

**INSTITUTO
FEDERAL**
Amazonas

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO
AMAZONAS
CAMPUS MANAUS CENTRO
DEPARTAMENTO DE PROCESSOS INDUSTRIAIS
BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**OTIMIZAÇÃO DA RESISTÊNCIA DE TRAÇÃO DE PONTOS SOLDADOS POR
CORRENTE ELÉTRICA – PROCESSO SOLDA PONTO DE UMA INDÚSTRIA DO
POLO DE DUAS RODAS**

**MANAUS - AM
2023**

CARLOS EDUARDO CARNEIRO DE CASTRO

**OTIMIZAÇÃO DA RESISTÊNCIA DE TRAÇÃO DE PONTOS SOLDADOS POR
CORRENTE ELÉTRICA – PROCESSO SOLDA PONTO DE UMA INDÚSTRIA DO
POLO DE DUAS RODAS**

Projeto de pesquisa apresentado à unidade curricular de Trabalho de Conclusão de Curso, submetido ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas – Campus Manaus Centro, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, sob a orientação do Prof. Efraim Menezes de Lima Costa.

**MANAUS - AM
2023**

Biblioteca do IFAM- Campus Manaus Centro

C355o Castro, Carlos Eduardo Carneiro de.
Otimização da resistência de tração de pontos soldados por corrente elétrica – processo solda ponto de uma indústria do polo de duas rodas / Carlos Eduardo Carneiro de Castro. – Manaus, 2023.
42 p. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecânica) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas, *Campus Manaus Centro*, 2023.

Orientador: Prof. Me. Efraim Menezes de Lima Costa.

1. Engenharia mecânica. 2. Soldagem por pontos. 3. Ensaios mecânicos. 4. Parametrização. I. Costa, Efraim Menezes de Lima. (Orient.) II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas IV. Título.

CDD 621

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pelo dom da vida, minha família e bênçãos em minha vida.

Agradeço à minha Mãe, Carla Macedo, que sempre trabalhou para que eu tivesse uma educação de qualidade e nunca deixou faltar nada em minha vida.

Agradeço aos meus tios: Fabricio Kennedy, Daniel Macedo e Luciane Macedo pelo apoio, carinho e cuidado. Sempre presentes em minha infância e em meu crescimento.

Agradeço aos meus companheiros de trabalho: Mateus Bezerra, Yuri Figueiredo, Marenildo Ferreira e Francisco Gabriel pela parceria nas atividades cotidianas.

Agradeço aos amigos do IFAM que estiveram comigo nessa caminhada: Claudio Victor, Duan Fernandes, Brendon Batista, Gabriel Nunes, Williams Lira, Marcus Paulo e Jaílson Pereira.

Agradeço aos meus amigos Thiago Batista e Jorge Lucas pela constante parceria, conselhos, consideração e paciência para com minha pessoa. Vocês são irmãos que conheci na corrida dessa vida.

Agradeço também a todos os professores do IFAM que me guiaram nessa caminhada: Efraim Menezes, Camila Pinto, Benjamin Batista, Marcelo Gama, Plácido Ferreira, Cristóvão, Marisol Plácido, Ricardo Herculano e Carlos Alberto.

Agradeço à minha falecida avó Romilda Macedo por ter me criado, cuidado de mim e sempre intercedido por mim em suas orações.

Agradeço ao meu falecido professor Carlos Machado por ser um profissional exemplar e transmitir seu conhecimento de forma clara e didática à seus alunos.

E aos que não mencionei aqui, mas que estiveram comigo nesta caminhada. Muito Obrigado!

Tudo posso naquele que me fortalece.

Filipenses 4:13

RESUMO

A soldagem a ponto por resistência é o processo mais usado na montagem de estruturas, tais como: automóveis, caminhões, aviões, vagões de trem e etc. Como exemplo, na montagem das carrocerias de automóveis são necessários em média 5.000 pontos de solda. Estes fatos evidenciam a importância deste processo de soldagem na montagem de carroceria devido a sua eficiência, rapidez e facilidade na automação. Além disso, o comportamento da soldagem a ponto por resistência é extremamente importante para a qualidade de toda a estrutura soldada. O presente trabalho foi voltado para a avaliação e estudo de otimização no processo de soldagem por pontos no polo de duas rodas, com foco principal na resistência mecânica de tração dos pontos soldados, partindo de um método estatístico de planejamento fatorial, utilizando as variáveis que influenciam diretamente nos valores de tração. Em seguida foram feitos testes de qualidade para validar o teste proposto. Foram analisados os pontos de relação entre o que temos atualmente versus o que foi proposto. Os testes para validação dos parâmetros foram embasados nos testes de macrografia e a resistência mecânica com ensaio de tração. o processo de otimização foi possível verificar que aplicando uma corrente de 7,5 kA, tempo de solda de 14 milissegundos e força do eletrodo de 189 kgf, foi possível chegar a 4667,19N de resistência de solda à ponto, um ganho de 345N em relação a resistência atual. Os resultados mostraram que, a soldagem com os fatores Corrente e Força de Solda apresentou-se melhor resistência mecânica comparada com a soldagem fator Corrente x Tempo de solda. Os ensaios propostos neste trabalho foram relatados em documento na empresa para tabelar e mapear os parâmetros caso futuramente ocorra variações no processo de soldagem por pontos. Todos os pontos de solda com os parâmetros otimizados encontrados pelo método apresentado, neste trabalho, foram aprovados conforme norma. Os resultados apontam melhoria no processo e indicam contribuições para a engenharia.

Palavras-chave: Soldagem por pontos; Ensaio Mecânicos; Parametrização

ABSTRACT

Resistance spot welding is the most used process in the assembly of structures, such as: automobiles, trucks, planes, train cars, etc. As an example, in the assembly of car bodies, an average of 5,000 welding points are required. These facts show the importance of this welding process in bodywork assembly due to its efficiency, speed and ease of automation. In addition, resistance spot welding behavior is extremely important for the quality of the entire welded structure. The present work will be focused on the evaluation and study of optimization in the spot welding process on the pole of two wheels, with main focus on the mechanical tensile strength of the welded spots, starting from a statistical method of factorial planning, using the variables that directly influence in the traction values; Then, quality tests were performed to validate the proposed test. The optimization process it was possible to verify that applying a current of 7.5 kA, welding time of 14 milliseconds and electrode force of 189 kgf, it was possible to reach 4667.19 N of spot welding resistance, a gain of 345 N in relative to current resistance. The points of relationship between what we currently have versus what will be proposed were analyzed. Parameter validation tests will be based on macrography tests and mechanical strength with tensile testing. The results showed that the welding in the factors Current and Welding Force presented better mechanical resistance compared with the welding factor Current x Welding Time. The tests proposed in this work will be reported in a document at the company to table and map the parameters in case there are variations in the spot welding process in the future. All solder points with the optimized parameters found by the method presented in this work were approved according to the standard.

Keywords: Spot welding; Mechanical Tests; Parameterization

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Princípio de funcionamento da soldagem por resistência elétrica.	14
Figura 2. Processo da linha de soldagem por pontos da indústria de duas rodas	16
Figura 3. Gráfico Tensão x Deformação	17
Figura 4. Fluxograma	18
Figura 5. Cubo geométrico do planejamento fatorial completo	22
Figura 6. Amostra padronizada.	24
Figura 7. Dinamômetro Shimadzu	25
Figura 8. Área de corte do Corpo de Prova	33
Figura 9. Cortadora	33
Figura 10. Embutimento	34
Figura 11. Lixadeira AROTEC	34
Figura 12. Solução de Nital	35
Figura 13. Análise do corpo de prova Macroscópica	36
Figura 14. Análise Macro do corpo de prova atual	36
Figura 15. Análise Macro do corpo de prova otimizado	37
Figura 16. Amostra Atual x Otimizado	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Variação dos parâmetros de entrada na ponteadeira.	19
Tabela 2. Matriz de Planejamento	22
Tabela 3. Planejamento Fatorial Completo 23 (Real/Codificado)	23
Tabela 4. Matriz do Planejamento Fatorial 23 com Pontos Centrais (RODADA 1)	25
Tabela 5. Matriz Pontos Compostos e Centrais (RODADA 2)	27
Tabela 6. Matriz - Ponto Otimizado (RODADA 3)	28
Tabela 7. Amostra Atual x Otimizada	37

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
2. OBJETIVOS	12
2.1 OBJETIVO GERAL	12
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
3.1 PROCESSO DE SOLDAGEM	13
3.1.2 Soldagem por Resistência Elétrica	13
3.1.2 Parâmetros de Regulagem e Variáveis do processo	14
3.1.3 Força dos Eletrodos (Pressão)	14
3.1.4 Corrente de Soldagem	15
3.1.5 Tempo de soldagem	15
3.2 PROCESSO DE SOLDAGEM POR PONTOS EM UMA INDÚSTRIA DO POLO DE DUAS RODAS	15
3.3 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO	16
3.3.1 Limite de resistência à tração	17
4. MATERIAIS E MÉTODOS	18
4.1 ESTATÍSTICA	19
4.1.1 Estatística Descritiva	20
4.1.2 Média, Moda e Mediana	20
4.1.3 Desvio médio absoluto, variância desvio padrão	20
4.2 PLANEJAMENTO FATORIAL	21
4.2.1 Experimento Fatoriais	21
4.3 FATORES (VARIÁVEIS DE ENTRADA) - Atualmente	23
4.4 ENSAIO DE TRAÇÃO	25
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	25
5.1 START DO PLANEJAMENTO FATORIAL	25
5.2 PRIMEIRA VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS	27
5.3 SEGUNDA VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS	29
5.4 GRÁFICOS TENSÃO X DEFORMAÇÃO	30
5.5 VALIDAÇÃO DO RESULTADO: MACROGRAFIA	33
7. CONCLUSÃO	39
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	41

1. INTRODUÇÃO

A soldagem é um processo utilizado na indústria para fabricação de peças metálicas. O sucesso da soldagem está associado a diversos fatores e, em particular, com a sua simplicidade devido à sua metodologia operacional. Desde a antiguidade e na idade média era utilizada para fabricação de armas e outros instrumentos cortantes, devido a sua simplicidade. O conceito do termo soldagem descreve que é a junção de duas peças de um determinado material, através de calor e eletricidade. O material soldado deve apresentar a capacidade de aguentar esforços excessivos de tensões internas e externas para garantir que aquele material soldado atenda as especificações nele requerida.

A soldagem por resistência acontece por um processo de pressão produzido a partir da superfície de contato entre duas peças distintas, por meio do calor gerado por efeito joule durante a circulação da corrente elétrica na resistência de junção (KEARNS, 1984). Esse processo é um dos mais utilizados na indústria automobilística principalmente na fabricação de peças internas como chassis, garfos e tanques de combustíveis de motos e carros, pois oferece alta produtividade e tem um custo operacional baixo quando comparado com outras técnicas de união. (CHRISTOFOLETTI, 2013).

No processo de soldagem por pontos ocorre alguns desvios como falhas mecânicas, operacionais e de parâmetros técnicos. Essas falhas acontecem devido à falta de manutenção preventiva e corretiva nas máquinas de solda. As falhas operacionais decorrem da falta de treinamento adequado ou quebras de fluxo durante o processo de fabricação. Já as falhas em parametrização técnica ocorrem por parâmetros mal estabelecidos durante o planejamento das peças resultando na fabricação de peças não conformes impactando na qualidade do produto além de apresentar risco à segurança do cliente.

Com o intuito de amenizar as falhas de parametrização técnica se faz necessário no processo produtivo ter mais de uma programação de regulagem de parâmetros de soldagem a ponto por resistência elétrica. Os principais parâmetros responsáveis por uma soldagem eficiente são a corrente elétrica, força aplicada e o tempo. Sobre a intensidade da corrente elétrica na soldagem por resistência é determinada em função das características físicas da espessura do material a soldar, podendo variar de 5 a 30 kA (STOCCO, 2003).

A realização de variações nos parâmetros de soldagem a ponto tem apresentado ótimos resultados no que diz respeito às propriedades mecânicas em chapas de aço. No trabalho de Christofolletti (2013) foi realizada uma avaliação das propriedades mecânicas de juntas soldadas por pontos em chapas de aço carbono com a variação dos parâmetros de soldagem, como corrente elétrica força aplicada e tempo. Como resultado obteve-se dados que possibilitaram verificar quais parâmetros mais influenciam no processo de soldagem por pontos e quais realizaram soldas eficientes, além da variabilidade do processo.

O presente trabalho está dividido da seguinte maneira:

- 1) Apresentação dos objetivos da pesquisa;
- 2) Referencial teórico, em que são apresentados os fundamentos de processo de soldagem por pontos, destacando seus parâmetros, regulagem e variáveis do processo;
- 3) Metodologia, que contém a abordagem utilizada, os métodos de experimentos e ainda o tratamento dos dados por Definição Estatística Descritiva através do Planejamento fatorial (2^3);
- 4) Resultados e discussões, que apresenta os resultados dos experimentos de forma comentada e a validação dos resultados como forma de dar maior confiabilidade na pesquisa.
- 5) Considerações Finais;

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Otimizar o processo de soldagem por pontos, variando os parâmetros e avaliando as propriedades mecânicas das juntas soldadas de uma indústria do polo de duas rodas.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar o ensaio destrutivo de tração com parâmetros correntes versus otimizado;
- Realizar o ensaio metalográfico em corpos de prova soldados padronizados;
- Verificar, através dos ensaios, a melhor resistência mecânica, modo de ruptura e a macroestrutura das soldas executadas;
- Encontrar um ponto otimizado para o processo de soldagem por pontos.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

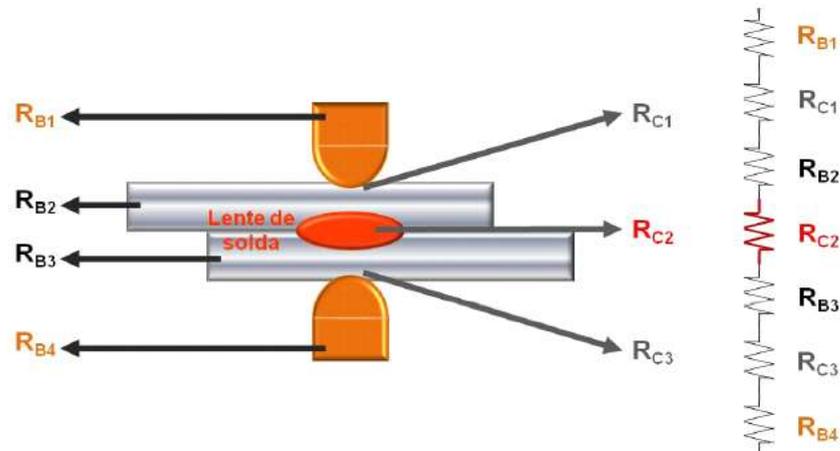
3.1 PROCESSO DE SOLDAGEM

O processo de soldagem de pontos por resistência é largamente difundido na indústria automobilística, sendo atualmente o mais aplicado na união dos variados tipos de chapas que formam a carroçaria. Em comparação ao processo de soldagem por abertura de arco elétrico, tem como vantagens proporcionar menor aquecimento às partes unidas, uma vez que a fusão é restrita apenas ao local de formação do ponto, não acrescentar peso extra ao produto, uma vez que não utiliza materiais de adição além de proporcionar custos mais baixos (SANTOS e MAINIER,2006).

3.1.2 Soldagem por Resistência Elétrica

A união das chapas no processo de solda a ponto por resistência se dá pelo calor gerado por efeito Joule ($Q = I^2 \cdot R \cdot t$), o qual depende diretamente da corrente (I), da resistência elétrica e do tempo em segundos (t). É possível observar na Figura 2.1 que esta resistência (R) é a soma de todas as resistências no circuito onde a corrente passa, como as resistências de contato (R_{B1} e R_{B4}), as resistências das chapas (R_{B2} e R_{B3}), e as resistências de contato (R_{c1} , R_{c2} e R_{c3}). No entanto, o local onde se quer obter a maior temperatura é onde se deseja que ocorra a solda (lente), ou seja, no contato entre as duas chapas (R_{c2}). Para isso, os eletrodos são fabricados com materiais de baixa resistência elétrica, em sua maioria com ligas a base de cobre. São também fabricados de um material que se deforma facilmente, assentando melhor a superfície da chapa. Os dois fatos fazem diminuir as resistências elétricas R_{c1} e R_{c3} , minimizando o calor gerado nestas regiões (NASCIMENTO, 2008).

Figura 1. Princípio de funcionamento da soldagem por resistência elétrica.



Fonte: Nascimento (2008)

3.1.2 Parâmetros de Regulagem e Variáveis do processo

A resistência elétrica no circuito da corrente é o fator principal da soldagem. Ela que vai determinar os valores demandados para outros parâmetros. Os principais parâmetros de regulagem do processo para uma formação adequada da lente de solda entre as partes metálicas (chapas) a serem soldadas são intensidades de corrente, tempo de fluxo de corrente e força entre os eletrodos (NASCIMENTO,2008).

3.1.3 Força dos Eletrodos (Pressão)

A força dos eletrodos garante o perfeito contato entre as peças superior e inferior realizando assim em conjunto com a corrente e tempo de solda uma soldagem eficaz. O valor aplicado dessa força deve ser bem determinado a fim de não produzir projeções no material do ponto de solda e ter uma solda de baixa qualidade. Por outro lado, a força aplicada não pode ser muito alta, isso pode acarretar uma soldagem com excessos de rebarbas, podendo gerar fagulhas no momento da soldagem e possíveis trincas do material. (STOCCO,2003).

Os eletrodos devem ter uma elevada dureza, resistência ao amolecimento e ao desgaste em temperaturas elevadas, além de não formar liga de baixo ponto de fusão com o material a ser soldado, e de suma importância, ter boa condutibilidade elétrica, a maioria dos eletrodos do mercado possuem em sua estrutura ligas de cobre endurecidas por tratamento térmico de precipitação.

3.1.4 Corrente de Soldagem

O Calor que é gerado através de uma corrente elétrica que tem como condutor os eletrodos de liga de cobre são direcionados a um ponto. O calor é retido nesse ponto e são atingidas elevadas temperaturas, causando a fusão dos materiais envolvidos.

A intensidade da corrente elétrica na soldagem por resistência é determinada em função das características físicas da espessura do material a soldar, podendo variar de 5 a 30 kA (STOCCO,2003).

3.1.5 Tempo de soldagem

Este parâmetro é o tempo de aplicação da corrente de soldagem no ciclo que deve ser inversamente proporcional a intensidade da corrente de soldagem (VARGAS, 2006). A quantidade de calor gerado na junta é diretamente proporcional ao tempo de aplicação da corrente elétrica. Logo o tempo deve ser sempre otimizado em função dos parâmetros de soldagem. A unidade de tempo usada no processo é denominada ciclo. Cada ciclo é igual a $1/f$, onde f (Hz) é a frequência da rede, no Brasil a frequência pode ser de 50 Hz ou 60 Hz, dependendo da região, logo cada ciclo equivale à $1/50$ ou $1/60$ segundos (FONSECA, 1999).

3.2 PROCESSO DE SOLDAGEM POR PONTOS EM UMA INDÚSTRIA DO POLO DE DUAS RODAS

Em uma indústria do polo de duas rodas o processo de soldagem por pontos acontece através de uma linha de produção sequencial. As peças estampadas são posicionadas em uma esteira em cima de uma bancada onde cada operador é responsável por uma etapa do processo. Cada ponteadeira (máquina de solda a ponto) é programada através de uma “folha de processo” elaborada pela equipe de engenharia industrial. Nessa folha de processo contém os valores de parâmetros que são imputados em cada máquina que devem ser seguidos pelos operadores (Figura 2).

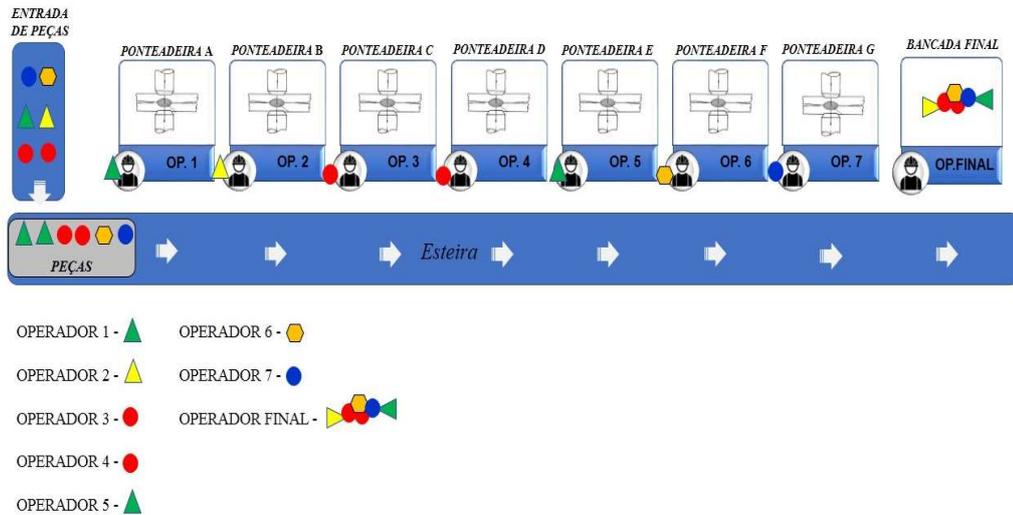


Figura 2. Processo da linha de soldagem por pontos da indústria de duas rodas

Como Fonte: Autor, (2022).

em qualquer processo de fabricação em grande escala as falhas mecânicas, operacionais e de parâmetros técnicos acontece. Um exemplo de falha operacional que ocorre no processo é se um dos operadores inserir de forma errônea os parâmetros na ponteadeira a peça apresentará um defeito de qualidade. Já as falhas de parametrização técnica acontecem por parâmetros mal estabelecidos no momento do desenvolvimento do projeto. Esta etapa é primordial para que não se tenha custo operacionais elevados. Portanto este trabalho visa otimizar o processo em questão a partir de um planejamento fatorial, modelagens e simulações de parâmetros de entrada no processo de solda.

3.3 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

Assegurar a qualidade de uma junta soldada é muito importante, para garantir que esta possua as propriedades mecânicas mínimas para que possa ser aplicada sem risco (Pinto, 2010). Ensaios destrutivos e não destrutivos podem ser realizados para assegurar que as condições desejadas foram atendidas. Dentre os ensaios destrutivos um que se encontra amplamente disseminado na indústria é o ensaio de tração. Este ensaio consiste na aplicação de uma carga axial crescente de tração que é aplicada até a ruptura do material. Até que se atinja uma carga máxima, próxima ao fim do ensaio, pode-se afirmar que as deformações são praticamente uniformemente

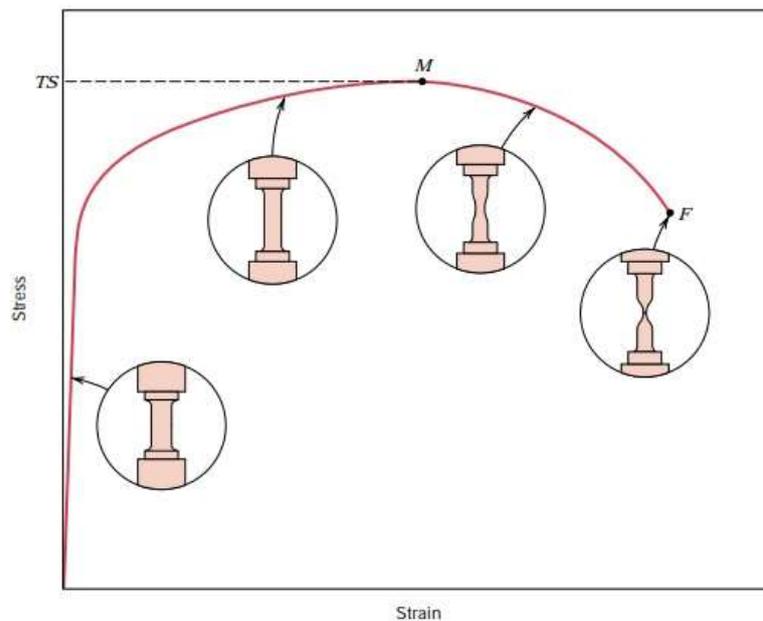
distribuídas. (Dalcin, 2007).

Na área de soldagem não tão diferente, a resistência é um fator determinante para saber o quanto a soldagem pode resistir a um esforço externo sem que comprometa a sua qualidade. Neste caso, iremos realizar o ensaio de tração para validar a soldagem por pontos.

3.3.1 Limite de resistência à tração

O limite de resistência à tração “TS”, é a tensão no ponto mais alto da curva de tensão/deformação. Em outras palavras é a tensão máxima que pode ser sustentada por um material sob tração.

Figura 3. Gráfico Tensão x Deformação



Fonte: Callister,2007

O limite de resistência de tração consiste na aplicação de uma força de tração axial num corpo de prova padronizado, promovendo a deformação do material na direção do esforço, que tende a alongá-lo até fraturar (Figura 3). Devido à facilidade de execução e reprodutibilidade dos resultados, este ensaio é amplamente utilizado. Com ele é possível determinar o gráfico de Tensão Deformação e medir as propriedades de Resistência à Tração, Módulo de Elasticidade, Tensão no

Escoamento, Tensão na Ruptura, Deformação no Escoamento, Deformação na Ruptura. O que nos interessa para estudo é exatamente o Limite máximo (TS) que esse corpo de prova soldado resistirá ao ensaio.

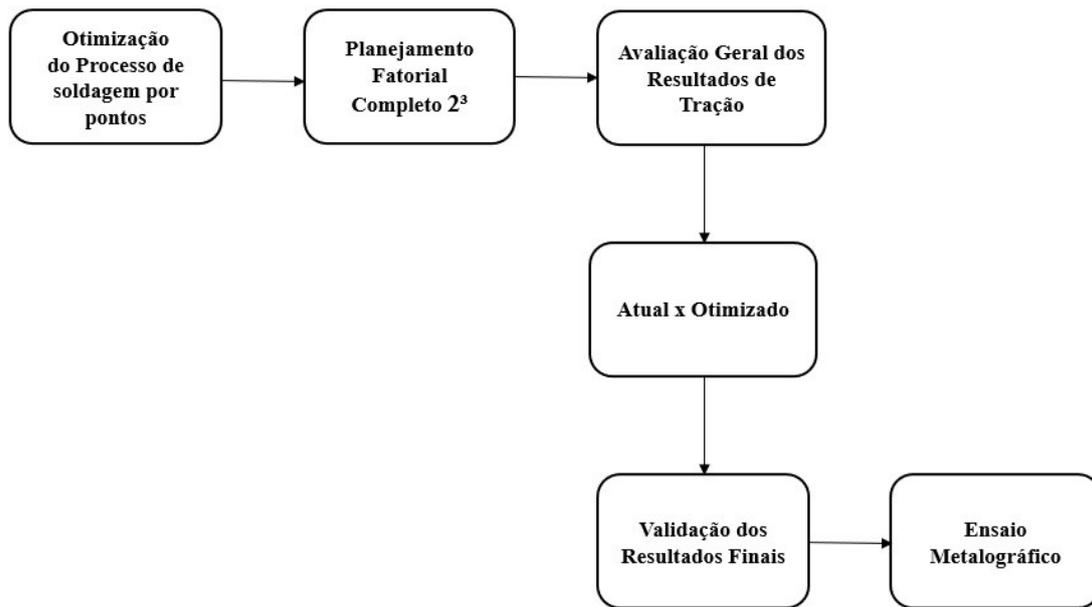
4. MATERIAIS E MÉTODOS

Com relação à classificação dessa pesquisa foi utilizada a exploratória no qual buscou-se embasamento teórico em livros de referências, além de atuar em ensaios físico experimental de tração em amostras de peças soldadas com parâmetros distintos. O livro como fazer experimentos edição da Unicamp-SP, autor (Bruns, 1996), foi o ponto inicial de abordar e organizar os dados que compõe o processo de soldagem por pontos.

Quanto à abordagem foi quali-quantitativa, utilizando o planejamento fatorial dos fatores controláveis do processo com tempo de soldagem, corrente elétrica da soldagem e força de eletrodo. Além disso foi avaliado o teste de cisalhamento para verificar a deformação na força máxima de tração, baseado no livro “fundamentos da ciência e engenharia dos materiais”, (CALLISTER, 2007).

A otimização do processo de soldagem por pontos mencionado anteriormente será realizada conforme as etapas do fluxograma. (FIGURA 4)

Figura 4. Fluxograma



Fonte: Autor (2022).

As faixas que serão utilizadas e variadas neste estudo inicial estão descritas na Tabela 1.

Tabela 1. Variação dos parâmetros de entrada na ponteadeira.

Corrente (kA)	Tempo de solda (ms)	Força do eletrodo (kgf)
6 e 8	12 e 16	180 e 200

Fonte: Autor (2022).

Como anunciado anteriormente, foi utilizado o planejamento fatorial, por isso foi necessário revisitar alguns conceitos de estatística aplicada, para seguir o maior rigor científico possível na metodologia aplicada.

4.1 ESTATÍSTICA

A estatística é a ciência que se preocupa com a organização, descrição, análise e interpretação dos dados experimentais para a tomada de decisões. A razão pela qual é uma ferramenta importante para a tomada de decisões está no fato de que ela não deve ser considerada como um fim em si própria, mas como um instrumento fornecedor de informações que contribui para as melhores tomadas de decisões. A

ciência estatística é dividida basicamente em duas partes: a estatística descritiva que se preocupa com a organização e descrição dos dados experimentais e a estatísticas indutiva, que cuida da sua análise e interpretação (NETO, 2002).

4.1.1 Estatística Descritiva

O objetivo básico da estatística descritiva é sintetizar uma série de valores de mesma natureza, permitindo dessa forma que se tenha uma visão global da variação desses valores, além de, organizar e descrever os dados de três maneiras: por meio de tabelas, de gráficos e de medidas descritivas (GUEDES,2005). As medidas descritivas mais utilizadas são: medidas de localização, medidas de dispersão, medidas de assimetria, medidas de curtose e medidas de concentração. As medidas de localização são a média aritmética, mediana e moda e nas medidas de dispersão: desvio absoluto médio, variância e desvio padrão (MORAIS, 2005).

4.1.2 Média, Moda e Mediana

A média aritmética é o quociente entre a soma de todos os valores observados e o número total de observações. A moda de um conjunto de observações é o valor mais frequente, caso exista. Quando existe mais do que um valor com a frequência mais elevada, o conjunto dos valores mais frequentes constituem uma classe modal. A moda pode ser considerada como o evento ou categoria de eventos que ocorreu com maior frequência, indicando o valor ou categoria mais provável para um conjunto de dados, define-se moda como sendo: o valor que surge com maior frequência, se os dados são discretos; o intervalo da classe com maior frequência se os dados são contínuos. Já a mediana é uma medida de localização do centro da distribuição dos dados. Após a ordenação dos elementos da amostra de dados, a mediana é o valor (pertencente ou não à amostra) que a divide ao meio, isto é, 50% dos elementos da amostra são menores ou iguais à mediana e os outros 50% são maiores ou iguais à mediana (MORAIS, 2005).

4.1.3 Desvio médio absoluto, variância desvio padrão

O desvio absoluto médio de um conjunto de n observações é a média dos valores absolutos das diferenças entre as observações e a média. A variância representa-se por s^2 , como sendo a medida que se obtém somando os quadrados dos desvios das observações da amostra, relativamente à sua média, e dividindo por n ou

por $n-1$. O desvio padrão é uma medida que só pode assumir valores não negativos e quanto maior for, maior será a dispersão dos dados. O desvio padrão é sempre positivo e é tanto maior quanto maior for a variabilidade dos dados. Se $s = 0$, então não existe variabilidade, isto é, os dados são todos iguais (MORAIS, 2005).

4.2 PLANEJAMENTO FATORIAL

Planejar experimentos é definir uma sequência de coletas de dados experimentais para atingir certos objetivos. Dentre os métodos de planejamento experimental disponíveis na literatura, o planejamento fatorial é o mais indicado quando se deseja estudar os efeitos de duas ou mais variáveis de influência, sendo que em cada tentativa ou réplica, todas as combinações possíveis dos níveis de cada variável são investigadas (BARROS NETO et al., 1996)

O planejamento fatorial é uma estratégia analítica útil e sua principal aplicação reside na triagem das variáveis mais relevantes de um determinado sistema analítico. Para executar um planejamento fatorial é necessário especificar os níveis em que cada fator deve ser estudado, isto é, os valores dos fatores que vão ser usados para realizar os experimentos. Para estudar o efeito de qualquer fator sobre uma dada resposta, é preciso variar de nível e observar o resultado que essa variação produz sobre a resposta. Para isso precisamos ter o fator em pelo menos dois níveis diferentes, podemos concluir que o planejamento mais simples de todos é aquele em que todos os fatores são estudados em apenas dois níveis. Para k fatores, isto é, k variáveis controladas pelo experimentador, um planejamento completo de dois níveis exige a realização de $2 \times 2 \times \dots \times 2 = 2^k$ ensaios diferentes, sendo chamado por isso de planejamento fatorial 2^k . (NETO, SCARMINIO e BRUNS 2001).

4.2.1 Experimento Fatoriais

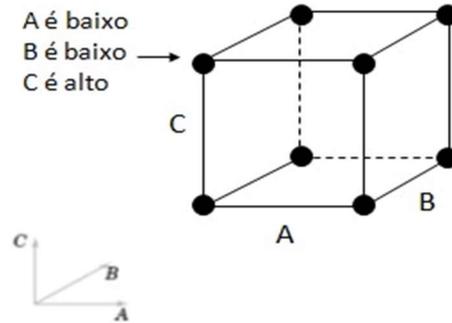
Os experimentos fatoriais 2^k são compostos por k tratamentos, cada um com apenas dois níveis (que chamamos de alto e baixo). A partir das adaptações se obtém todos os componentes de um experimento fatorial com 3 fatores, cada um com dois níveis. O modelo estatístico geral simplificado para um experimento fatorial 2^3 pode ser escrito na equação 1.

$$y = A + B + C + AB + AC + BC + ABC + \epsilon \quad (1)$$

Portanto, esse planejamento permite estimar 3 efeitos principais, 3 efeitos de

interações de segunda ordem, e 1 interação de terceira ordem. Usando a representação geométrica temos um cubo, onde cada dimensão representa um fator (Figura 5).

Figura 5. Cubo geométrico do planejamento fatorial completo



Fonte: Neri e Correia, (2016).

Dessa forma, obtemos também a seguinte tabela de sinais para os efeitos principais, seguindo a ordem de Yates (Tabela 2).

Tabela 2. Matriz de Planejamento

Experimentos	A	B	C
1	-	-	-
2	+	-	-
3	-	+	-
4	+	+	-
5	-	-	+
6	+	-	+
7	-	+	+
8	+	+	+

Fonte: Autor, (2022)

A ordem padrão (ordem de Yates) é a ordem dos ensaios organizada por mudanças nas definições de fatores.

As colunas das interações são obtidas multiplicando-se as colunas dos respectivos fatores. Nota-se que em um experimento fatorial 2^3 temos então 8

combinações possíveis para os 3 tratamentos (NERI e CORREIA, 2016).

4.3 FATORES (VARIÁVEIS DE ENTRADA) - Atualmente

Os fatores de entrada no processo de soldagem a ponto foram escolhidos com base nos parâmetros que já se utiliza nesta indústria. As faixas de trabalho estão descritas a seguir:

- Corrente: $7,0 \pm 0,3$ Quilo-amper;
- Tempo de solda: 15 milisegundos;
- Força do eletrodo: 200 Quilograma-força.

Esses fatores influenciam diretamente no resultado de resistência a tração da soldagem por pontos. Se um desses fatores oscilar ou ser mal atribuído ao processo, a qualidade da soldagem apresentará desvios como trincas, quebras e rupturas na junção soldada. A corrente de solda é a força elétrica que aquece os materiais no momento da soldagem, caso apresente um valor muito alto ou baixo, pode acarretar uma solda frágil ou até mesmo deformação no material em um caso de alto valor da corrente.

O tempo de solda é o momento em que os eletrodos estão em contato com as peças que estão sendo soldadas. Se o tempo for muito curto, pode levar a uma soldagem de baixa fusão, em outras palavras, pode não realizar a “liga” necessária para a fusão dos materiais envolvidos. Por fim, o último fator escolhido para esse estudo, foi a Força dos Eletrodos, que é pressão realizada entre os eletrodos e as peças. A pressão deve ser bem calculada, pois se muito alta nos leva ao problema de indentação, que é uma deformação de relevo na peça devido a uma pressão excessiva dos eletrodos.

Tabela 3. Planejamento Fatorial Completo 23 (Real/Codificado)

Nº exp.	Corrente I - (kA)	Codificado	Tempo t - (ms)	Codificado	Força do eletrodo (kgf)	Codificado	Resultado de Resistência a a tração
---------	-------------------	------------	----------------	------------	-------------------------	------------	-------------------------------------

							(N)
1	6	(-1)	12 (-1)	(-1)	180 (-1)	(-1)	
2	8	(1)	12 (-1)	(-1)	180 (-1)	(-1)	
3	6	(-1)	16 (1)	(1)	180 (-1)	(-1)	
4	8	(1)	16 (1)	(1)	180 (-1)	(-1)	
5	6	(-1)	12 (-1)	(-1)	200 (1)	(1)	
6	8	(1)	12 (-1)	(-1)	200 (1)	(1)	
7	6	(-1)	16 (1)	(1)	200 (1)	(1)	
8	8	(1)	16 (1)	(1)	200 (1)	(1)	

Fonte: Autor (2022).

Onde: I = Corrente de solda (Quilo- Ampere);

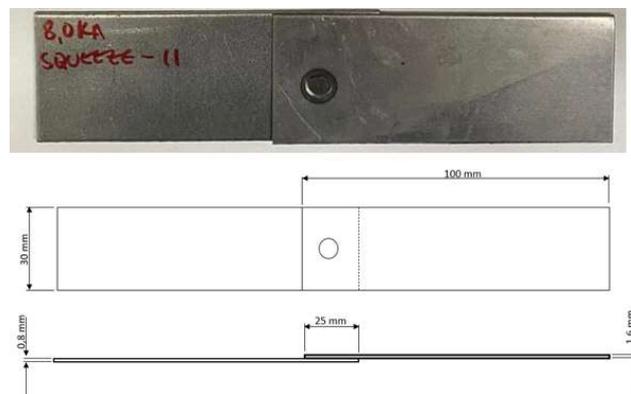
t = Tempo de Solda (milissegundos);

F_e = Força Eletrodo (Quilograma-força).

Após essa determinação foi elaborada uma tabela no programa Excel ® dispondo a quantidade dos experimentos com os parâmetros de corrente de solda, tempo de solda e força dos eletrodos. A variável de saída do sistema que será otimizada é a resistência a tração.

O teste de soldagem será realizado em duas chapas de aço galvanizado sendo uma com espessura de 0,8 mm e a outra de 1,6 mm com dimensões de 100mm x 30 mm (Figura 6).

Figura 6. Amostra padronizada.



Fonte: Autor (2022).

4.4 ENSAIO DE TRAÇÃO

A fim de entender o efeito das variáveis de processo na qualidade da solda e controlar o processo de soldagem foi realizado o teste de tração com o objetivo de obter os resultados de resistência a tração nos corpos de prova. O equipamento utilizado foi o dinamômetro da marca Shimadzu modelo AG-IS 100 kN (Figura 7).

Figura 7. Dinamômetro Shimadzu



Fonte: Autor (2022).

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 START DO PLANEJAMENTO FATORIAL

Através do planejamento fatorial 2^3 completo, para estudar o efeito da variação dos parâmetros de soldagem, foi obtido os primeiros resultados (Tabela 4).

Tabela 4. Matriz do Planejamento Fatorial 2^3 com Pontos Centrais (RODADA 1)

Nº exp.	Corrente I - (kA)	Codificação	Tempo t - (ms)	Codificação	Força do eletrodo (kgf)	Codificação	Resultado de Resistência a tração (N)
1	6	(-1)	12 (-1)	(-1)	180 (-1)	(-1)	2270

2	8	(1)	12 (-1)	(-1)	180 (-1)	(-1)	3364
3	6	(-1)	16 (1)	(1)	180 (-1)	(-1)	2631
4	8	(1)	16 (1)	(1)	180 (-1)	(-1)	3443
5	6	(-1)	12 (-1)	(-1)	200 (1)	(1)	2989
6	8	(1)	12 (-1)	(-1)	200 (1)	(1)	3515
7	6	(-1)	16 (1)	(1)	200 (1)	(1)	2625
8	8	(1)	16 (1)	(1)	200 (1)	(1)	3554
9	7	0	14	0	190	0	4339
10	7	0	14	0	190	0	4332
11	7	0	14	0	190	0	4302

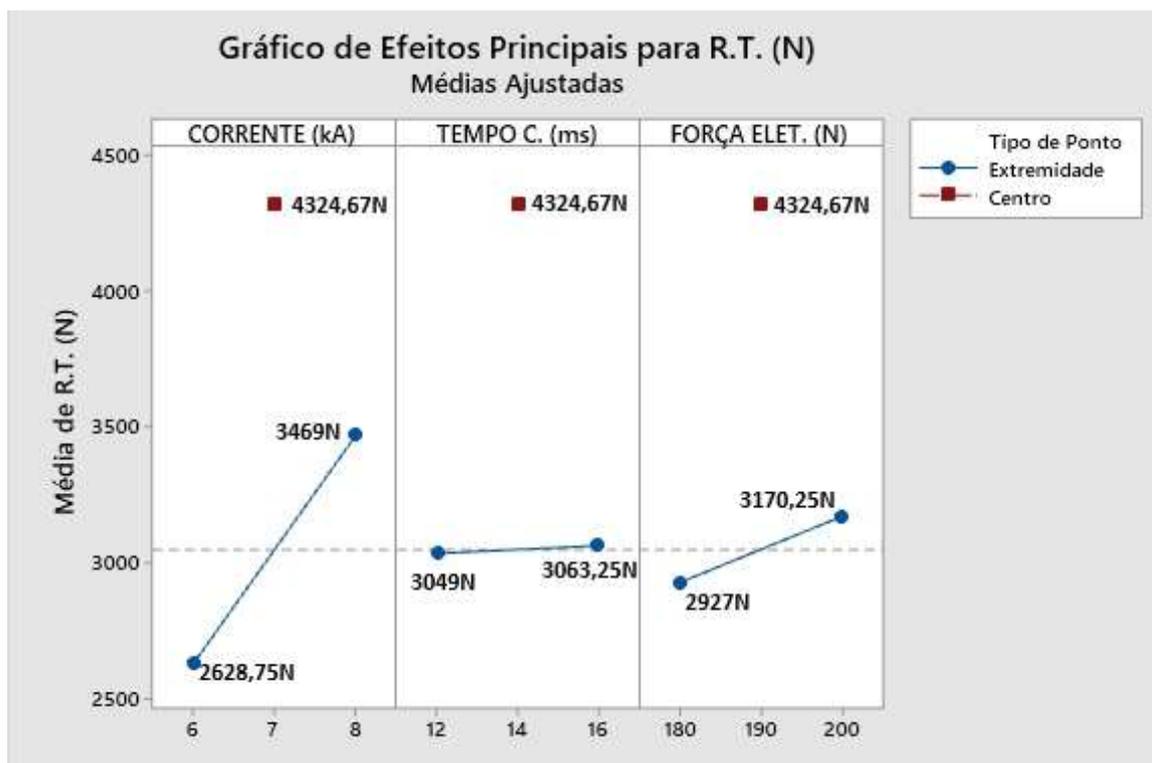
Fonte: Autor, (2022).

Sobre o planejamento fatorial chegaram-se as seguintes conclusões:

- Todas as amostras ficaram acima do valor estabelecido de 2000 Newtons pela empresa. Sendo o menor valor encontrado 2270 N.
- Todas as amostras tiveram soldagem entre as peças.
- Não houve repetição de nenhuma combinação de parâmetros de planejamento 2^3 , pois o planejamento fatorial nos possibilita este recurso.

Obs.: O ponto central do planejamento 2^3 foi analisado três vezes e encontrado os maiores valores de resistência à tração.

Gráfico 1. Efeitos Principais Resistência à Tração



Fonte: Autor, (2022).

Os resultados obtidos serão comparados com o padrão de 2000 Newton conforme padrão estabelecido pela indústria.

A Solução start do planejamento revela que o valor otimizado se encontra próximo dos pontos centrais das variáveis. Partindo do pressuposto que os valores obtidos se trata de uma não-linearidade, ou seja, os valores máximo e mínimo obtidos estão dispersos de um ponto central. Podemos realizar variações nos parâmetros para tomamos algumas conclusões.

5.2 PRIMEIRA VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS

Com a variação dos parâmetros Corrente (kA), Tempo (ms) e Força do eletrodo (kgf) foi obtida a seguinte tabela.

Tabela 5. Matriz Pontos Compostos e Centrais (RODADA 2)

Nº exp.	Corrente I - (kA)	Tempo t - (ms)	Força do eletrodo (kgf)	Resultado de Resistência a tração (N)

1	5,3	14	190	50
2	8,6	14	190	4642
3	7	10,6	190	3853
4	7	17,3	190	4301
5	7	14	173,2	4295
6	7	14	206,8	3995
7	7	14	190	4339
8	7	14	190	4332
9	7	14	190	4303
10	7	14	190	4330
11	7	14	190	4320
12	7	14	190	4290

Fonte: Autor, (2022).

Após os testes de tração, e analisando os resultados, chegou-se às seguintes conclusões:

- Experimentos 1 e 2 teve resultados altamente opostos devido a variação somente da corrente elétrica.
- Experimentos 3 e 4 teve resultados com significância próximas, alterando apenas o tempo de solda.
- Experimentos 5 e 6 teve resultados similares aos experimentos 3 e 4, alterando apenas a força dos eletrodos.
- A média dos experimentos 7 ~12 (valores centrais definidos pela empresa) teve uma média: $X = 4319N$. Valores próximos a rodada 1.
- Conclui-se que a corrente é um dos fatores com mais significância para os resultados.

Com base nos resultados na rodada 2, seguiu-se para a rodada 3 com parâmetros propostos de otimização.

5.3 SEGUNDA VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS

Na segunda variação de parâmetros, foram alterados os seguintes parâmetros:

- Corrente: 7,5 Quilo-amper;
- Tempo de solda: 14 milisegundos;
- Força do eletrodo: 189 Quilograma-força.

Tabela 6. Matriz - Ponto Otimizado (RODADA 3)

AMOSTRAS	Corrente I - (kA)	Tempo t - (ms)	Força do eletrodo (kgf)	Resultado de Resistência a tração (N)
1	7,5	14	189	4632,81
2	7,5	14	189	4667,19
3	7,5	14	189	4654,69
4	7,5	14	189	4627,12
5	7,5	14	189	4629,65
6	7,5	14	189	4619,87
7	7,5	14	189	4652,12
8	7,5	14	189	4632,25
9	7,5	14	189	4658,31
10	7,5	14	189	4666,14

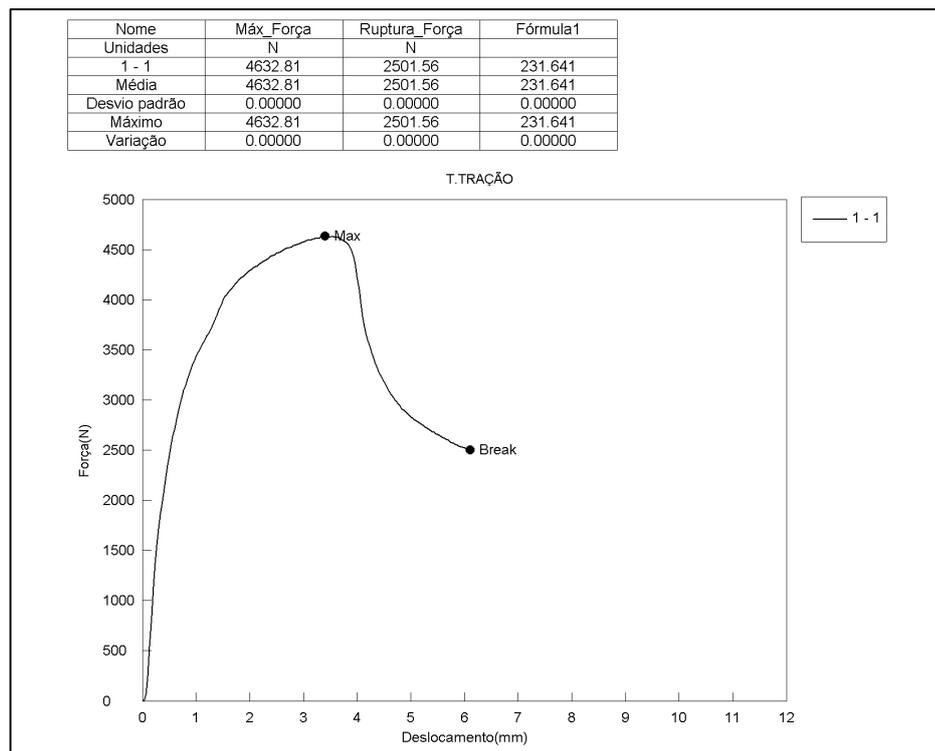
Fonte: Autor, (2022).

Nesta segunda rodada, notou-se que a variação da corrente de 6KA para 6,5 KA tornou-se a variável mais relevante.

5.4 GRÁFICOS TENSÃO X DEFORMAÇÃO

Para verificar a tensão e a deformação em cada uma das rodadas, foram construídos o gráfico tensão X deformação.

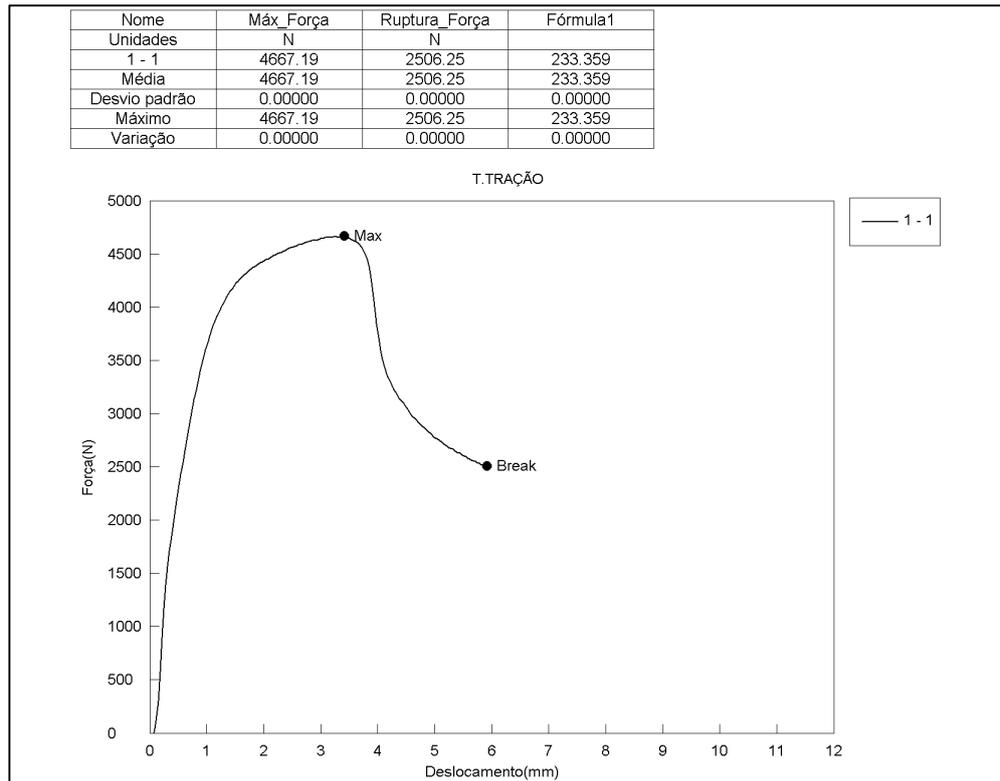
Gráfico 2. Tensão x Deformação da amostra 01 otimizada utilizando o Software Trapezium 2



Fonte: Autoria Própria,(2023)

- A máxima força (TS) encontrada e suportada da amostra 01 (OTIMIZADA) foi de **4632,81 N**
- Após TS, a amostra rompeu-se totalmente à 2501,56N
- Resultado altamente satisfatório comparado ao modelo corrente.

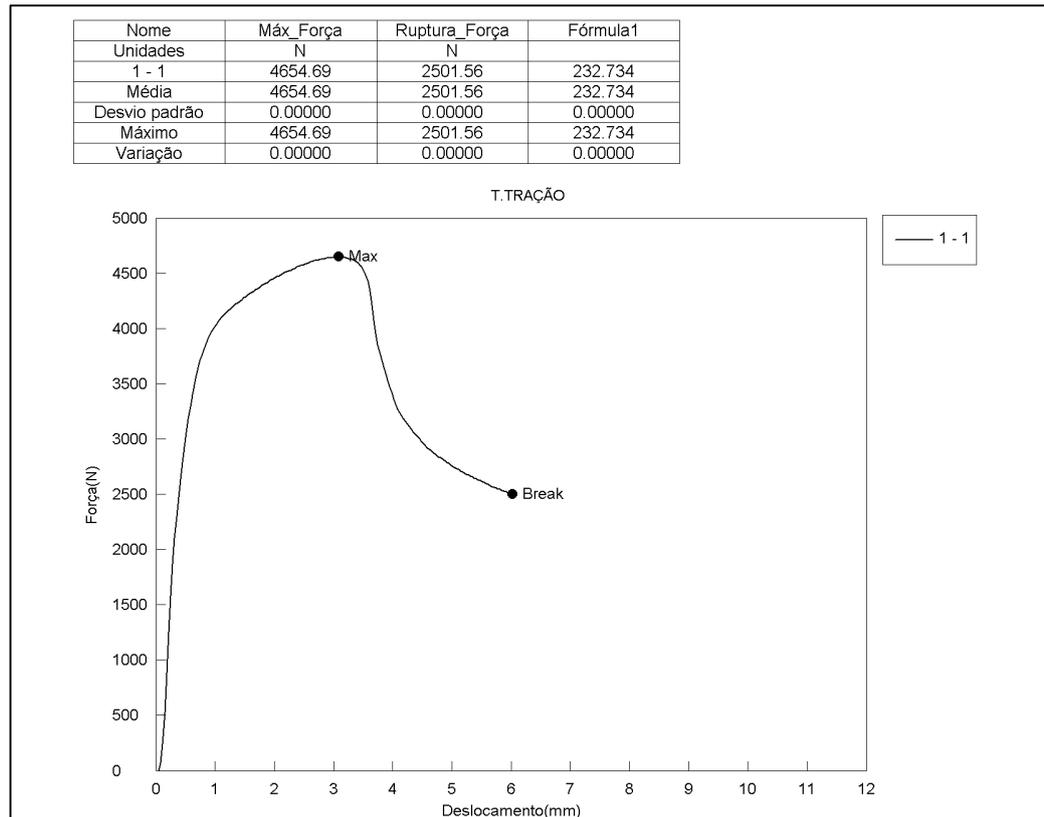
Gráfico 3. Tensão x Deformação da amostra 02 otimizada utilizando o Software Trapezium 2



Fonte: Autoria Própria,(2023)

- A máxima força (TS) encontrada e suportada da amostra 01 (OTIMIZADA) foi de **4667,19 N**
- Após TS, a amostra rompeu-se totalmente à 2506,25N
- Resultado altamente satisfatório comparado ao modelo corrente.

Gráfico 4. Tensão x Deformação da amostra 03 otimizada utilizando o Software Trapezium 2



Fonte: Próprio autor,(2023)

- A máxima força (TS) encontrada e suportada da amostra 01 (OTIMIZADA) foi de **4654,69 N**
- Após TS, a amostra rompeu-se totalmente à 2501,56N
- Resultado altamente satisfatório comparado ao modelo corrente.

Após a rodada 3, e analisando os resultados dos parâmetros proposto, chegamos as seguintes conclusões:

- Experimentos de 1~10 obteve média de 4664N, um ganho de 345N a mais em relação ao parâmetro atual.
- Gráficos 4,5 e 6 Tensão x Deformação obteve uma estabilização e um padrão no comportamento do teste. Não houve variações significativas.
- Conclui-se que aumentando a corrente em 0,5 kA a mais e alterando tempo e força obteve um resultado satisfatório nos resultados de tração. A corrente é um fator determinando nos resultados.

5.5 VALIDAÇÃO DO RESULTADO: MACROGRAFIA

Com o objetivo de proporcionar maior eficácia e segurança dos resultados já encontrados, foi realizado também o teste de macrografia para identificar a penetração de solda e avaliar a magnitude da fusão do material, ou seja, qual a quantidade de solda que entrou em cada chapa.

O teste segue as seguintes etapas:

- 1- Identificar área de corte
- 2- Corte
- 3- Embutimento do corpo de prova
- 4- Lixamento da peça
- 5- Ataque químico com Nital 10%
- 6- Análise Macroscópica,
- 7- Julgamento

1. Identificar área de corte: A primeira etapa do teste é identificar o ponto de solda que será analisado.

Figura 8. Área de corte do Corpo de Prova



Fonte: Autor, (2022).

2. Corte: O corte é realizado numa cortadora metalográfica modelo COR120, empresa AROTEC.

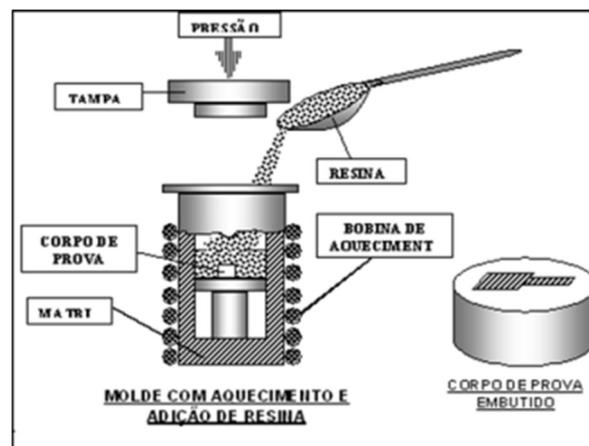
Figura 9. Cortadora



Fonte: Autor, (2022).

3. **Embutimento do Corpo de Prova:** A amostra é depositada dentro de uma embutidora para melhor visualização da peça e manuseio no momento do lixamento.

Figura 10. Embutimento



Fonte: Metalografia, edisciplinas.USP, (2018).

4. **Lixamento da peça:** A peça é lixada em uma lixadeira modelo Aropol VV-PU

Figura 11. Lixadeira AROTEC

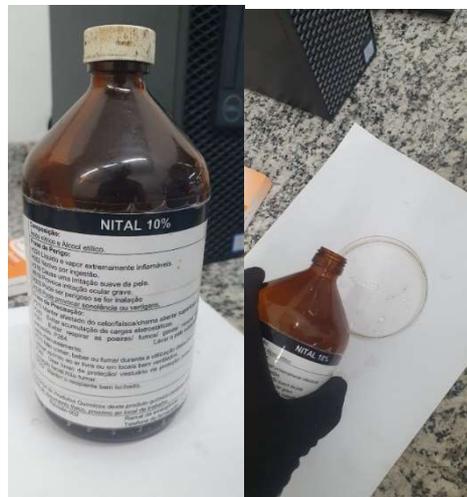


Fonte: Autor, (2022).

Para este tipo de análise Macrográfica é necessário realizar o lixamento em dois grãos de lixa: 120 e 220. Ao final a peça deve ficar com uma superfície plana e sem rebarbas.

5. **Ataque químico com Nital 10%:** Após o lixamento é necessário um ataque químico para que a solda se revele e mostre sua penetração.

Figura 12. Solução de Nital



Fonte: Autor, (2022).

6. **Análise Macroscópica:** A penúltima etapa é onde teremos uma visão aguçada da penetração de solda, podemos verificar os detalhes e o contorno de penetração entres as partes soldadas.

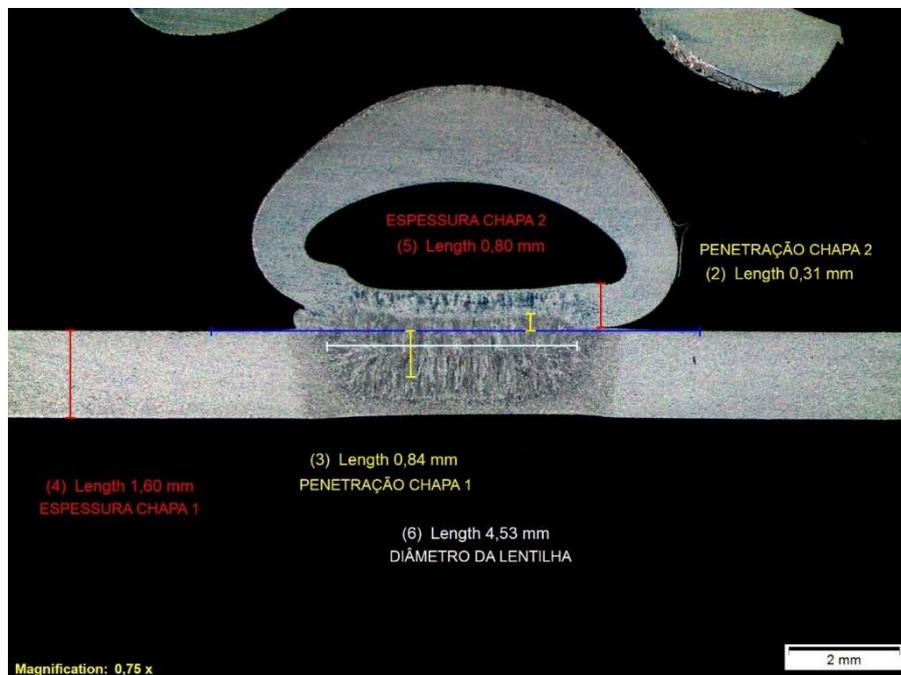
Figura 13. Análise do corpo de prova Macroscópica



Fonte: Autor, (2022).

7. **Julgamento:** Conforme o resultado apresentou fusão em ambas as chapas soldadas.

Figura 14. Análise Macro do corpo de prova atual

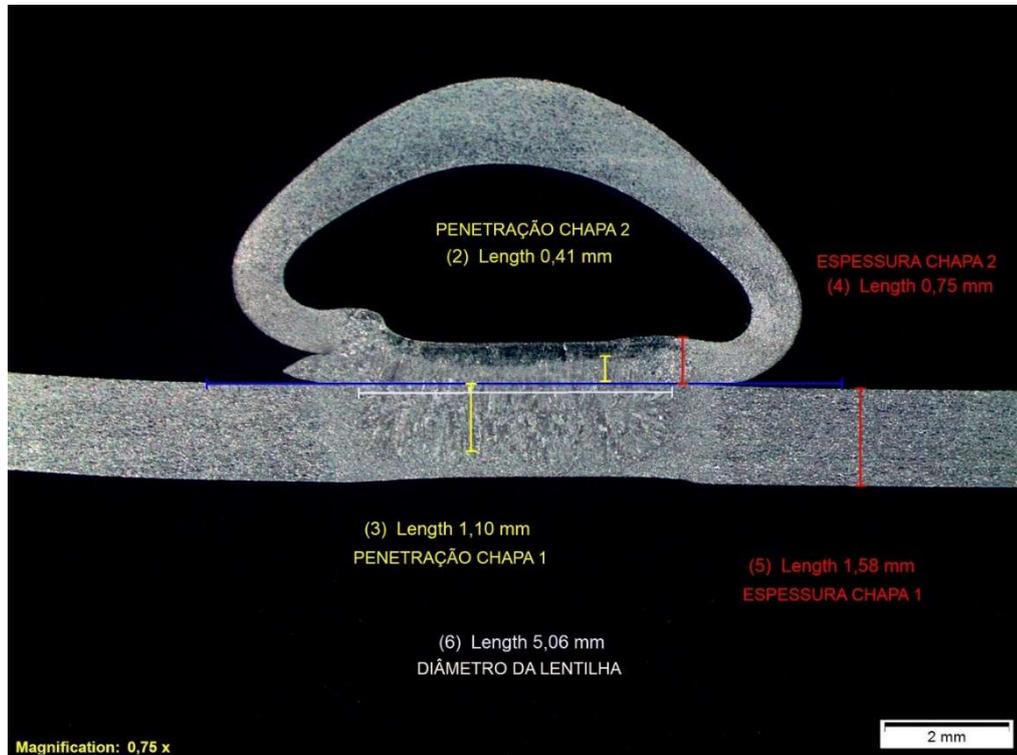


Fonte: Autor, (2022).

- Após o ataque químico é perceptível a área de fusão das chapas 1 e 2.

- Ambas as chapas tiveram uma ótima fusão.

Figura 15. Análise Macro do corpo de prova otimizado



Fonte: Autor, (2022).

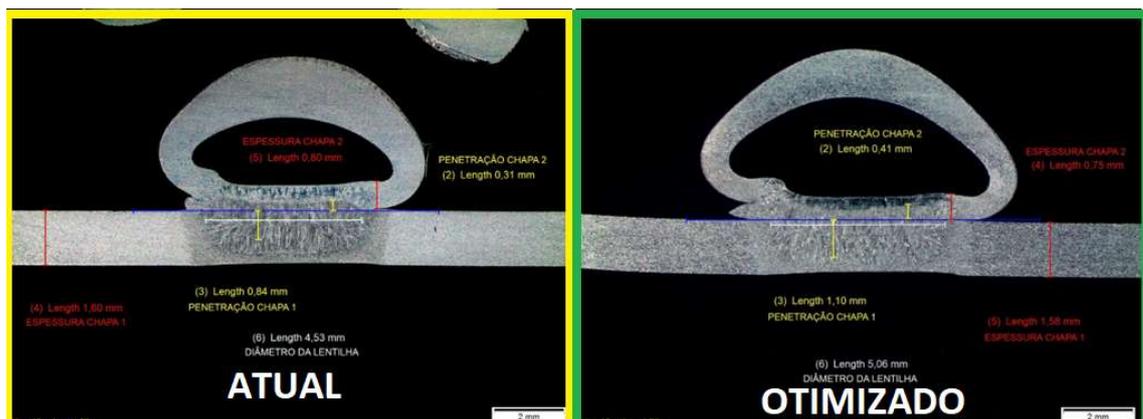
- Após o ataque químico é perceptível a área de fusão das chapas 1 e 2.
- Ambas as chapas tiveram uma ótima fusão e comparado ao modelo corrente tivemos um ganho significativo de penetração em ambas as chapas.

Tabela 7. Amostra Atual x Otimizada

Atual/Otimizada	Chapa 1 0,80 mm	Chapa 2 1,64 mm
Atual	Fusão = 0,31	Fusão = 0,84
	0,31/0,80 *100	0,84/1,60*100
Resultado	38,75%	52,50%
Otimizada	Fusão = 0,41	Fusão = 1,38
	0,41/0,80*100	1,10/1,60*100
Resultado	51,25%	68,75%
Relação Ponto Ótimo	12,5% +	16,25% +

Fonte: Autor, (2022).

Figura 16. Amostra Atual x Otimizado



Fonte: Autor, (2022).

Obs: Penetração Mínimo 10% (EMPRESA)

- A tabela 7 descreve que tanto o parâmetro atual e o otimizado atende as especificações de no mínimo 10% de penetração.
- A amostra otimizada tem um ganho de 12,5% na chapa 1 em relação ao valor corrente.
- A amostra otimizada também tem um ganho de 16,25% (chapa 2) a mais em relação a chapa 2 do modelo corrente.
- Podemos concluir que o valor otimizado tem uma fusão significativamente melhor do que os valores do parâmetro corrente

7. CONCLUSÃO

Através do planejamento fatorial, foi possível realizar de forma ordenada as análises das variáveis que influenciam o processo, os efeitos e resposta do planejamento fatorial se mostraram não lineares. A partir disso, se empregou o método estatístico através de 3 rodadas com várias amostras e foi observado a partir das médias e ensaio de tração de que o fenômeno depende exclusivamente da corrente elétrica de modo não linear. A corrente possui uma significância a mais em relação a tempo e a força de solda. A variação de apenas 1 kA (Quilo- Ampere) é o suficiente para alterar significativamente os resultados do processo. A otimização do processo foi possível verificar que aplicando uma corrente de 7,5 kA, tempo de solda de 14 milissegundos e força do eletrodo de 189 kgf, foi possível chegar a 4667,19N de resistência de solda à ponto, um ganho de 345N em relação a resistência atual.

O ensaio de metalografia foi observado resultados qualitativos no ponto otimizado quanto a fusão entre as chapas, de modo que comparado ao parâmetro atual, possui um ganho a mais de fusão de 12,5% na chapa 1 e 16,25% na chapa 2, o que é ótimo para garantir a eficácia das peças soldadas.

Para trabalhos futuros, fica aberto estudos relacionados as demais variáveis como o fator mão de obra, parada de linha, tempo de refrigeração da solda, tipos de materiais utilizados para soldagem etc.

De modo geral, o trabalho em questão alcança benefícios para a vida profissional, além de aprender ainda mais sobre o assunto de soldagem por pontos. O trabalho mescla um conjunto de matérias que ao longo do curso de engenharia mecânica é realizado para que o aluno tenha que lidar com essas melhorias e análise de causa. Podemos citar a matéria ciência e engenharia dos materiais, que visa estudar as propriedades da matéria e seu comportamento, que foi exatamente o que vimos através dos ensaios de tração e metalográfico. Utilizamos em grande parte deste trabalho os recursos da matéria Probabilidade e estatística que foi fundamental para lidar com os parâmetros e os resultados de uma forma mais estruturada as quantidades de dados obtidos através dos testes propostos, além de disciplinas como

Processos de Fabricação e Tecnologia de soldagem, Metalografia e tratamentos térmicos etc.

A engenharia sempre busca constantemente “engenhara”, ou seja, inventar, criar soluções para facilitar a vida do ser humano. Estamos o tempo todo em constante mudança e devemos acompanhar tal mudança e estar atentos para as novas tecnologia e recursos para as futuras gerações.

Por tudo isso, o presente trabalho cumpre com seu papel, através do curso de engenharia mecânica em despertar o instinto de melhoria contínua, solucionar os problemas existentes no processo fabril da empresa e aguçar a visão crítica sobre o aspecto de sempre melhorar cada vez mais.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRACARENSE, A. Q. **Processo de soldagem por resistência**. Curso de Soldagem. Universidade Federal de Minas Gerais, 2000.

CHRISTOFOLETTI, G. M. **Soldagem por pontos: Avaliação dos parâmetros de soldagem e das propriedades mecânicas da junta soldada**. 2013. Trabalho de conclusão de curso (Graduação) Centro Federal de Educação Tecnológica, Engenharia de Materiais, Minas Gerais, 2013.

NETO, B. B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Planejamento e otimização de experimentos**. Ed. da UNICAMP, 1996.

CALLISTER, Jr., W.D. **Materials Science and Engineering**. 7^o ed. New York: John Wiley & Sons, Inc, 2007.

DALCIN, G.B. **“Ensaios dos materiais”**. URI, Santo Ângelo, 2007. Disponível em: <http://www.urisan.tche.br/~lemm/arquivos/ensaios_mecânicos.pdf>. Acesso em 27 de junho de 2022.

PENTEADO, K. M. **“Otimização da Solda de Pontos por resistência elétrica na Liga de Alumínio 5052-H32 através do Projeto e Análise de Experimentos (DOE).”** Disponível em: <https://repositorio.unifei.edu.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/1260/dissertacao_0038709.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

NASCIMENTO, Vinicius Castanheira do et al. **Seleção de parâmetros de soldagem a ponto por resistência**, baseado na medição da resistência elétrica entre chapas. 2008.

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.

VARGAS, JOSÉ ENRIQUE. **Estudo da Formação, Geometria e Resistência do Ponto na Soldagem por Resistências: Uma Abordagem Estatística**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2006. 143p.

STOCCO, D. **Caracterização de solda por resistência a ponto através de avaliações não destrutivas**. Ed. Politécnica Universidade São Paulo, Engenharia Mecânica, São Paulo, 2010.

KEARNS, W. H. **Welding Handbook: Resistance and Solid-State Welding and Other Joining Processes**. Miami: American Welding Society, 1984.