

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS
GERAIS - *CAMPUS* BETIM
BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

YURIH CAPRONI GUERRA

**ANÁLISE DAS PRINCIPAIS CAUSAS DOS DEFEITOS DE SOLDAGEM POR
PONTOS**

Betim
2026

YURIH CAPRONI GUERRA

**ANÁLISE DAS PRINCIPAIS CAUSAS DOS DEFEITOS DE SOLDAGEM POR
PONTOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca examinadora do curso de Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais *Campus* Betim, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Gabriel Mendes de Almeida Carvalho

Betim

2026

FICHA CATALOGRÁFICA

G934a Guerra, Yurih Caproni

Análise das principais causas dos defeitos de soldagem por pontos / Yurih Caproni Guerra. – 2026.

40 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, Câmpus Betim, 2026.

Orientação: Prof. Dr. Gabriel Mendes de Almeida Carvalho

1. Solda e soldagem. 2. Indústria automobilística. 3. Análise de falhas. 4. Processos de fabricação. 5. Engenharia Mecânica. I. Guerra, Yurih Caproni. II. Título.

CDU: 621.791



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS GERAIS
Campus Betim
Diretoria de Ensino
Docentes Mecânica
Rua Itamarati - CEP 32677-364 - Betim - MG
3135976360 - www.ifmg.edu.br

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aos 03 dias do mês de fevereiro do ano de 2026, às 19:00, nas dependências do IFMG - *campus* Betim, reuniu-se a banca examinadora presidida por mim, Gabriel Mendes de Almeida Carvalho e demais membros, Fagner Guilherme Ferreira Coelho, Adriano Ribeiro e Leonardo dos Santos Maria. Nesta ocasião o discente Yurih Caproni Guerra do curso de Bacharelado em Engenharia Mecânica, com registro acadêmico de número 0034022 do IFMG – *Campus* Betim, defendeu seu Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) intitulado “ANÁLISE DAS PRINCIPAIS CAUSAS DOS DEFEITOS DE SOLDAGEM POR PONTOS” e foi APROVADO, com 85 pontos (oitenta e cinco) pontos.

Este resultado reflete o cumprimento parcial dos critérios de avaliação estabelecidos pelo curso e reconhece os esforços e a dedicação do discente e seu orientador no desenvolvimento do seu TCC. O lançamento da nota e o conseqüente encerramento do respectivo processo está condicionado ao cumprimento dos procedimentos pós-defesa conforme previstos nos regulamentos vigentes. Tais procedimentos pós-defesa devem ser finalizados dentro do prazo limite de 20 dias úteis, a contar da data desta ata. O descumprimento destes procedimentos até a data estipulada implicará em atribuição de nota 0 (zero) e conseqüente reprovação.

A sessão foi encerrada às 20h00. Para constar, eu, Gabriel Mendes de Almeida Carvalho, redigi a presente ata que após lida publicamente, foi aprovada e assinada pelo discente e membros da banca examinadora.

Assinam abaixo, com autenticidade, os membros da banca.

Documento assinado digitalmente
 GABRIEL MENDES DE ALMEIDA CARVALHO
Data: 11/02/2026 21:05:11-0300
Verifique em <https://validar.ifmg.gov.br>


Gabriel Mendes de Almeida Carvalho

Documento assinado digitalmente
 FAGNER GUILHERME FERREIRA COELHO
Data: 12/02/2026 11:09:17-0300
Verifique em <https://validar.ifmg.gov.br>

Fagner Guilherme Ferreira Coelho

Documento assinado digitalmente
 ADRIANO RIBEIRO MARINHO
Data: 12/02/2026 13:40:36-0300
Verifique em <https://validar.ifmg.gov.br>

Adriano Ribeiro Marinho

Documento assinado digitalmente
 LEONARDO DOS SANTOS MARIA
Data: 11/02/2026 21:08:53-0300
Verifique em <https://validar.ifmg.gov.br>

Leonardo dos Santos Maria

AGRADECIMENTOS

A minha família, por ser a base de tudo, principalmente, pela compreensão nas ausências e pelo incentivo constante nos momentos de exaustão. Sem o apoio de vocês, a conclusão deste ciclo não seria possível.

Aos meus amigos e colegas de curso, pelas trocas de conhecimento e pelos momentos de descontração que tornaram os anos de graduação inesquecíveis.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a minha formação pessoal e profissional, o meu mais sincero muito obrigado.

RESUMO

A soldagem por pontos é o processo de união comumente utilizado na indústria automobilística para a produção de carrocerias e componentes estruturais. Esse processo de soldagem envolve inúmeros desafios, sendo os mais comuns a validação dos pontos através dos ensaios, o respeito ao tempo taxativo de ciclo de soldagem e a função estrutural dos pontos. Nesse trabalho foi realizada uma análise dos principais parâmetros, defeitos e possíveis ações para correções de problemas comuns ao processo. Foram realizadas várias análises referentes a corpos submetidos a soldagem de pontos e através delas formuladas possíveis soluções aos problemas mais comuns evidenciados na indústria. Como resultado obteve-se dados que possibilitam otimizar o processo de solda a ponto e identificar possíveis causadores de defeitos ao passo que também foi possível verificar quais os principais parâmetros que influenciam diretamente na qualidade dos pontos e determinar planos de ação efetivos para amenizar ou até mesmo mitigar problemas comuns a produção e eficiência dos pontos visto a variabilidade do processo.

Palavras-chave: soldagem; ponto; processo; defeitos; soluções.

ABSTRACT

Spot welding is the joining process commonly used in the automotive industry for the production of bodywork and structural components. This welding process involves numerous challenges, the most common being the validation of weld spots through testing, compliance with the strict welding cycle time, and the structural function of the spots. In this work, an analysis was carried out of the main parameters, defects, and possible actions for correcting issues common to the process. Several analyses were conducted on specimens subjected to spot welding, and through them, possible solutions were formulated for the most common problems evidenced in the industry. As a result, data were obtained that enable optimization of the spot welding process and identification of possible defect contributors, while also allowing the verification of the main parameters that directly influence spot quality and the determination of effective action plans to mitigate or even eliminate common issues related to production and spot efficiency, given the variability of the process.

Keywords: welding; spot; process; defects; solutions.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1: Soldagem por resistência a ponto
- Figura 2: Soldagem por resistência por projeção
- Figura 3: Soldagem por costura
- Figura 4: Soldagem por resistência por projeção
- Figura 5: Refrigeração no eletrodo
- Figura 6: Relação de diâmetro do eletrodo
- Figura 7: Equação para cálculo do diâmetro pela verificação da lentilha de solda
- Figura 8: Efeito dos eletrodos durante a soldagem
- Figura 9: Defeito de excesso de endentação
- Figura 10: Defeito de porosidade
- Figura 11: Defeito de expulsão na superfície
- Figura 12: Defeito de deformação da peça
- Figura 13: Defeito de superfície porosa
- Figura 14: Defeito de latão e orifício na superfície
- Figura 15: Defeito de trincas
- Figura 16: Defeito de escorregamento
- Figura 17: Defeito de borda
- Figura 18: Defeito de meia lua

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

IFMG - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais

NBR - Normas Técnicas Brasileiras

TCC - Trabalho de Conclusão de Curso

SRP – Soldagem de resistência a ponto

RSW – Resistance spot welding

RWMA - Resistance Welding Manufacturing Alliance

ZAC – Zona afetada pelo calor

LISTA DE SÍMBOLOS

Ω	Resistencia
τ	Constante de tempo do sistema de primeira ordem
©	Copyright
$G(s)$	Função de transferência

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Fundamentos e Princípios do Processo	15
1.2	Parâmetros e Desafios Técnicos	15
1.3	Objetivos e Estrutura do Trabalho.....	16
1.4	Justificativa.....	16
1.5	Colocação do Problema.....	17
1.6	Objetivos	18
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1	Definição de soldagem	19
2.2	Soldagem por resistência.....	19
2.3	Características e Aplicações da Soldagem por Resistência a Ponto	21
2.3.1	Vantagens e Desvantagens da SRP	22
3	REVISÃO SOBRE O PROCESSO DE SOLDAGEM POR PONTOS	23
4	METODOLOGIA	27
4.1.1	Caracterização Morfológica do Defeito.....	27
4.1.2	Tríade de Parâmetros.....	27
4.1.3	Correlação via Diagrama de Ishikawa (6M).....	28
4.1.4	Protocolo de Verificação Experimental.....	28
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
5.1	Defeitos de solda e possíveis causas	31
6	CONCLUSÃO	38
	REFERÊNCIAS.....	40
	ANEXO A – DEFEITOS DE SOLDA.....	41

1 INTRODUÇÃO

A soldagem por resistência elétrica por pontos (RSW), popularmente conhecida como **solda ponto**, é um dos processos mais vitais na manufatura moderna. Sua importância é fundamental em setores como o aeroespacial, eletroeletrônico e, predominantemente, na **indústria automobilística**, onde se consolida como o método preferencial para a montagem de carrocerias e componentes estruturais.

O amplo emprego industrial deste processo justifica-se por vantagens como o baixo custo operacional, a alta produtividade e a facilidade de automação em linhas robotizadas. Tais características são essenciais para reduzir a variabilidade produtiva e a suscetibilidade a falhas humanas, garantindo a qualidade dimensional exigida pelo mercado.

1.1 Fundamentos e Princípios do Processo

O princípio de funcionamento da solda ponto reside na aplicação simultânea de pressão mecânica e corrente elétrica através de eletrodos não consumíveis. Esses eletrodos são tipicamente fabricados em ligas de cobre de alta condutividade e resistência, como o Cobre Cromo Zircônio (CuCrZr), garantindo a condução eficiente da energia e a dissipação necessária de calor (Felizardo, 2016).

O fenômeno físico central é o Efeito Joule, ao atravessar as chapas metálicas, a corrente de alta intensidade encontra resistência elétrica, concentrada principalmente na interface de contato entre as peças, gerando calor suficiente para provocar a fusão localizada. Após o **desligamento** da corrente, a pressão mantida pelos eletrodos consolida a união durante a solidificação, formando o ponto de solda.

1.2 Parâmetros e Desafios Técnicos

A obtenção de juntas soldadas com desempenho ideal depende do controle rigoroso de variáveis interdependentes:

- **Corrente de Soldagem (AI):** Principal fonte de calor.
- **Tempo de Aplicação (s):** Controla a duração do fluxo elétrico.

- **Pressão dos Eletrodos (N):** Garante o contato íntimo e evita expulsão de material.
- **Geometria e Material dos Eletrodos:** Influenciam a densidade de corrente e a distribuição térmica.
- **Resistência do Circuito (Ω):** Soma das resistências elétricas dos materiais e das interfaces de contato (Felizardo, 2016).

A performance e a integridade da junta podem ser comprometidas por oscilações nestes parâmetros, exigindo uma infraestrutura robusta de energia e equipamentos de grande porte. A identificação e mitigação de defeitos são, portanto, essenciais para a segurança e durabilidade do produto final.

1.3 Objetivos e Estrutura do Trabalho

Este estudo tem como objetivo principal avaliar os defeitos mais recorrentes na soldagem por pontos e analisar sua influência na performance do produto, utilizando estudos de caso e evidências de linhas de produção industrial.

O desenvolvimento deste estudo está estruturado nos seguintes tópicos:

1. Objetivos do trabalho;
2. Revisão bibliográfica detalhada;
3. Descrição de equipamentos e materiais;
4. Análise de defeitos e seus fatores causadores;
5. Proposição de soluções técnicas;
6. Apresentação e discussão de resultados;
7. Conclusões e Referências.

1.4 Justificativa

O método é amplamente utilizado em carrocerias automotivas, eletrodomésticos, painéis metálicos, estruturas metálicas leves e na fabricação de componentes eletrônicos. O uso de solda ponto é preferencial para chapas metálicas com espessuras de até 3 milímetros, onde outras técnicas seriam menos produtivas ou mais custosas. No entanto, no cenário da manufatura contemporânea, identifica-se uma lacuna significativa entre os fundamentos teóricos da soldagem por resistência e a realidade das linhas de produção. Nota-se uma escassez de literatura técnica que

sistematize, de forma pragmática e fundamentada, protocolos de resolução para as instabilidades intrínsecas ao processo de solda ponto.

Essa carência de diretrizes acadêmicas objetivas faz com que o diagnóstico e a correção de anomalias operacionais dependam, quase exclusivamente, do conhecimento tácito e da heurística acumulada pelos profissionais de chão de fábrica. Embora o *know-how* empírico desses especialistas seja vital para a continuidade operacional, a ausência de uma validação científica rigorosa e de documentação formal tende a converter soluções críticas em intervenções meramente paliativas.

Nota-se que invés de correções estruturais baseadas em correlações metalúrgicas e físicas, as práticas vigentes muitas vezes priorizam o reestabelecimento imediato do ciclo produtivo. Tal cenário negligencia a padronização e a otimização de parâmetros, impedindo que as lições aprendidas sejam transformadas em ativos de engenharia robustos e replicáveis. Portanto, torna-se imperativo transmutar essa experiência prática em procedimentos operacionais normatizados, amparados por uma análise criteriosa das variáveis de influência do processo.

1.5 Colocação do Problema

A gestão da qualidade nos processos de Soldagem por Resistência a Ponto (SRP) é frequentemente comprometida pela abordagem reativa na solução de falhas. A observação empírica demonstra que, em vez de uma análise aprofundada das causas-raiz dos defeitos, o ambiente industrial recorre com frequência a medidas paliativas. Tais intervenções, embora resolvam o sintoma imediato, não atacam a origem fundamental do problema, perpetuando a recorrência de não conformidades. Esta prática é agravada pela lacuna de embasamento científico e pela falta de documentação acessível que correlacione, de forma clara, os parâmetros de soldagem, os defeitos observados e as ações corretivas validadas. Consequentemente, a ausência de um referencial teórico robusto impede a otimização contínua do processo e a transição de um modelo de correção de falhas para um modelo de prevenção baseado em dados e princípios de engenharia.

1.6 Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo principal mitigar a lacuna de conhecimento técnico-científico identificada na gestão de processos de SRP. Para tal, propõe-se a disponibilização de um arsenal de soluções práticas e teoricamente fundamentadas para os problemas e defeitos mais comuns evidenciados nas linhas de produção.

Os objetivos específicos que guiam esta pesquisa incluem:

- Identificar e catalogar os defeitos de soldagem mais recorrentes na SRP, com base em estudos de caso e observações industriais;
- Analisar e explicar, de forma clara e concisa, as causas-raiz de cada defeito, correlacionando-as aos parâmetros críticos do processo (corrente, tempo, força e geometria do eletrodo);
- Propor e detalhar as resoluções técnicas mais eficazes para cada não conformidade, fornecendo um guia prático para a otimização do procedimento de soldagem;
- Contribuir para a padronização dos procedimentos de solução de problemas, elevando o nível de conhecimento técnico disponível para os profissionais da área.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Definição de soldagem

A soldagem é um processo fundamental de fabricação que visa a união permanente de materiais. Em uma perspectiva técnica e fundamental, a soldagem pode ser conceituada como o método de junção de materiais que se baseia no estabelecimento de forças de ligação química de natureza similar às que mantêm a coesão interna dos próprios materiais. A maior parte dos processos de soldagem existentes é aplicada especificamente para a união de materiais de natureza metálica (Marques et al., 2009).

Em termos de aplicação e resultado prático, a soldagem é definida como a operação cujo propósito é ligar duas ou mais peças, assegurando que a continuidade das propriedades químicas e físicas seja mantida na junta resultante (Quites, 2011).

2.2 Soldagem por resistência

A essência dos processos de soldagem por resistência reside na capacidade de criar uma união metálica por meio da conversão de energia elétrica em energia térmica. A formação da junta soldada é alcançada pela geração de calor, que é um resultado direto do Efeito Joule — o aquecimento provocado pela passagem da corrente elétrica através da resistência do material — em conjunto com a aplicação de uma pressão localizada (Marques et al., 2009).

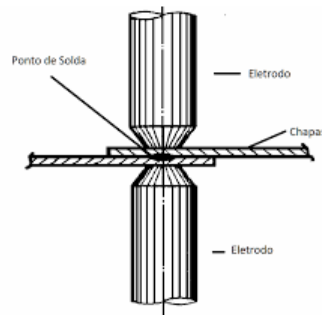
Uma característica distintiva da soldagem por resistência, conforme apontado pela *Resistance Welding Manufacturing Alliance* (RWMA, 1989), é a sua natureza autônoma em relação a consumíveis. Diferentemente de muitos outros métodos de soldagem, a RWMA (1989) destaca que o processo não requer o uso de materiais de adição, fluxos ou gases de proteção, o que simplifica a operação e reduz os custos associados a esses insumos.

A popularidade e a vasta aplicação industrial deste método se devem à sua alta velocidade de execução, versatilidade e inerente facilidade de automação. Tais atributos o tornam ideal para linhas de produção em massa.

O termo "soldagem por resistência" abrange uma família de processos, cada um adaptado a diferentes geometrias e requisitos de união. As variações mais proeminentes incluem:

Soldagem por Resistência a Ponto (Spot Welding): É o método mais comum, amplamente empregado para unir chapas metálicas sobrepostas, sejam elas revestidas ou não.

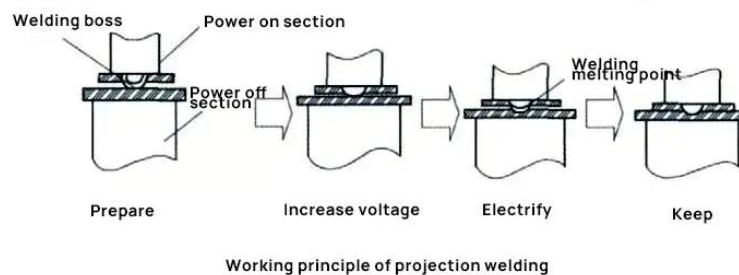
Figura 1: Soldagem por resistência a ponto



Fonte: RWMA (1989) Adaptado

Soldagem por Resistência por Projeção (Projection Welding): Utiliza saliências ou projeções pré-formadas nas peças para concentrar a corrente e a pressão, sendo frequentemente usada para fixar componentes a chapas ou na soldagem de telas de aço galvanizado, por exemplo.

Figura 2: Soldagem por resistência por projeção

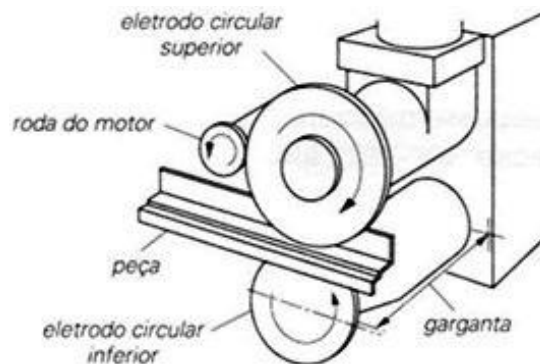


Fonte: Compraco, 2025

Soldagem por Resistência por Costura (Seam Welding): Cria uma solda contínua, geralmente estanque, por meio de eletrodos em formato de disco que giram e aplicam a corrente e a força de forma intermitente ou contínua. É uma técnica essencial na

fabricação de reservatórios e tanques, como os de combustível automotivos (FONSECA, 1999).

Figura 3: Soldagem por costura



Fonte: Tecnologia da soldagem – CEFET (2013)

2.3 Características e Aplicações da Soldagem por Resistência a Ponto

A Soldagem por Resistência a Ponto (SRP) é um processo de união amplamente reconhecido pela sua eficácia na junção de peças metálicas sobrepostas. De acordo com a *Resistance Welding Manufacturing Alliance* (RWMA, 1989), a principal finalidade deste método é a união de componentes que não necessitam de desmontagem posterior, sendo notável por sua alta velocidade e baixo custo operacional (RWMA, 1989).

O processo é majoritariamente empregado na soldagem de chapas metálicas, com destaque para o aço. A mecânica da SRP envolve a passagem de uma intensa corrente elétrica através de duas ou mais chapas sobrepostas. Esta corrente é conduzida por eletrodos de **pequeno** diâmetro, tipicamente variando entre 3 e 8 mm, que simultaneamente aplicam uma força axial. A combinação da corrente e da força resulta na formação de uma solda localizada e pontual. É importante notar que este método é mais adequado para chapas de espessura reduzida, geralmente inferiores a três milímetros (Marques et al., 2009).

2.3.1 Vantagens e Desvantagens da SRP

A escolha da Soldagem por Resistência a Ponto em ambientes industriais é amplamente justificada por um conjunto de benefícios operacionais e técnicos. Entre as principais vantagens do processo (Fonseca, 1999) destaca a alta velocidade de execução e a facilidade de automação, características que contribuem significativamente para a produtividade em larga escala. Adicionalmente, o processo é considerado autógeno, ou seja, não requer a adição de material, o que simplifica a logística e reduz custos. Sua operação é relativamente simples, permite a união de materiais dissimilares e, por ser um processo limpo, não resulta em perda de material (Fonseca, 1999).

Contudo, o processo de SRP também apresenta desvantagens que devem ser cuidadosamente avaliadas no planejamento da produção. Um dos principais pontos de atenção é o custo de infraestrutura, pois o processo exige redes elétricas de grande porte capazes de suportar as altas correntes necessárias para a soldagem. O custo de implantação e dos equipamentos em si também é considerado elevado. Do ponto de vista do *design* da junta, a necessidade de utilizar juntas sobrepostas pode, em certos contextos, aumentar os custos de fabricação quando comparado a soluções de junta de topo. Por fim, uma limitação técnica importante é que as juntas soldadas por este método tendem a apresentar baixa resistência à tração e à fadiga (Fonseca, 1999).

3 REVISÃO SOBRE O PROCESSO DE SOLDAGEM POR PONTOS

A Soldagem por Resistência por Pontos (SRP) é um processo de união que se fundamenta em princípios termelétricos e mecânicos para estabelecer uma ligação permanente entre materiais metálicos, tipicamente chapas. O cerne do processo reside na geração controlada de calor através do Efeito Joule, que é a base física para a fusão localizada do material.

3.1. Princípios Físicos da Soldagem por Resistência

O calor (Q) gerado durante o processo de SRP é diretamente proporcional ao quadrado da corrente elétrica (I), à resistência elétrica (R) do material e ao tempo (t) de aplicação da corrente, conforme a Lei de Joule:

$$Q=I^2 \cdot R \cdot t$$

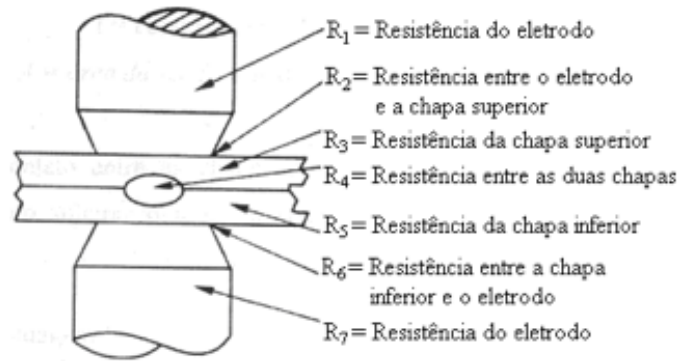
A eficácia da soldagem depende da concentração desse calor na interface das chapas a serem unidas. A resistência elétrica total do circuito de soldagem é composta por diversas parcelas, sendo as mais críticas para a formação do ponto de solda:

Resistência de Contato (R_{contato}): A resistência na interface entre os eletrodos e as chapas, e, crucialmente, na interface entre as duas chapas. É nesta última que a maior parte do calor deve ser gerada para iniciar a fusão.

Resistência do Material (R_{material}): A resistência intrínseca do material das chapas e dos eletrodos.

O processo é iniciado com a aplicação de pressão mecânica pelos eletrodos, que tem a dupla função de garantir o contato elétrico e manter as chapas unidas durante a fusão e solidificação. A pressão inicial reduz a resistência de contato entre os eletrodos e as chapas, mas mantém uma alta resistência na interface das chapas, maximizando a geração de calor no local desejado.

Figura 4: Soldagem por resistência por projeção



Fonte: Tecnologia da soldagem – CEFET (2013)

3.2. Formação do Ponto de Solda (*Nugget*)

A alta densidade de corrente e a resistência de contato na interface das chapas elevam a temperatura local até o ponto de fusão, formando uma poça fundida que, ao se solidificar, constitui o *nugget* (ponto de solda). O controle preciso dos parâmetros I (corrente), R (resistência) e t (tempo) é fundamental para garantir que o *nugget* atinja o diâmetro e a penetração adequados, sem causar expulsão excessiva de material (respingo) ou superaquecimento dos eletrodos.

3.3. O Papel dos Eletrodos

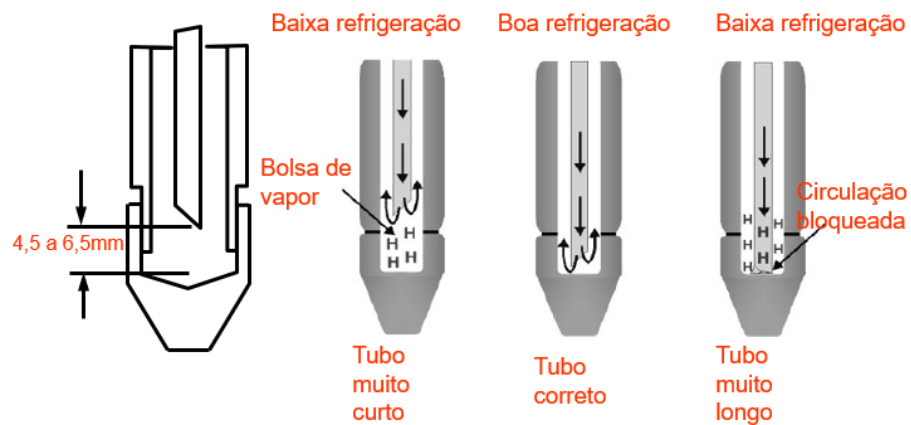
Os eletrodos desempenham um papel vital no processo, pois são responsáveis por conduzir a corrente e aplicar a força, além de dissipar o calor gerado para evitar o superaquecimento da superfície das chapas. Por essa razão, são fabricados com materiais que combinam alta condutividade elétrica e térmica com resistência mecânica, como as ligas de Cobre Cromo Zircônio (CuCrZr). A degradação da ponta do eletrodo, devido ao desgaste e ao acúmulo de material, é um fator que altera a resistência de contato e, conseqüentemente, a qualidade do ponto de solda. O controle térmico e qualidade da solda são extremamente importantes na solda a ponto, o calor necessário para a fusão é gerado principalmente pela resistência elétrica do material e da interface entre as chapas. O eletrodo não deve ser a região de maior aquecimento; caso contrário, ocorre perda de eficiência na formação do

núcleo de solda (*nugget*).

O resfriamento adequado mantém o eletrodo a uma temperatura mais baixa, garantindo que o calor seja concentrado na interface das chapas, visto que durante a passagem de corrente e a formação do *nugget* a temperatura pode ultrapassar 1200°C, promovendo uma solda consistente e repetitiva. Com isso, nota-se que é de extrema importância sua refrigeração, de forma a diminuir o seu desgaste, sendo verificada a cada troca, conforme apresentado na figura 5.

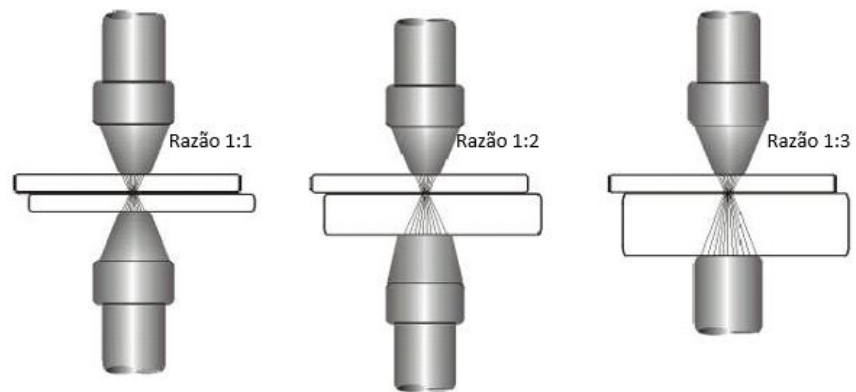
Além disso, vale salientar o diâmetro do eletrodo, este é definido em função da espessura da chapa a ser soldada, conforme a figura 6.

Figura 5: Refrigeração no eletrodo



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

Figura 6: Relação de diâmetro do eletrodo



Fonte: Souza, Daniel & Resende, André & Scotti, Americo. (2009)

4 METODOLOGIA

A metodologia detalhada é apenas o método teórico em que busca os motivos de falha, cruzando os sintomas visuais com as inconsistências dos parâmetros físicos, já que não se pode detalhar a metodologia realizada por ser um documento industrial sigiloso.

4.1.1 Caracterização Morfológica do Defeito

O primeiro passo é classificar a falha para direcionar a investigação. Os defeitos são divididos em três categorias de análise:

Defeitos Dimensionais: Indentação (marca) excessiva, desalinhamento entre pontos ou chapas deformadas.

Defeitos Metalúrgicos: Porosidade interna, trincas na lentilha ou zona afetada pelo calor (ZAC) excessiva.

Defeitos de Performance: Ponto "frio" (sem fusão), diâmetro da lentilha insuficiente ou expulsão de metal (respingos).

4.1.2 Tríade de Parâmetros

A. Análise da Variável Corrente e Tempo

Verificação: O controlador de solda está entregando a corrente programada?

Causa-Raiz Comum: *Shunt* elétrico (a corrente desvia por um ponto já soldado muito próximo) ou oscilações na rede elétrica.

B. Análise da Resistência Elétrica e Interface

Verificação: Como está o estado das chapas e dos eletrodos?

Causa-Raiz Comum: Eletrodos de **CuCrZr** com a face de contato alargada. Se o diâmetro da ponta aumenta, a densidade de corrente cai drasticamente, resultando em pontos fracos.

C. Análise da Força/Pressão

Verificação: A pressão pneumática/servomotor é constante?

Causa-Raiz Comum: Pressão insuficiente gera alta resistência de contato inicial, causando o "*flash*" ou respingo metálico logo no início do ciclo.

4.1.3 Correlação via Diagrama de Ishikawa (6M)

Para aprofundar a análise, aplica-se o diagrama de causa e efeito adaptado para a solda ponto:

Método: Sequência de soldagem incorreta ou tempo de manutenção insuficiente.

Matéria-prima: Variação na espessura das chapas ou presença de óleo/zinco excessivo (em chapas galvanizadas).

Mão de obra: Posicionamento angular incorreto da pinça de solda pelo operador.

Máquina: Desgaste de cabos secundários ou falta de refrigeração nos eletrodos.

Medição: *Shunt* de medição descalibrado.

Meio Ambiente: Oxidação prematura das chapas por umidade.

4.1.4 Protocolo de Verificação Experimental

Para confirmar a causa-raiz, utiliza-se o Teste de Passo:

1. Mantém-se a Pressão e o Tempo constantes;
2. Incrementa-se a Corrente progressivamente até atingir o limite de expulsão;
3. Analisa-se o crescimento da lentilha de solda.

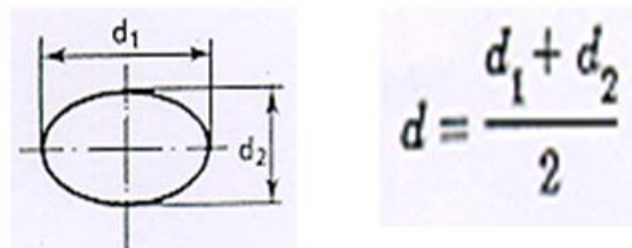
Se o intervalo entre o ponto mínimo aceitável e o respingo for muito estreita, o problema reside na estabilidade da pressão ou no resfriamento do eletrodo.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A densidade de corrente indica a quantidade de corrente elétrica que passa por uma área específica de contato e é um fator crucial na soldagem a ponto por resistência, uma vez que regula a produção de calor devido ao efeito Joule. Quando ajustada de maneira adequada, ela assegura que o aquecimento ocorra predominantemente na interface entre os materiais, facilitando a formação correta do *nugget* e garantindo tanto a resistência mecânica quanto a consistência do processo. Um aumento excessivo na densidade de corrente pode resultar em superaquecimento, causando a expulsão de material fundido, marcas superficiais indesejadas e desgaste acelerado dos eletrodos, enquanto valores insuficientes podem levar à formação de soldas inadequadas, com núcleos pequenos ou até ausentes.

Nesse cenário, é fundamental realizar a verificação da lentilha de solda (Figura 3), pois essa prática possibilita uma avaliação da adequação dos parâmetros utilizados na produção de uma lentilha que possua o diâmetro e a forma corretos. A análise da lentilha, que geralmente é feita através de testes destrutivos, valida-se a densidade de corrente, juntamente com o tempo e a força do eletrodo, está ajustada corretamente, o que garante a qualidade e a confiabilidade da união soldada.

Figura 7: Equação para cálculo do diâmetro pela verificação da lentilha de solda



Fonte: Disponível em: <https://wp.ufpel.edu.br/rejanepergher/files/2022/07/Apostila_Calculo3.pdf>. Acesso em: 21 jan. 2026.

Por meio da figura 8, pode-se observar a relação direta entre o estado de conservação do eletrodo e a qualidade geométrica e metalúrgica da lentilha de solda, conforme o eletrodo se desgasta, sua área de contato com a chapa aumenta e se torna irregular,

reduzindo a densidade de corrente elétrica e comprometendo a distribuição térmica na interface de soldagem. Esse fenômeno explica a progressão visual observada de um ponto perfeitamente circular e homogêneo, passando por pontos deformados, até falhas severas como torção e perfuração do material.

A verificação da lentilha é essencial para validar se o ponto gerado atende aos requisitos estruturais. Os métodos mais utilizados são o ensaio de arrancamento (peel test), cisalhamento (chisel test) e análises macrográficas por corte transversal. Critérios como diâmetro mínimo da lentilha, simetria, ausência de expulsão excessiva e fratura no metal base, e não na interface, indicam que houve fusão adequada. Na **figura 8**, pontos classificados como “começando a deformar”, “torcidos” ou “furados” já representam não conformidades típicas detectáveis nesses ensaios.

Os parâmetros de soldagem, corrente, tempo e força atuam de forma interdependente na formação da lentilha. A corrente controla a taxa de geração de calor, o tempo define a energia total aplicada e a força dos eletrodos influencia a resistência de contato e a estabilidade mecânica do ponto. Eletrodos novos permitem maior densidade de corrente local, formando lentilhas bem definidas, no entanto, os eletrodos gastos exigem ajustes de corrente ou tempo para compensar a perda de eficiência térmica, porém essa compensação tem limite e não substitui a troca do eletrodo.

Por fim, a **figura 8** reforça o conceito de que o desgaste progressivo do eletrodo não causa apenas degradação estética do ponto, mas compromete diretamente sua resistência mecânica e repetibilidade dimensional. Assim, a inspeção visual da lentilha, aliada a ensaios destrutivos periódicos e ao controle rigoroso dos parâmetros de soldagem, constitui uma prática essencial para assegurar a robustez do processo e a conformidade estrutural das juntas soldadas em aplicações industriais críticas, como carrocerias automotivas.

Figura 8: Efeito dos eletrodos durante a soldagem



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

5.1 Defeitos de solda e possíveis causas

Primeiramente, através de análises realizadas em laboratório, nota-se em diferentes amostras os possíveis defeitos de solda, conforme anexo A. Este apresenta uma análise comparativa entre a aparência superficial do ponto de solda (linha superior) e a estrutura interna da lentilha obtida por corte macrográfico (linha inferior), destacando os efeitos negativos do excesso de área de contato dos eletrodos, conforme indicado pelas legendas em vermelho.

Nos exemplos superiores, observa-se que os pontos apresentam marcas largas, pouco definidas e com bordas difusas, evidenciando que os eletrodos estão excessivamente gastos ou deformados. Essa condição aumenta a área de contato elétrico, reduzindo a densidade de corrente e provocando uma distribuição térmica inadequada. Como resultado, o aquecimento deixa de ser concentrado na interface das chapas, comprometendo a formação eficiente da lentilha, esta fuga de corrente é

um ponto realizado subsequente ao primeiro ponto terá uma corrente menor quanto menor for a distância entre eles.

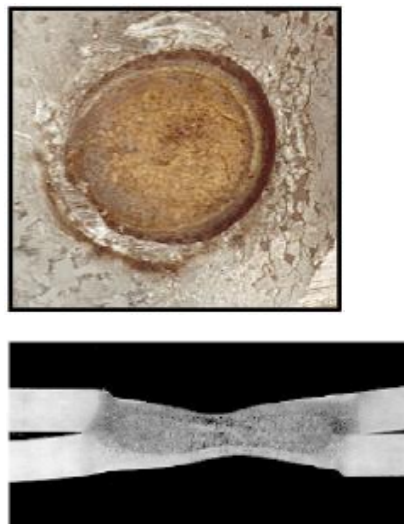
As imagens da **figura 8**, confirmam esse efeito: a lentilha formada é achatada, pouco profunda e com limites difusos, indicando fusão incompleta ou crescimento irregular do núcleo. Em alguns casos, observa-se falta de coalescência adequada entre as chapas, o que reduz significativamente a resistência mecânica do ponto, mesmo quando a superfície aparenta estar aceitável.

Portanto, a imagem reforça que eletrodos com área de contato excessiva não apenas degradam a aparência do ponto, mas comprometem a formação metalúrgica da lentilha, tornando o processo instável e exigindo correção imediata por dressagem ou troca dos eletrodos. Esse tipo de defeito é típico de processos que tentam compensar desgaste apenas com aumento de corrente ou tempo, estratégia que tende a agravar a dispersão térmica sem recuperar a qualidade estrutural da solda.

As possíveis causas para que estes defeitos de solda ocorram são:

1. **Excesso de Endentação** – possível causa pela baixa força, alto valor da corrente, refrigeração insuficiente, tempo de solda longo e longo tempo de pós-pressão.

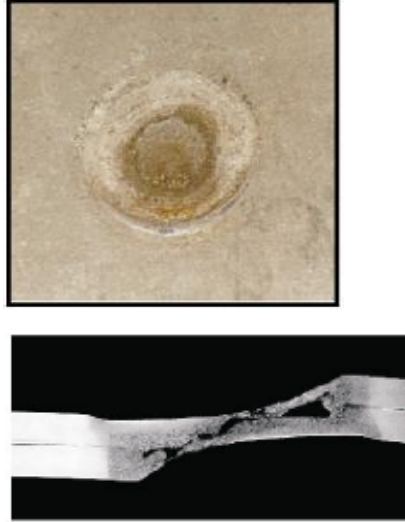
Figura 9: Defeito de excesso de endentação



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

2. **Porosidade** – possível ocorrência por eletrodos desalinhados e eletrodos novos com marcas na superfície em torno do diâmetro.

Figura 10: Defeito de porosidade



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

3. **Expulsão na superfície** – possível ocorrência por baixa força, alto calor gerado (alta corrente) e a Área dos eletrodos **muito grande**.

Figura 11: Defeito de expulsão na superfície



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

4. **Deformação da peça** – Possível causa por eletrodos desalinhados e peça fora de posição.
Nota-se que o metal em torno do ponto está curvado ou deformado.

Figura 12: Defeito de deformação da peça



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

5. **Superfície porosa** – Possível causa por corrente que fluiu enquanto os eletrodos fechavam, baixo tempo de pré-pressão e sujeira isolante na superfície da chapa e tempo curto de pós-pressão.

Nota-se um furo na superfície de contato

Figura 13: Defeito de superfície porosa



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

6. **Latão e orifício na superfície** – Possível causa por baixa força, alto calor gerado (alta corrente), refrigeração insuficiente e tempo longo de solda.

Figura 14: Defeito de latão e orifício na superfície



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

7. **Trincas** – Possível causa por, alto valor corrente, longo tempo de pós-pressão.
OBS: Alto valor causa trincas na superfície ou no interior do ponto

Figura 15: Defeito de trincas



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

8. **Escorregamento** – Possível ocorrência pela abertura muito grande da pinça, ou porta eletrodo muito longo, pinça com braços muito longos.

OBS: Eletrodos deslizam na superfície quando o calor é gerado podendo afetar o tamanho e o formato da lentilha.

Figura 16: Defeito de escorregamento



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

9. **Borda** – Provável causa, pinça posicionada incorretamente, peça fora de posição e solda localizada muito próximo da borda da peça.

Figura 17: Defeito de borda



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

10. **Meia Lua** - Pinça não está alinhada com a peça e um eletrodo ou ambos estão desalinhados.

Figura 18: Defeito de meia lua



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

Dessa forma, vale ressaltar as condições inadequadas dos eletrodos e parâmetros de soldagem afetam diretamente tanto a aparência superficial quanto a estrutura interna da lentilha na solda a ponto por resistência. Observa-se que o aumento excessivo da área de contato dos eletrodos, geralmente causado por desgaste ou deformação, reduz a densidade de corrente e dispersa o calor, resultando em pontos largos, pouco definidos e lentilhas internas achatadas ou mal formadas.

Além disso, são evidenciados defeitos associados a excesso de energia térmica, como trincas superficiais e internas, expulsão de material fundido e perfuração da

chapa. Essas falhas indicam corrente ou tempo excessivos, combinados com baixa eficiência de extração térmica do eletrodo, comprometendo a integridade metalúrgica da junta e sua resistência mecânica. Entretanto, nas demais imagens pode-se observar problemas mecânicos e geométricos, como deformação plástica do metal ao redor do ponto, eletrodos deslizando sobre a superfície e soldas realizadas muito próximas à borda da peça. Essas condições provocam assimetria da lentilha, fusão incompleta e instabilidade do processo, mesmo quando a superfície aparenta aceitável.

De forma integrada, o conjunto reforça que a qualidade da solda a ponto depende do equilíbrio entre condição do eletrodo, geometria de contato e parâmetros de corrente, tempo e força, sendo indispensável a inspeção visual, macrográfica e operacional contínua para garantir repetibilidade, resistência estrutural e conformidade dimensional das juntas soldada.

6 CONCLUSÃO

A Soldagem por Resistência a Ponto (SRP) consolidou-se, ao longo deste estudo, como um processo de alta eficiência e vitalidade para a manufatura industrial, com destaque para o setor automotivo. A pesquisa evidenciou que a confiabilidade das juntas soldadas não é meramente circunstancial, mas dependente de um controle rigoroso e sinérgico entre os parâmetros fundamentais: corrente elétrica, tempo de ciclo e força de compressão. Além dessas variáveis, a integridade da união está intrinsecamente ligada às condições geométricas, térmicas e metalúrgicas dos eletrodos, visto que oscilações mínimas nesses fatores são capazes de comprometer a formação da lentilha e a repetibilidade produtiva.

Os resultados obtidos através de inspeção visual e análises macrográficas revelaram que patologias como pontos deformados, trincas, expulsões e perfurações derivam majoritariamente do desgaste físico dos eletrodos e da dissipação ineficiente de calor. Identificou-se que o aumento indesejado da área de contato, provocado pela deformação da ponta do eletrodo, altera drasticamente a densidade de corrente, resultando em lentilhas subdimensionadas. Este cenário reforça a necessidade de substituir o tratamento empírico de falhas, ainda comum no chão de fábrica, por uma abordagem técnica fundamentada em princípios físicos e na engenharia de processos, onde cada desvio possui uma causa-raiz tecnicamente definida.

Diante desse diagnóstico, a otimização do processo exige a implementação de um modelo de gestão baseado na prevenção e na padronização. Isso se inicia pela preparação rigorosa das superfícies metálicas e pela formalização de instruções de processo que garantam a consistência inicial da montagem. De forma paralela, a estabilidade operacional deve ser assegurada pela calibração sistemática dos equipamentos e pela definição de janelas de processo validadas, preferencialmente amparadas por sistemas de monitoramento digital em tempo real que permitam identificar derivas paramétricas antes que estas resultem em produtos não conformes. A gestão estratégica dos eletrodos surge como outro pilar indispensável, devendo focar na manutenção preventiva da geometria e no controle rigoroso do fluxo de refrigeração para preservar a condutividade da liga de cobre. Além disso, a redução da variabilidade nas chapas e a modernização da infraestrutura, com o aporte de sensores e sistemas de rastreabilidade, conferem ao processo a robustez necessária para as demandas de alta produtividade. Tais medidas, quando integradas a rotinas

de auditoria e inspeções sistemáticas, criam um ciclo de retroalimentação que valida continuamente a qualidade das soldas.

Logo, pode-se concluir que a excelência na soldagem por resistência depende da transição de uma cultura reativa para uma cultura de prevenção e melhoria contínua. A aplicação de ferramentas como FMEA, MASP e metodologias Lean Six Sigma, aliada à capacitação técnica das equipes, consolida um ambiente orientado por dados e evidências científicas. Ao priorizar a estabilidade dos parâmetros e a integridade dos ativos, as organizações não apenas garantem a confiabilidade estrutural de seus produtos, mas também alcançam um patamar superior de eficiência e excelência operacional.

REFERÊNCIAS

American welding society. Welding Handbook. AWS, Miami, FL. Felizardo, Ivanilza. Tecnologia da Soldagem – Apostila. CEFET-MG, 2016.

Figura 2 disponível em:

<https://compraco.com.br/sv/blogs/industria/o-que-e-soldagem-por-projecao>

Acesso em 05 fev. 2026

Figura 7 disponível em:

https://wp.ufpel.edu.br/rejanepergher/files/2022/07/Apostila_Calculo3.pdf

Acesso em: 21 jan. 2026.

Felizardo, Ivanilza. Tecnologia da Soldagem – Apostila. CEFET-MG, 2016.

Fonseca, Eduardo Otávio Da. Monitoração da resistência dinâmica na soldagem a ponto por resistência elétrica e avaliação da sua relação com a resistência mecânica do ponto de solda. 1999. 137 f. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1999.

Kou, Sindo. Welding Metallurgy. Wiley, 3rd Edition, 2022.

Marques, Paulo Villani. Modenesi, Paulo José. Bracarense, Aleixandre Queiroz. Soldagem: Fundamentos e Tecnologia. 3 ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2009. 363p.

Masubuchi, Koichi. Analysis of Welded Structures: Residual Stresses, Distortion, and Their Consequences. Oxford: Pergamon Press, 1994.




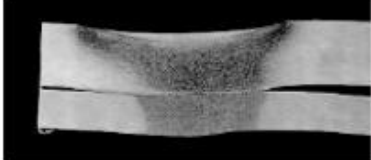


Qites, Almir. Definição de soldagem. Soldasoft, Ribeirão da ilha, 2011. Disponível em: Acesso em: 09 out. 2025.

RWMA. Resistance Welding Manual. 4. ed. E.U.A., 1989. 443 p.

ANEXO A – DEFEITOS DE SOLDA







Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

Sem ponto de solda	Excesso de endentação	Porosidade
		
<p>1-Área de contato dos eletrodos muito grande. 2-Baixo valor de corrente. 3-Baixo tempo de solda. 4-Fuga de corrente ou shunt.</p>	<p>1-Baixa força. 2-Alto valor de corrente 3-Refrigeração insuficiente. 4-Tempo de solda longo. 5-Longo tempo de pós-pressão.</p>	<p>1-Eletrodos desalinhados. 2- Eletrodos novos com marcas na superfície em torno do diâmetro.</p>
		 <p>Obs: Ocorrência interna</p>

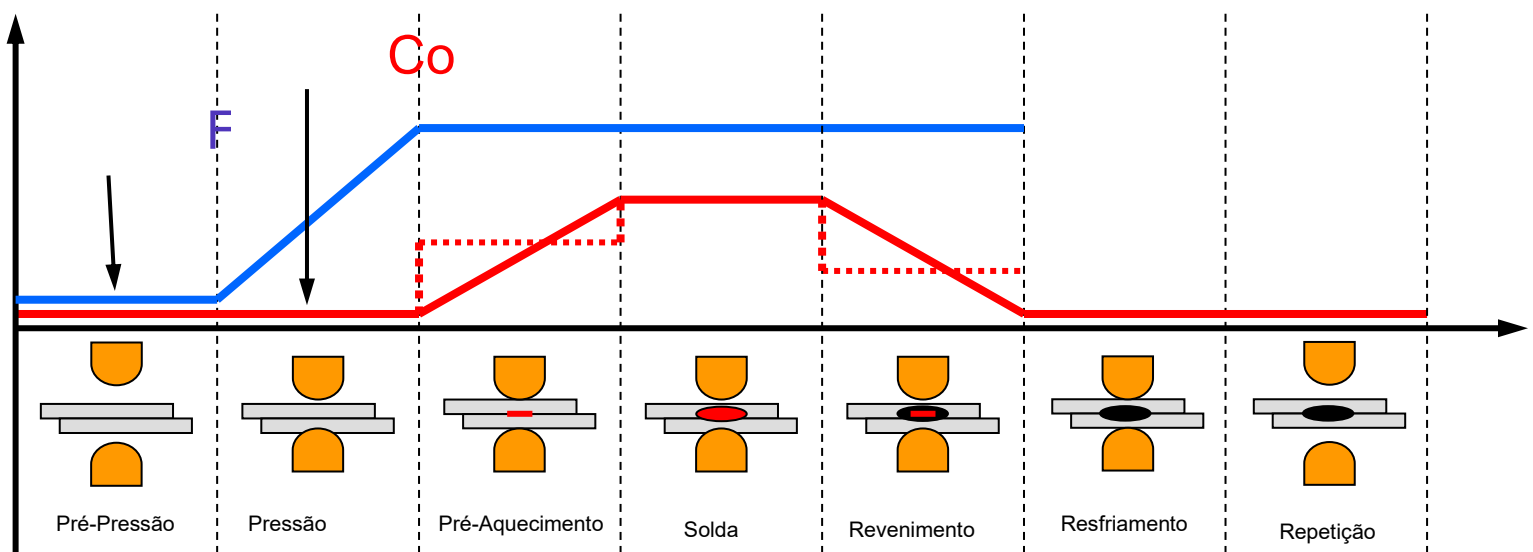
Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

Expulsão na superfície	Deformação da peça	Superfície porosa	Latão e buraco na superfície
			
<p>1-Baixa força. 2-Alto calor gerado (alta corrente). 3-Área dos eletrodos muito grande.</p>	<p>1-Eletrodos desalinhados 2-Peça fora de posição.</p> <p>Metal em torno do ponto está curvado ou deformado.</p>	<p>1-Corrente fluiu enquanto os eletrodos fechavam. Baixo tempo de pré-pressão. 2-Sujeira isolante na superfície da chapa. 3-Tempo curto de pós-pressão.</p> <p>Buraco na superfície de contato.</p>	<p>1-Baixa força. 2-Alto calor gerado (alta corrente). 3-Refrigeração insuficiente. 4-Tempo longo de solda.</p>

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

Trincas	Escorregamento	Borda	Meia Lua
 <p>1-Alto valor corrente 2-Longo tempo de pós-pressão.</p> <p>OBS: Alto valor causa trincas na superfície ou no interior do ponto</p>	 <p>Abertura muito grande da pinça, ou porta eletrodo muito longo. Pinça com braços muito longos</p> <p>OBS: Eletrodos deslizam na superfície quando o calor é gerado podendo afetar o tamanho e o formato da lentilha.</p>	 <p>1-Pinça posicionada incorretamente. 2-Peça fora de posição.</p> <p>Solda localizada muito próximo da borda da peça.</p>	 <p>1-Pinça não está alinhada com a peça. 2-Um eletrodo ou ambos estão desalinhados.</p>

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025