tração, a fim de observar as forças máximas atingidas pelos pontos de solda. A força mínima de tração conforme norma, para espessura de chapa de 2,5 mm, é de 1060 Kgf.

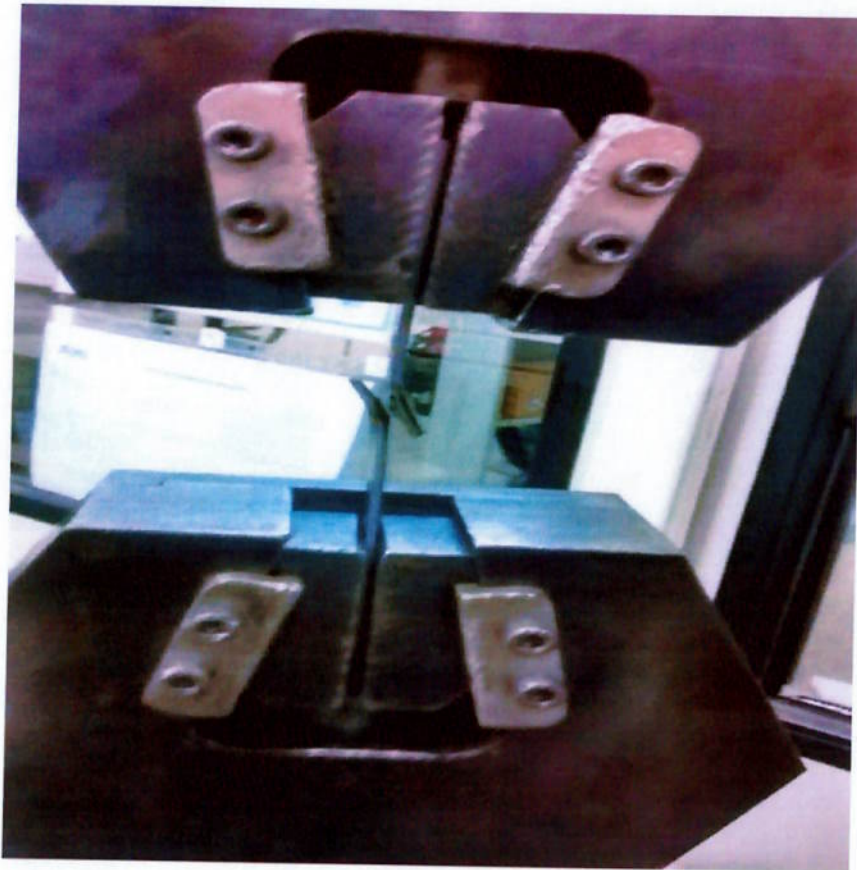


Figura 5.9: Ensaio de tração de cisalhamento realizado nos experimentos.

Nestes ensaios pode-se observar dois modos de falhas, o rompimento no contorno do ponto da área soldada ou o rompimento no próprio material de base, como mostra a figura 5.10, respectivamente.

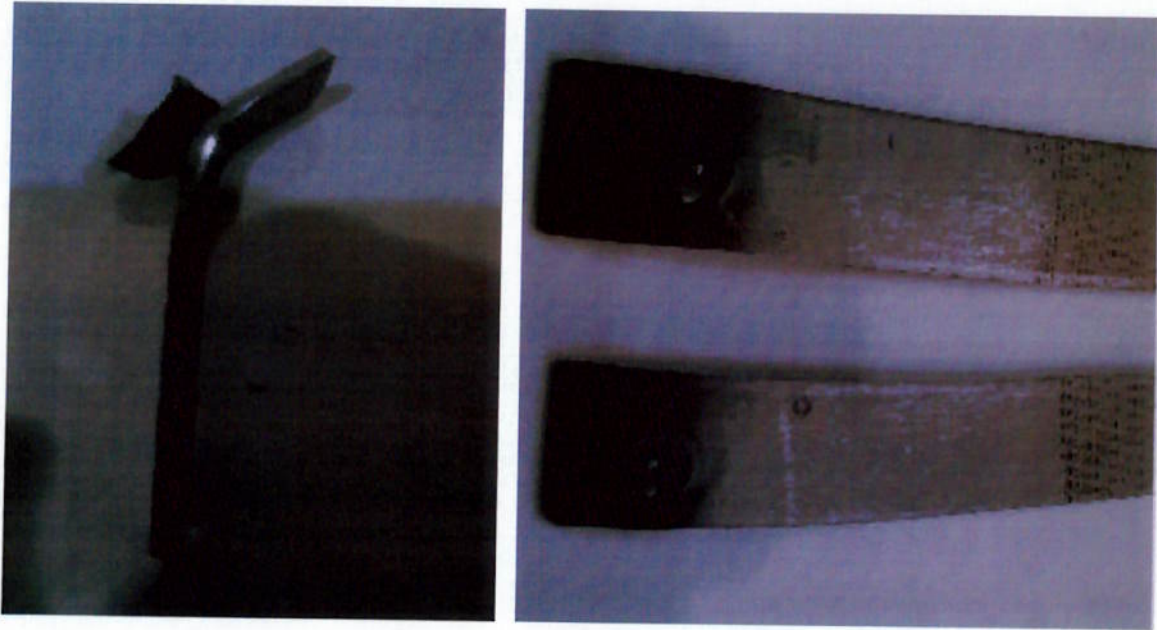


Figura 5.10: Modos de falhas apresentado nos ensaios de tração: no material de base e no contorno do ponto, respectivamente.

A tabela 5.4 mostra os parâmetros de soldagem (corrente e tempo) e os resultados do diâmetro médio (DM), assim como, os resultados dos ensaios de tração em Kgf, referente aos experimentos com eletrodo de face plana e força constante de 1000 Kgf.

Tabela 5.4: Parâmetros de soldagem (corrente e tempo); diâmetro médio (DM); força de tração em kgf (eletrodo de face plana a força constante de 1000kgf).

1000 KGF.	Amostra	Corrente I (KA)	Tempo de soldagem. (MS)	Resultado	DM (mm)	Tração Força Max. (Kgf)
	01	11	300		7, 590	1.617
	02	11	250		7, 636	1.702
	03	11	200		7, 146	1.640
	04	11	350		7, 442	1.651
	05	11	400	Expulsão de material	7, 650	1.094
	06	10.30	400		6, 477	1.150
	07	10.18	500		6, 876	1.360
	08	11	600		7, 350	1.173
	09	08	600	Ponto Pequeno	5, 400	1.151
	10	09	600	Ponto Pequeno	5, 800	1.106
	11	12	250		6, 500	1.150
	12	12	200	Ponto Pequeno	5, 800	1.060
	13	12	300		7, 030	1.943
	14	12	350	Expulsão de material	7, 456	1.948
15	12	400	Expulsão de material	7, 580	1.916	

A tabela 5.5 mostra os parâmetros de soldagem (corrente e tempo) e os resultados do diâmetro médio (DM), assim como, os resultados dos ensaios de tração em Kgf, referente aos experimentos com eletrodo de face esférica e força constante de 500 Kgf.

Tabela 5.5: Parâmetros de soldagem (corrente e tempo); diâmetro médio (DM); força de tração em Kgf (eletrodo de face esférica e força constante de 500Kgf).

	Amostra	Corrente I (KA)	Tempo de soldagem (ms)	Observações	DM (mm)	Tração Força Max. (Kgf)
500 kgf	01	09	400		6,994	1.147
	02	10	250	Porosidade	6,615	1.480
	03	09	300		6,341	1.512
	04	09	450		7,295	1.640
	05	08	400		6,602	1.401
	06	10	333	Expulsão de material	7,804	1.617
	07	10	360	Expulsão de material	7,161	1.702
	08	10	300		7,305	1.674
	09	10	266		7,832	1.651
	10	09	266	Ponto pequeno	5,152	1.145
	11	09	300		6,884	1.346
	12	09	333		6,948	1.173
	13	08	333		6,518	1.151
	14	08	366		7,224	1.106
	15	08	450		6,974	1.155

5.2.6 Diagrama de soldabilidade para determinação dos parâmetros otimizados de soldagem (ponto ótimo), utilizando eletrodo de face plana (08mm) e força constante de 1000Kgf.

Para a construção do diagrama de soldabilidade ou janela operacional foram plotados os resultados da tabela 4.6, levando em consideração o ponto de solda aprovado conforme norma (Limite mínimo: diâmetro mínimo (6 mm); Limite máximo: expulsão de material líquido e a força de tração mínima (1060Kgf) do ponto de solda). A figura 5.11 apresenta o diagrama operacional ou janela operacional, tempo versus corrente de soldagem com força constante entre os eletrodos de 1000kgf.

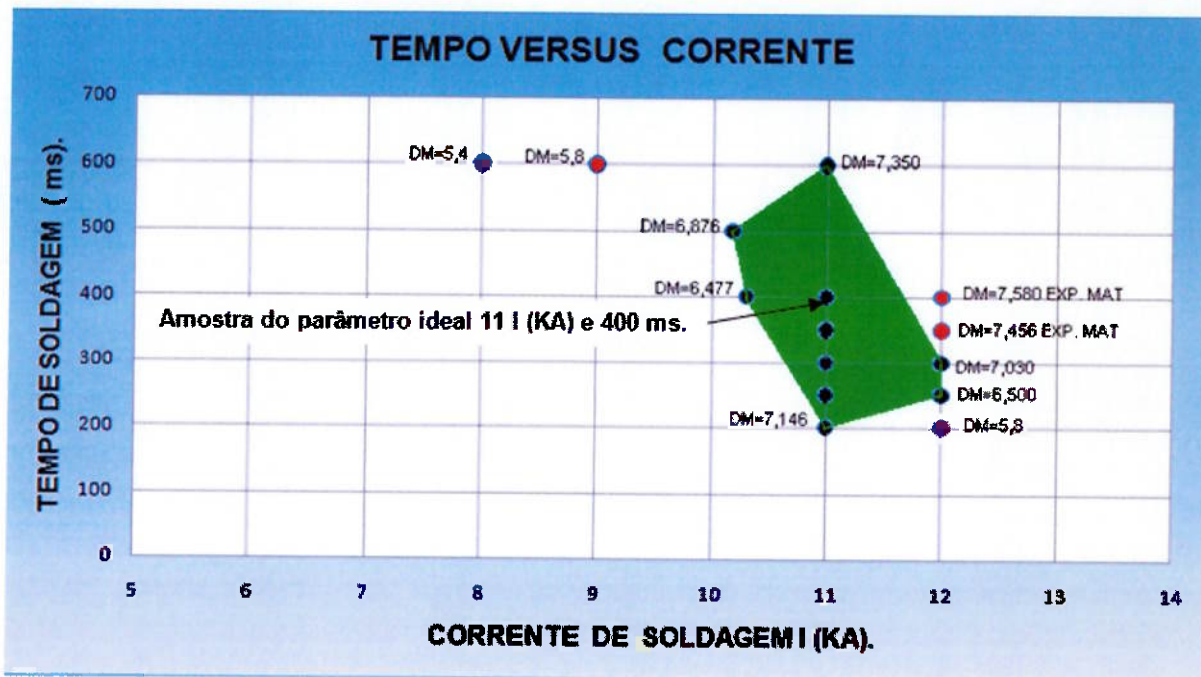


Figura 5.11: Diagrama de soldabilidade para eletrodo de face plana (08mm) e força constante de 1000Kgf

Depois de construída a janela operacional, foi localizado um ponto de maior grau de liberdade, para a determinação dos parâmetros otimizados. Portanto, os parâmetros otimizados de soldagem (ponto ótimo) para o eletrodo de face plana (08 mm) com força constante de 1000 Kgf foram:

- Tempo: 400 ms
- Corrente: 11 I (kA)

5.2.7 Diagrama de soldabilidade para determinação dos parâmetros otimizados de soldagem, utilizando eletrodo de face esférica (4,6 mm) e força constante de 500Kgf.

Para a determinação do diagrama de soldabilidade ou janela operacional foram plotados os resultados da tabela 4.7, levando em consideração o ponto de solda aprovado conforme norma (Limite mínimo: diâmetro mínimo (6mm); Limite máximo: expulsão de material líquido e a força de tração mínima (1060Kgf) do ponto de solda). A figura 5.12 apresenta o diagrama operacional ou janela operacional, tempo versus corrente de soldagem com força constante entre os eletrodos de 500kgf.

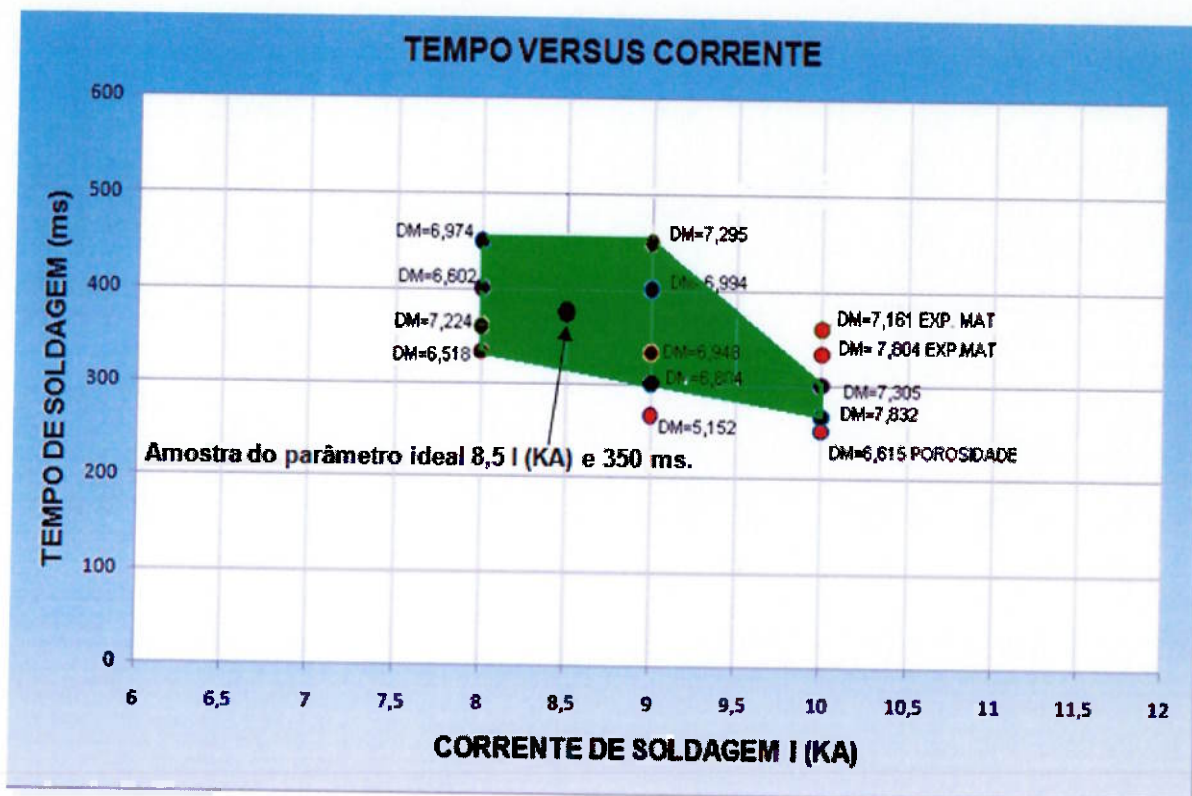


Figura 5.12: Diagrama de soldabilidade para eletrodo de face esférica (4,6 mm) e força constante de 500 Kgf.

Após a construção da janela operacional, foi localizado um ponto de maior grau de liberdade, para a determinação dos parâmetros otimizados. Portanto, os parâmetros otimizados de soldagem (ponto ótimo) para o eletrodo de face esférica (4,6 mm) com força constante de 500 Kgf foram:

- Tempo: 350 ms
- Corrente: 8,5 I (kA)

Ainda pela análise das figuras 5.11 e 5.12, é possível notar que para o eletrodo de face esférica utilizando força constante de 500 Kgf, o tempo e a corrente otimizados de soldagem, apresentaram-se menores em 12,5% e 22,7%, respectivamente, se comparado ao eletrodo de face plana. Este resultado está relacionado com maior à densidade de corrente apresentado para o eletrodo de face esférica. Este fato é devido à menor área de contato entre eletrodo/chapa.

5.3 Comparação das dimensões (macrografia) e resistência mecânica (ensaio de tração), utilizando os parâmetros otimizados de soldagem (ponto ótimo) entre o eletrodo de face plana e o eletrodo de face esférica.

Nos itens 5.3.1 e 5.3.2, mostra a comparação das dimensões (macrografia) e resistência mecânica (ensaio de tração), utilizando os parâmetros otimizados de soldagem ou ponto ótimo (apresentados nos itens 5.2.6 e 5.2.7) entre o eletrodo de face plana e o eletrodo de face esférica.

5.3.1 Dimensões (macrografia) e resistência mecânica (ensaio de tração), utilizando os parâmetros otimizados de soldagem (ponto ótimo) para eletrodo de face plana (08 mm) com força constante de 1000Kgf.

As figuras 5.13 a 5.15, a seguir, mostram as dimensões realizadas através dos ensaios de macrografia e os gráficos de resistência mecânica obtidos com ensaios de tração, respectivamente. Para isto, foi utilizado os parâmetros otimizados de soldagem (ponto ótimo) para eletrodo de face plana (08 mm) com força constante de 1000Kgf. Foram realizados três ensaios e depois calculado a média entre os mesmos.

A tabela 5.6 apresenta às dimensões, assim como, a força de tração do ponto de solda. E também mostra a média destes resultados.

Tabela 5. 6: Dimensões e a força de tração do ponto de solda para o eletrodo de face plana com força de 1000 Kgf, utilizando parâmetros otimizados.

Parâmetros de soldagem							
Eletrodo com face reta de 08 mm	DL0=(mm)	DL01+DL2 (mm)	DL03+ DL04/2 Ind.(mm)	Tração (Kgf)	F(Kgf)	t (ms)	I (KA)
1º ensaio	7, 380	3, 867	0, 1405	277,5	1000	400	11
2º ensaio	7, 932	3, 977	0,1475	304,1	1000	400	11
3º ensaio	7, 224	3, 054	0, 2455	211,0	1000	400	11
Médias dos ensaios.	7, 512	3, 632	0, 1775	264, 2	1000	400	11

5.3.2 Dimensões (macrografia) e resistência mecânica (ensaio de tração), utilizando os parâmetros otimizados de soldagem (ponto ótimo) para eletrodo de face esférica (4,6 mm) com força constante de 500Kgf.

As figuras 5.16 a 5.18 apresentam as dimensões realizadas através dos ensaios de macrografia e os gráficos de resistência mecânica obtidos com ensaios de tração, respectivamente. Para isto, foram utilizados os parâmetros otimizados de soldagem (ponto ótimo) para eletrodo de face esférica (4,6 mm) com força constante de 500 Kgf. Foram realizados três ensaios e depois calculado a média entre os mesmos.

A tabela 5.7 apresenta às dimensões, assim como, a força de tração do ponto de solda. E também mostra a média destes resultados.

Tabela 5.7: Dimensões e a força de tração do ponto de solda para o eletrodo de face esférica com força de 500 Kgf, utilizando parâmetros otimizados.

Parâmetros de soldagem							
Eletrodo com face esférica, área de contato 4,3 mm	DL0=(mm)	DL01+DL2 (mm)	DL03+DL04/2 Ind.(mm)	Tração (Kgf)	Força (Kgf)	t (ms)	Corrente I (KA)
1º ensaio	6,408	3,194	0,440	281,8	500	350	8,5
2º ensaio	6,058	2,983	0,4325	272,7	500	350	8,5
3º ensaio	6,994	3,595	0,267	232,1	500	350	8,5
Médias dos ensaios.	6,486	3,257	0,3795	262,2	500	350	8,5

5.3.3 Comparação dos resultados das médias das dimensões e da resistência mecânica do ponto de solda, entre o eletrodo de face plana e o de eletrodo de face esférica.

A fim de apresentar um comparativo entre o eletrodo de face plana e o eletrodo de face esférica foi construído a tabela 5.8, que mostra os resultados das médias das dimensões e força de tração dos pontos de solda, obtidos com parâmetros otimizados de soldagem.

Tabela 5.8: Médias das dimensões e da resistência mecânica entre o eletrodo de face plana e o de eletrodo de face esférica.

Parâmetros de soldagem							
Eletrodo com face.plana e esférica Médias dos ensaios	DL0=(mm)	DL01+DL2 (mm)	DL03+DL04/2 Ind.(mm)	Tração (Kgf)	F(Kgf)	t (ms)	Corrente I (KA)
Face plana. Diâm. 08 mm	7,512	3,632	0,1775	264,2	1000	400	11
Face esférica área de contato de 4,3.	6,486	3,257	0,3795	262,2	500	350	8,5

Pode-se observar na tabela 5.8 que apesar do diâmetro do ponto de solda realizado com o eletrodo de face plana apresentar-se maior em média 13,6% o diâmetro do ponto de solda realizado com o eletrodo de face esférico mostra-se aprovado conforme norma (diâmetro mínimo: 06 mm). Nota-se também que a indentação do ponto de solda realizado com eletrodo esférico apresentou-se maior 55,8% se comparado ao ponto de solda realizado com o eletrodo de face plana, apesar deste resultado ambos estão aprovados conforme norma (máxima indentação 30% da espessura da chapa). Este fato está relacionado com a maior pressão para o eletrodo de face esférica, devido à menor área de contato entre eletrodo/chapa. É possível notar também, em relação à força de tração, que não foi observado diferenças significantes nos resultados, ambos apresentam-se aprovados conforme norma (força mínima de tração: 1060 Kgf).

Ainda pela análise da tabela 5.8, em relação aos parâmetros de soldagem, nota-se que para produzir um ponto de solda aprovado conforme norma, os parâmetros utilizados para o eletrodo de face esférica apresentaram-se menores em: 50% (força - Kgf); 22,7% (corrente - kA) e 12,5% (tempo - ms). Este resultado está relacionado com a maior densidade de corrente elétrica durante a soldagem. Isto é devido à menor área de contato do eletrodo esférico se comparada ao eletrodo de face plana.

5.3.4 Análise da correlação entre a pressão versus densidade de corrente de soldagem, entre o eletrodo de face plana e o de eletrodo de face esférica.

A equação 11 apresenta a fórmula da densidade de corrente (A/mm^2) e em seguida o cálculo, para o eletrodo de face esférica, sendo que, o seu diâmetro de contato entre eletrodo/chapa é de 4,6 mm. Portanto, para o eletrodo de face esférica com diâmetro de contato eletrodo/chapa de 4,6 mm e uma corrente de soldagem de 8500 A, a densidade de corrente elétrica (D) é de:

$$D = \frac{I (A)}{\text{Área (mm)}} = \quad (11)$$

$$D = \frac{8,500 (A)}{\pi \times 2,3^2} =$$

$$D = \frac{8,500}{16,62} =$$

$$\underline{D = 511,4 \text{ A/mm}^2}$$

A equação 12 mostra a fórmula da pressão (Kgf/mm²) e em seguida o cálculo, para o eletrodo de face esférica, com diâmetro de contato entre eletrodo/chapa de 4,6 mm. Portanto, para o eletrodo de face esférica com diâmetro de contato eletrodo/chapa de 4,6 mm e uma força de 500 Kgf, a pressão (P) entre os eletrodos é de:

$$P = \frac{\text{Força (Kgf)}}{\text{Área (mm}^2)} = \quad (12)$$

$$P = \frac{500 (\text{kgf})}{\pi \times 2,3^2} =$$

$$\underline{P=30,1\text{Kgf/ mm}^2}$$

Portanto, para o eletrodo de face esférica de contato a densidade de corrente (D) e a pressão (P) entre os eletrodos, respectivamente, são:

$$\underline{D = 511,4 \text{ A/mm}^2}$$

$$\underline{P = 30,1\text{Kgf/ mm}^2}$$

Considerando a equação 11, foi possível calcular também a densidade de corrente para o eletrodo de face plana de contato. Portanto, para o eletrodo de face

plana com diâmetro de contato eletrodo/chapa de 08 mm e uma corrente de soldagem de 11000 A, a densidade de corrente elétrica (D) é de:

$$D = \frac{11000 \text{ (A)}}{(\pi \times 4^2)} =$$

$$D = \frac{11000}{50,24} =$$

$$\underline{D = 218,94 \text{ A/mm}^2}$$

Considerando a equação 12, foi possível calcular também a pressão para o eletrodo de face plana de contato. Portanto, para o eletrodo de face plana com diâmetro de contato eletrodo/chapa de 08 mm e uma força entre os eletrodos de 1000 Kgf, a pressão (P) é de:

$$P = \frac{1000 \text{ (kgf)}}{(\pi \times 4^2)}$$

$$\underline{P = 19,98 \text{ Kgf/ mm}^2}$$

Portanto, para o eletrodo de face plana de contato a densidade de corrente (D) e a pressão (P) entre os eletrodos, respectivamente, são:

$$\underline{D = 218,94 \text{ A/mm}^2}$$

$$\underline{P = 19,98 \text{ Kgf/ mm}^2}$$

A figura 5.19 mostra o gráfico da densidade de corrente (A/mm²) versus pressão (Kgf/mm²). A fim de, apresentar um comparativo entre o eletrodo de face plana e o eletrodo de face esférica.



Figura 5.19: Gráfico da Densidade de corrente (A/mm²) versus pressão (Kgf/mm²), com relação ao eletrodo de face plana e o eletrodo de face esférica.

Pode-se observar no gráfico que para o eletrodo de face esférica com diâmetro de contato de 4,6 mm a pressão apresentou-se maior em 66,4% se comparada ao eletrodo de face plana com diâmetro de 08 mm. Nota-se também que, apesar da corrente de soldagem ser menor em 22,7% para o eletrodo de face esférica com diâmetro de contato de 4,6 mm, a densidade de corrente mostrou-se maior em 42,7% se comparada ao eletrodo de face plana com diâmetro de 08 mm. Estes resultados, tanto da pressão quanto da densidade de corrente, estão relacionados com a área de contato entre eletrodo/chapa. Portanto, para uma produção robusta o controle da área de contato é muito importante. Este fato é devido que a única variável durante o processo produtivo é a área de contato por causa da sua deformação, os outros parâmetros: tempo, corrente e força são constantes.

6. CONCLUSÕES.

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

1. A força de soldagem entre os eletrodos de face esférica com diâmetro de contato de 4,6 mm apresentou-se menor em 50% se comparada ao eletrodo de face plana com diâmetro de contato de 08 mm. Este fato é devido que quanto menor o diâmetro de contato maior será a pressão na região de soldagem, fazendo com que as chapas tenham um melhor assentamento entre suas interfaces. Este resultado permite uma vantagem financeira, tendo em vista que quanto menor a força do equipamento mais barato ele se torna.
2. Os parâmetros de soldagem (tempo e corrente) do eletrodo de face esférica de contato apresentaram-se menores em 12,5% e 22,7%, respectivamente, se comparado ao eletrodo de face plana de contato. Este fenômeno está relacionado com a menor densidade de corrente apresentada para o eletrodo de face esférica. Pode-se concluir que quanto maior a densidade de corrente maior será a geração de calor durante a soldagem. Este resultado permite uma otimização para o processo produtivo, tanto em tempo de produção quanto em relação à economia de energia elétrica.
3. Quanto menor o diâmetro de contato entre eletrodo/chapa maior será: a densidade de corrente e a pressão entre os eletrodos. Este fato faz com que a geração de calor seja maior durante a soldagem e também melhore o assentamento entre chapas. Pode-se concluir que a escolha correta da face de contato entre eletrodo/chapa é fundamental para a otimização deste processo, no que se refere à economia de tempo de processo, energia elétrica (corrente) e custo de equipamento.

7. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.

1. Estudar a influência de eletrodo com classes diferentes na densidade da corrente de soldagem.
2. Estudar a influência da camada de ZN na densidade da corrente de soldagem.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

1. PETRÔNIO, M.G.; LAUGENI, F.P. Administração da produção e operações. ED. Especial Anhanguera - São Paulo: Saraiva, 2009, 562pgs. 2-3-73.
2. WAINER, E; BRANDI, S. D; MELO, F. D. H. Soldagem: Processos e Metalurgia. São Paulo: Edgar Blücher, 1992, 494 pgs. 1-8.
3. MORRIS, J, L.Welding Processes and Procedures.Prentice-Hall, Inc, New York, Copyright, 1954,250 pgs.48pg.
4. WAINER, E; BRANDI S. D; MELO F. D. H. Soldagem: Processos e Metalurgia. São Paulo: Edgar Blücher, 1992, 494 pgs. 217-242.
5. WIKIPEDIA. Elihu Thomson. Disponível em 11/11/2014:
http://en.wikipedia.org/wiki/Elihu_Thomson.
6. Lei de Ohm SITE: Disponível em 27/02/2015.
http://pt.wikipedia.org/wiki/Lei_de_Ohm.
7. AMERICAN WELDING SOCIETY.Resistance Welding.London: Reinhold Publishing Corporation, Chapman & Hall, 1956, 163pgs, 16-17pg.
8. MARQUES, P. MODENESI, P.J; BRANCARENSE, A.Q: Soldagem fundamentos e tecnologia. Minas Gerais: Editora UFMG, 2009, 363 pgs. 293-306.
9. Apostila MARIMAX maquina de solda, Google: Disponível em 13/11/2014.
http://www.infosolda.com.br/images/Downloads/Artigos/processos_solda/apostila-solda-por-resistencia.pdf
10. BRANDÃO, J.S apostila de solda a ponto Bronze metal. 11/01/2012, pdf.
11. WELDING SCIENCE. Manual de treinamento de soldagem por resistência. São Paulo, 2009. 82pg.
12. Apostila de solda Tecnowelding. E-mail: tecnowelding@terra.com.br, 15 pgs, Tecnowelding Comércio Ltda. Disponível em 22/12/2014.
13. Intermachinery Comércio Ltda., Palestra de solda Intermachinery, São Paulo, 2003.52 slide.
14. ZHANG,H;Senkara,J:RESISTANCE WELDING: Fundamentals and Applications.1.ed. London: Taylor & Francis,206,431 p.
15. HOLDCROFT,P.T.-Welding Process Technology;Cambridge University Press, 1ª ed,England,1979,363 p.

16. A UNIÃO FAZ A SOLDA. Disponível em 18/01/2015 <http://fuvestibular.com.br/fuvestibular.com/.../apostilas/...de.../apostila.../12-a-uniao-faz-a-solda.pdf> .
17. SHOME, M. Effect of dynamic contact resistances on advanced high strength steels under medium frequency DC spot welding conditions. Science and Technology of Welding and Joining, India, v. 14, n .6, p.533-541, Dec. 2008.
18. DICKINSON, D. W.; FRANKLIN. J.E.; STANYA, A. Characterization of Spot Welding Behavior by Dynamic Electrical Parameter Monitoring Welding Research Council, New York, v. 59, n.6, p. 170-176, June 1980.
19. ZIEDAS,S;TATINI,I. Coleção tecnologia SENAI:Soldagem.São Paulo:SENAI,1997.553P.
20. APOSTILLA BAM SOLDAS. Disponível em 09/01/2015: www.bamsoldas.com.br/informativos/cursodesolda.pdf.
21. OLIVEIRA, R.D. Estudo da influência dos parâmetros na soldagem a ponto por resistência em chapa de aço PHS "PRESS HARDERED STEEL". 72 pgs. Monografia (Especialização em engenharia de Soldagem)-Escola Politécnica da universidade de São Paulo. Programa de Educação continuada em engenharia. São Paulo, 2015.
22. EDWARDS, E.R.Inspection of Welded. Welding Brazing and Soldering. Metals Handbook, vol.6, 10ª ED, American Society of Metals, 1998, p.2602-2688.
23. FUKAMIZU, A.S. A influência da refrigeração do eletrodo na soldagem a ponto por resistência em chapas de aço carbono com revestimento de zinco, 2014. 112 p. Monografia (Especialização em engenharia de soldagem) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Programa de Educação continuada em Engenharia. São Paulo. 2014.
24. BATISTA M., Estudo Comparativo da Soldabilidade da Chapa 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.
25. VARGAS A., JOSE E., 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, 2006. P.13-20.

26. INTERMACHINERY. Disponível em 09/01/2015
<http://intermachinery.com.br/eletrodos/>.
27. Sicamet, eletrodos. Disponível em 09/01/2015:
<http://www.sicamet.com/eletrodos.html>
28. ELECTROMECHANIQUE.S.A ,Soudadure par résistance,Théorie & Pratique.Bruxelles.
29. Aço – Wikipédia, a enciclopédia livre SITE Disponível em 14/02/2015:
<http://pt.wikipedia.org/wiki/A%C3%A7o>.
30. GARCIA, A.; SPIM, J.A; SANTOS, C, A. Ensaio dos materiais. Campinas: LTC, 1999.247pgs.
31. GM WORLDWIDE ENGINEERING STANDARDS, Material Specification, Weld Acceptance Criteria and Repair Procedures Resistance Spot Welds – Steel. GMW 14057, 2011.