



Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA
Engenharia Automotiva

Estudo de Parâmetros Para Melhoria da Qualidade e Resistência da Solda de Prisoneiros Utilizados para Fixação de Componentes Automotivos.

Autor: Larissa Martins de Freitas
Orientador: Henrique Gomes de Moura

Brasília, DF
2022



Larissa Martins De Freitas

Estudo de Parâmetros Para Melhoria da Qualidade e Resistência da Solda de Prisioneiros Utilizados na Fixação de Componentes Automotivos.

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Automotiva da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Automotiva.

Universidade de Brasília - UnB

Faculdade UnB Gama - FGA

Orientador: Doutor Henrique Gomes de Moura

**Brasília, DF
2023**

Freitas, Larissa Martins.

Estudo de parâmetros para aumento da qualidade e resistência da soldagem de prisioneiros utilizados para fixação de componentes automotivos/ Larissa Martins de Freitas. Brasília: UnB, 2023. 40 p. : il. ; 29,5 cm.

Monografia (Graduação) – Universidade de Brasília
Faculdade do Gama, Brasília, 2023. Orientação: Henrique
Gomes de Moura.

1. Prisioneiros. 2. Solda. 3. Otimização I. Moura, Henrique
Gomes. II. Doutor.

CDU Classificação

Larissa Martins De Freitas

Estudo de Parâmetros Para Melhoria da Qualidade e Resistência da Solda de Prisioneiros Utilizados na Fixação de Componentes Automotivos.

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Automotiva da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Automotiva.

Trabalho aprovado, Brasília, DF, 14 de fevereiro de 2023:

Prof. Dr. Henrique Gomes de Moura
Orientador

Prof. Dr. Fábio Cordeiro de Lisboa
Convidado 1

Prof. Me. Mario de Oliveira Andrade
Convidado 2

Brasília, DF
2023

Esse trabalho é dedicado a Deus, meus pais, e a todas as pessoas que contribuíram de alguma forma para a realização deste sonho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela vida e oportunidade de estudar, aos meus pais por todo apoio e suporte que me promoveram até aqui. Também agradeço imensamente a todos os amigos que trilharam esse mesmo caminho e contribuíram de alguma forma para a minha formação, seja compartilhando conhecimento ou com acolhimento nas horas de angústia. Agradeço também em especial ao meu orientador e a todos os professores que fizeram parte da minha graduação e ensinaram os conceitos e os caminhos que são necessários para a minha vida profissional.

RESUMO

A soldagem é um processo bastante utilizado na indústria automotiva, visto que este permite a união de vários tipos de ligas metálicas em um curto tempo de trabalho. Sendo assim é necessário entender quais os fatores que podem influenciar na qualidade da solda utilizada no processo de fabricação do veículo. Atualmente a soldagem de pinos com rosca tem importante relevância, pois estes são utilizados na fixação de componentes internos e externos nas carrocerias monobloco. Nesse estudo foram avaliados os parâmetros de corrente, tempo, *lift*, *stick-out* e penetração, os quais podem influenciar na soldagem dos prisioneiros do tipo M6x14. Esses foram soldados em chapa automotiva, sem zinco e com 0,7 mm de espessura. A finalidade do estudo foi encontrar a combinação entre os fatores e níveis que configure melhores características mecânicas para a junção entre a chapa e o pino presentes no processo avaliado. O estudo foi realizado com base na metodologia DOE (*Design of Experiments*) e os conceitos de Plackett Burman, presentes no software Minitab, para definir a combinação entre os fatores e os níveis de cada experimento. A partir da definição dos experimentos, foram realizadas as soldagens dos corpos de prova e em seguida os ensaios de tração de cada um deles. As respostas obtidas para o experimento foram de força máxima [N] e penetração de saída [mm]. Com isso, os resultados obtidos foram imputados no programa Minitab, e assim realizou-se as análises de relevância e correlação para os cinco parâmetros estudados. Também foi realizada a otimização dos parâmetros de solda pelo mesmo programa. Para isso definiu-se como alvo a maximização da força e penetração de saída com 0,9 mm. Desse modo, foram obtidas três respostas de combinações dos parâmetros. Essas respostas foram testadas pelo ensaio de tração e os resultados obtidos foram condizentes com o alvo estabelecido para a otimização dos parâmetros estudados. Sendo assim, a melhoria na qualidade e resistência na solda dos pinos, utilizados na montadora de veículos onde se fez os testes, foram alcançados.

Palavras chaves: Prisioneiros. Solda. Otimização. Parâmetros. DOE.

ABSTRACT

Welding is a process widely used in the automotive industry, as it allows the union of various types of metal alloys in a short working time. Therefore, it is necessary to understand which factors can influence the quality of the weld used in the vehicle manufacturing process. Currently, the welding of threaded pins has an important relevance, as these are used in the fixation of internal and external components in monobloc bodies. In this study, the current, time, lift, stick-out and penetration parameters were evaluated, which can influence the welding of M6x14 studs. These were welded on automotive sheet, without zinc and 0.7 mm thick. The purpose of the study was to find the combination between the factors and levels that configure the best mechanical characteristics for the joint between the plate and the pin present in the evaluated process. The study was carried out based on the DOE (Design of Experiments) methodology and the concepts of Plackett Burman, present in the Minitab software, to define the combination between the factors and the levels of each experiment. From the definition of the experiments, the welding of the specimens was carried out and then the tensile tests of each one of them. The responses obtained for the experiment were maximum force [N] and output penetration [mm]. With this, the results obtained were imputed in the Minitab program, and thus the relevance and correlation analyzes were carried out for the five studied parameters. The optimization of the welding parameters was also carried out using the same program. For this, the maximization of force and output penetration of 0.9 mm was defined as a target. Thus, three responses of combinations of parameters were obtained. These responses were tested by the tensile test and the results obtained were consistent with the target established for the optimization of the studied parameters. Therefore, the improvement in the quality and strength of the soldering of the pins, used in the vehicle assembly plant where the tests were carried out, were achieved.

Keywords: *Prisoners. solder. Optimization. parameters. DOE*

LISTA DE SIGLAS

SW - Stud Welding

SWS - Stud Welding Systems

PSP - Pino Sobre Peça

ZTA - Zona Termicamente Afetada

DOE - Design of experiments

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1: Sistema para soldagem a arco com eletrodo de carvão conforme a patente de Bernados. | 17 |
| Figura 2: Projeto Ted Nelson - Pistola para soldagem de pinos..... | 18 |
| Figura 3: Sequência de soldagem de pinos em um processo Stud Welding (SW). Da esquerda para a direita o processo ocorre desde o contato do pino com a peça até a deposição completa do material. | 19 |
| Figura 4: Esquema de instalação do equipamento para soldagem semiautomática. | 21 |
| Figura 5: Comparativo entre Lift e Corrente de solda..... | 23 |
| Figura 6: Stick-out | 24 |
| Figura 7: Regulagem do parâmetro Stick-out..... | 24 |
| Figura 8: Processo de penetração | 25 |
| Figura 9: Profundidade de penetração d (mm)..... | 25 |
| Figura 10: Característica de soldagem SW satisfatórias e não satisfatórias..... | 26 |
| Figura 11: Ensaio de tração | 29 |
| Figura 12: Fluxograma representativo para a atividade de soldagem manual dos prisioneiros na indústria automotiva estudada. | 30 |
| Figura 13: Diagrama de Ishikawa (causa e efeito) | 31 |
| Figura 14: Matriz de causa e efeito para avaliação do processo de soldagem SW estudado..... | 32 |
| Figura 15: Diagrama de fluxo de composição para execução do estudo | 33 |
| Figura 16: Modelo do Pino estudado M6x14 | 34 |
| Figura 17: Controlador de solda | 35 |
| Figura 18: Alimentador de pernos | 36 |
| Figura 19: Pistola de aplicação de prisioneiros manual | 36 |
| Figura 20: Mapa ilustrativo para obtenção e análise de dados. | 39 |
| Figura 21: Gráfico Pareto referente a quantidade de defeitos dos prisioneiros por categorias. Dados coletados de outubro a dezembro de 2021. | 40 |
| Figura 22: Teste de tração dos corpos de provas. | 41 |
| Figura 23: Condição da solda, 1- Solda com defeito (rompido), 2- Solda com boa qualidade..... | 42 |

| | |
|---|----|
| Figura 24: Resultados experimentais para força máxima resistida a tração e penetração de solda..... | 43 |
| Figura 25: Resultados visuais dos testes de tração para cada combinação de parâmetros. | 44 |
| Figura 26: Gráfico dos Efeitos padronizados para Força [N]..... | 45 |
| Figura 27: Gráfico dos Efeitos padronizados para Penetração de saída [mm]..... | 46 |
| Figura 28: Gráfico dos efeitos principais para Penetração Força Máxima [N]..... | 46 |
| Figura 29: Gráfico de efeitos principais para Penetração de saída [mm]. | 47 |
| Figura 30: Gráfico de interação para Força máxima [N]..... | 47 |
| Figura 31: Gráfico de interação para Penetração de saída [mm]. | 48 |
| Figura 32: Superfície de resposta para Força máxima [N]. | 49 |
| Figura 33: Superfície de resposta para Penetração de saída [mm]. | 49 |
| Figura 34: Otimização dos parâmetros de solda, com alvo estabelecido para maximização da força e penetração igual a 0,9mm. | 50 |
| Figura 35: Apresentação das soluções com as configurações ótimas para a solda estudada, propostas a partir da otimização dos parâmetros pelo programa Minitab. | 51 |
| Figura 36: Corpos de prova utilizados para o experimento de validação. | 52 |
| Figura 37: Resultados experimentais para força máxima resistida a tração e penetração de solda, para as respostas de otimização dos parâmetros de solda. ... | 53 |
| Figura 38: Resultados visuais dos corpos de prova, utilizados nos testes de tração para as três soluções obtidas a partir da otimização dos parâmetros de solda. | 54 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1: Planejamento fracionário saturado de Plackett e Burman para o estudo de 11 variáveis com 12 ensaios. | 28 |
| Tabela 2: Fatores e níveis definidos para o experimento. | 38 |
| Tabela 3: Definição das combinações para os experimentos | 38 |
| Tabela 4: Parâmetros utilizados para soldagem dos corpos de prova do experimento de validação. | 52 |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 14 |
| 1.1 | JUSTIFICATIVA | 15 |
| 1.2 | OBJETIVOS | 16 |
| 1.2.1 | Objetivo geral..... | 16 |
| 1.2.2 | Objetivos específicos..... | 16 |
| 2 | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 17 |
| 2.1 | HISTÓRICO DA SOLDAGEM | 17 |
| 2.2 | SOLDAGEM DE PINOS POR ARCO ELÉTRICO | 19 |
| 2.3 | EQUIPAMENTOS | 20 |
| 2.4 | PARÂMETROS DE SOLDA | 22 |
| 2.4.1 | Corrente de solda | 22 |
| 2.4.2 | Tempo de solda..... | 22 |
| 2.4.3 | Lift..... | 23 |
| 2.4.4 | Stick-out..... | 23 |
| 2.4.5 | Penetração | 24 |
| 2.5 | QUALIDADE VISUAL DA SOLDAGEM DE PRISIONEIROS..... | 26 |
| 2.6 | PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS | 26 |
| 2.6.1 | Planejamento Fatorial Fracionado de Plackett e Burman..... | 27 |
| 2.7 | TESTE DE TRAÇÃO..... | 28 |
| 2.8 | DEFINIÇÃO DO PROCESSO DE SOLDAGEM MANUAL DE PRISIONEIROS 29 | |
| 2.9 | ANÁLISE DE CAUSAS E EFEITOS..... | 30 |
| 3 | METODOLOGIA..... | 33 |
| 3.1 | MATERIAIS E MÉTODOS | 33 |
| 3.1.1 | Características do prisioneiro | 34 |
| 3.1.2 | Equipamento de soldagem | 34 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 3.1.1.1 | Controlador de solda | 35 |
| 3.1.1.2 | Alimentador de pernos | 35 |
| 3.1.1.3 | Pistola de Aplicação de Prisioneiros Manual..... | 36 |
| 3.1.2 | Definição dos fatores e níveis..... | 37 |
| 3.1.3 | Definição das combinações para os testes de solda | 38 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUÇÕES | 40 |
| 4.1 | RESULTADOS DO EXPERIMENTO FATORIAL | 42 |
| 4.2 | ANÁLISE DE RESULTADO EXPERIMENTO FATORIAL..... | 44 |
| 4.2.1 | Análise dos efeitos..... | 45 |
| 4.2.2 | Otimização dos parâmetros | 49 |
| 4.3 | EXPERIMENTO DE VALIDAÇÃO DAS RESPOSTAS DE OTIMIZAÇÃO ... | 51 |
| 4.4 | RESULTADOS DO EXPERIMENTO DE VALIDAÇÃO | 52 |
| 5 | CONSIDERAÇÕES FINAIS..... | 54 |
| 5.1 | CONCLUSÃO | 54 |
| 5.2 | TRABALHOS FUTUROS | 56 |
| | REFERÊNCIAS..... | 57 |

1 INTRODUÇÃO

O processo de soldagem atualmente é o mais utilizado para unir peças metálicas. Esse permite a montagem em menor tempo, de forma mais segura, com economia de material e menor trabalho. Na atualidade, existem mais de 50 formas diferentes de processos para soldagem, os quais são utilizados no meio industrial. Sendo este um processo versátil pois possibilita a união entre vários tipos de ligas metálicas e com diferentes espessuras. Através dos processos de soldagem, é possível unir peças com espessuras que vão desde 1 mm até estruturas com grandes proporções (VILLANI, 2021).

As carrocerias do tipo monobloco possuem acoplados a sua estrutura mais de 100 prisioneiros, utilizados para a montagem das peças que compõem o veículo, como: peças plásticas, presilhas para fixação de chicotes elétricos, tubulação de combustível, tubulação de freio, fixação de mantas térmicas e acústicas, módulos de comandos, aterramento elétrico, entre outros.

Os prisioneiros soldados nas estruturas monobloco são elementos com formato de parafusos, os quais são unidos à um material base pela soldagem por arco elétrico. Esse tipo de solda faz a junção do prisioneiro à estrutura sem a utilização de materiais adicionais (HARIDAS; ASARI, 2020). Dessa forma o prisioneiro fica fixo a estrutura da carroceria monobloco, para receber a montagem das peças citadas anteriormente.

A soldagem de prisioneiros é um processo importante na indústria automotiva. O estudo refere-se à análise dos principais fatores que podem influenciar na soldagem de prisioneiros em chapas de aço de baixo carbono. O propósito dessa soldagem é a união dos pinos em chapas metálicas as quais compõem a estrutura do veículo, esses são utilizados para a fixação de componentes e aterramento de sistemas elétricos nas carrocerias.

Segundo Chambers (2001), o método de soldagem de pinos foi precedente da segunda guerra mundial, através da necessidade de se fixar tábuas de madeira em porta-aviões navais. A técnica permite que os pinos (prisioneiros) sejam fixados à chapa utilizando um soldador, sem que haja a necessidade de fazer furos na placa de aço, o qual leva mais tempo além de ser trabalhoso.

A utilização de prisioneiros aumentou de forma significativa na indústria de automóveis, eletrodomésticos e construção. Esse método de soldagem, por arco elétrico, foi uma grande evolução para o processo de produção nas indústrias, devido

aos seus benefícios, como: menor tempo de solda, maior capacidade de produção, processo de soldagem mais simples e eficiente, soldagem em diversas posições, com maior segurança e com menor gasto de materiais (I. SAMARDŽIĆ et al, 2009).

À medida que a utilização de prisioneiros aumenta, surge também a necessidade de otimizar este processo, a fim de, evitar as perdas de produtos por falha na soldagem e paradas de linha por falta do pino, ocasionada pelo rompimento da solda. Isso impacta de forma significativa na montagem das peças que compõem o produto final, gerando retrabalhos e aumento dos custos de produção. Dessa forma é importante garantir que a solda do pino seja de qualidade para evitar os transtornos na produção.

A qualidade da solda é influenciada por diversos fatores como: tempo de solda, corrente, ângulo de posicionamento da pistola na soldagem manual, entre outros fatores, os quais ampliam a variabilidade do processo (AWS, 2015). Desse modo podem ser produzidas soldas com baixa resistência mecânica, ou seja, com a qualidade ruim a qual se rompe durante o processo de montagem.

1.1 JUSTIFICATIVA

Em um estudo de caso, realizado em uma montadora de veículos, foi visto que, diariamente, são produzidos, em média, 150 monoblocos e que em cada monobloco são soldados mais de 100 prisioneiros. Além disso, foi identificado que a principal falha relacionada à soldagem de prisioneiros ocorre devido ao seu rompimento da chapa.

Os defeitos gerados pela falha na soldagem dos prisioneiros geram transtornos na linha de montagem final dos veículos. Na tentativa de montagem de um componente, a qual é feita a aplicação de torque, o prisioneiro solta da carroceria. Desse modo, o carro sai da linha de montagem sem a peça e segue para a área de reparo, onde é soldado outro prisioneiro no lugar, para que seja possível realizar a montagem da peça necessária. Esses retrabalhos geram atraso no tempo de liberação do veículo e aumentam os custos de produção.

Dessa forma, estudos com o objetivo de minimizar as falhas de soldagem, principalmente, as relacionadas com rompimento do prisioneiro são relevantes para otimizar o processo de soldagem, para evitar a perda de produtos e para minimizar a interrupção da linha de produção ocasionado por esses erros. Essas melhorias podem resultar no crescimento da empresa.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo principal, encontrar a melhor combinação de parâmetros de solda para os prisioneiros do tipo M6x14 e a chapa base a qual ele é fixado no processo e assim minimizar o rompimento da união soldada na montagem final do veículo.

1.2.2 Objetivos específicos

Para que o objetivo geral possa ser alcançado, o trabalho foi dividido em objetivos específicos:

1. Entender melhor sobre a influência dos fatores na soldagem por arco elétrico dos prisioneiros e a correlação entre eles.
2. Obter resultados de força máxima resistida de cada união soldada por arco elétrico, com a combinação de parâmetros de solda determinado pelo método estatístico de design de experimentos de Plackett Burman.
3. Otimizar o processo de soldagem dos prisioneiros a partir das respostas de força e penetração de saída, com o auxílio do software Minitab.
4. Comprovar os resultados da otimização dos parâmetros de solda obtidos pelo software Minitab, a partir de um novo experimento de tração e resultados de penetração.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 HISTÓRICO DA SOLDAGEM

O processo de soldagem é utilizado cerca de 3000 a.C., para a soldagem de espadas aplicando pressão sobre o ferro depois de aquecido. Esse tipo de processo, anteriormente utilizado, é denominado “soldagem em estado sólido”, soldando através de marteladas sobre as peças a serem unidas (RIYADH, 2021).

Em 1885 surgiu na Inglaterra, através de Nikolas Bernados e Stanislav a primeira patente de um processo de soldagem, utilizando como base um arco elétrico, que ocorreu entre um eletrodo de carvão e a peça base a ser soldada (VILLANI, 2021). A Figura 1 ilustra o sistema para soldagem a arco com eletrodo de carvão conforme a patente de Bernados.

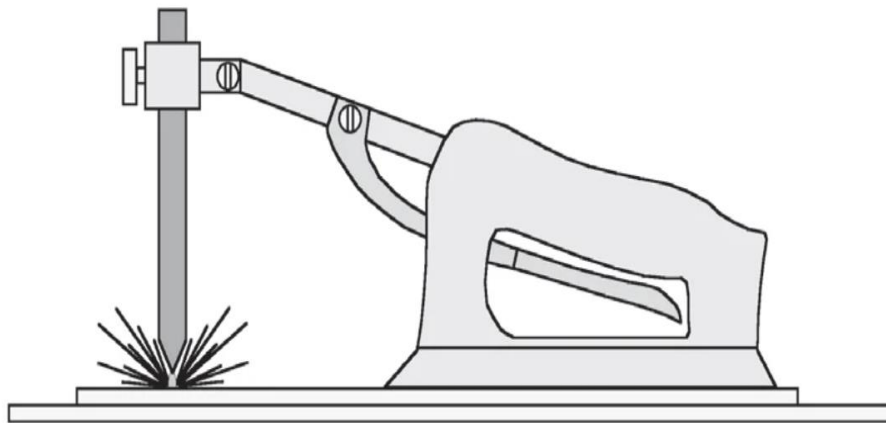


Figura 1: Sistema para soldagem a arco com eletrodo de carvão conforme a patente de Bernados.

Fonte: Villani (2021).

Nesta fase, a soldagem não passou a ser o processo principal, sendo utilizada na maioria das vezes para a realização de reparos de emergência. A maior utilização deste processo de fabricação veio com o surgimento da Primeira Guerra Mundial (VILLANI, 2021).

A soldagem de pinos por arco elétrico teve seu início pouco antes da Segunda Guerra Mundial, pela necessidade de prender tabuas de madeira em porta-aviões navais. O processo de prender os pinos roscados com solda na parte externa da placa

era de maior facilidade do que fazer furos, pois era um processo lento e trabalhoso (CHAMBERS, 2001).

A primeira patente de uma máquina para soldagem de pinos surgiu em 1944 com a invenção de Ted Nelson. Segundo Nelson (1944), o objetivo da invenção era realizar soldagem de pinos com controle automático das diversas variáveis que influenciam na qualidade da união entre o pino e a chapa como a distância da elevação do pino em relação a chapa, o tempo de aquecimento, o controle do arco e o instante da união física entre eles. Todo esse controle tem como resultado a aceleração do número de soldas, com qualidade, que o operador consegue realizar em determinado tempo.

Outro objetivo da invenção é o fornecimento de uma máquina leve e formato compacto para facilitar o manuseio na hora do processo de soldagem. A invenção permite a realização da solda dos pinos em diversas posições que a peça ou estrutura se encontre, o que facilitou a realização do processo de soldagem (NELSON, 1944). A Figura 2 ilustra uma pistola para soldagem de pinos proposta por Ted Nelson.

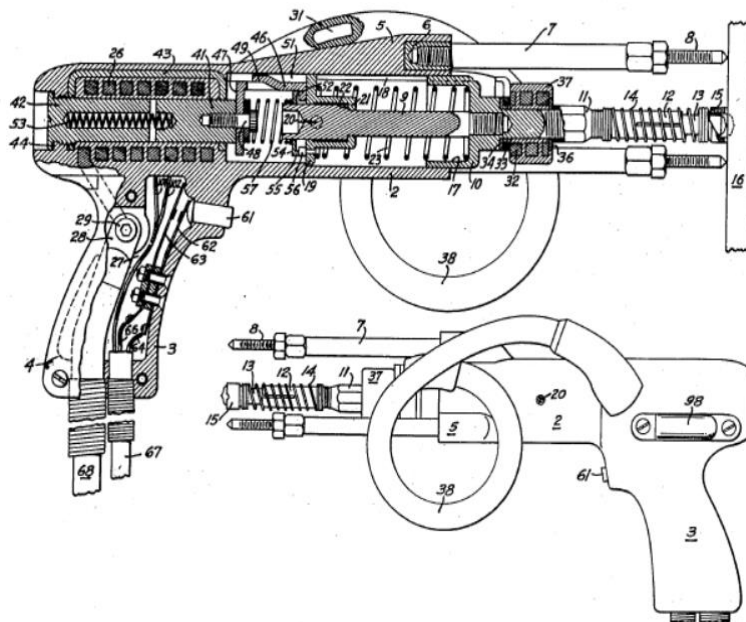


Figura 2: Projeto Ted Nelson - Pistola para soldagem de pinos

Fonte: Nelson (1944).

2.2 SOLDAGEM DE PINOS POR ARCO ELÉTRICO

A soldagem de pinos é internacionalmente conhecida por *stud welding* (SW). Essa técnica de soldagem por arco elétrico é responsável pela união de pinos a um material base. A solda acontece através da abertura do arco elétrico, o qual funde da base do pino e o material de base, em seguida são unidos por uma leve pressão. O processo de soldagem de pinos a arco elétrico, contém os mesmos fundamentos elétricos, mecânicos e metalúrgicos dos demais processos de soldagem a arco (CHAMBERS, 2001).

O processo de SW pode ser descrito em 4 etapas. Essas etapas descrevem as principais fases do processo de soldagem, o qual é apresentado em seguida. A Figura 3 ilustra o processo de soldagem de pinos.

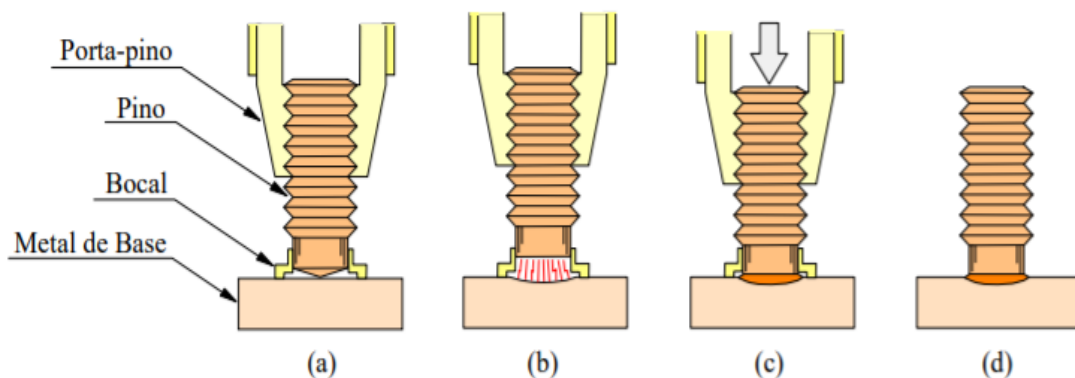


Figura 3: Sequência de soldagem de pinos em um processo Stud Welding (SW). Da esquerda para a direita o processo ocorre desde o contato do pino com a peça até a deposição completa do material.

Fonte: Modenesi e Marques (2000).

Sequência de soldagem de acordo com Chambers (2001):

- a) Na primeira etapa tem-se o posicionamento da pistola de solda e o pressionamento do pino contra a chapa base.
- b) Na segunda etapa, acontece a elevação do pino criando uma distância entre o pino e a chapa base. Após isso, o botão de disparo é pressionado para ligar a solenóide, a qual dispara a corrente de solda formando o arco elétrico na base do eletrodo com a chapa.

- c) Nessa etapa o tempo de arco elétrico é finalizado e o pino é inserido na poça de fusão sob leve pressão.
- d) Na etapa final do processo, há a retirada da pistola do local de soldagem e temos o pino fixado à peça.

De acordo com EMHART (2010), o processo de soldagem SW possui vantagens e desvantagens, conforme listado abaixo.

O modelo citado apresenta as seguintes vantagens:

- Não há necessidade de utilizar eletrodos;
- Não é necessário fazer furos no material base;
- É possível soldar em chapas de até 0.6 mm;
- O uso de gás é opcional;
- O ciclo de solda é realizado em ms;
- Possui uma estreita Zona Termicamente Afetada (ZTA);
- Sistema de fácil automação industrial;
- Segurança e tecnologia de montagem eficiente.

Em relação as desvantagens, o modelo citado apresenta os seguintes pontos negativos:

- A maior parte da fusão acontece na base do pino;
- A área da seção da base de solda deve ser maior que a base do pino;
- A superfície de soldagem precisa ser limpa sem qualquer impureza que dificulte a soldagem.

2.3 EQUIPAMENTOS

Para a soldagem dos pinos tem-se os equipamentos utilizados os quais são de extrema importância para a realização das soldas de forma simples e rápida para o processo. Esse equipamento é composto por uma pistola de aplicação, uma unidade de controle, a fonte de energia e o sistema automático de alimentação dos pernos.

A pistola tem por função segurar e movimentar o pino. Ela possui um gatilho que é responsável por liberar a corrente no momento da soldagem, essa é transmitida para a ponta do pino através do contato entre o pino e a garra a qual segura o pino. Essa garra pode ter diferentes geometrias e espessura as quais são compatíveis com cada pino a ser encaixado. A pistola de soldagem também tem o papel de exercer

pressão e alívio ao sistema, a qual é controlada por uma válvula solenóide (JUNIOR; TREMONTI, 2015).

A Unidade de controle é composta por circuitos temporizadores os quais são responsáveis pela aplicação do tempo de soldagem e o tempo de pressão. Esse circuito é ligado às fontes de energia e a pistola de solda, podendo ser integrados ou separados das fontes de energia. As fontes de energia são semelhantes às utilizadas pelo processo de eletrodo revestido, com geradores ou amplificadores, de modo que os pinos são ligados ao polo positivo (JUNIOR; TREMONTI, 2015).

O sistema de alimentação automático é fundamental para produção em grandes volumes. Ele é composto por um reservatório para armazenamento de uma grande quantidade de pinos. Esses são enviados até a ponta da pistola movidos por ar comprimido, através de tubos flexíveis, que são encaixados na pistola de soldagem (JUNIOR; TREMONTI, 2015). Em relação ao tema tratado, a Figura 4 ilustra o esquema de instalação de um equipamento semiautomático de soldagem para pinos.

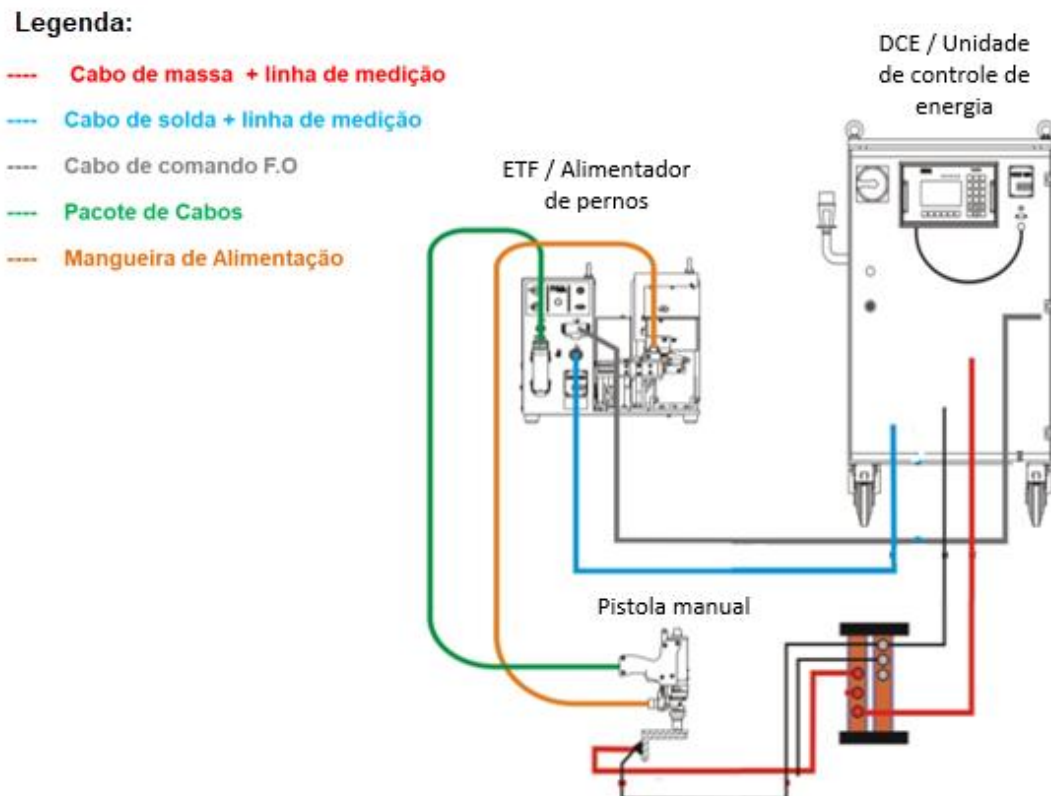


Figura 4: Esquema de instalação do equipamento para soldagem semiautomática.
Fonte: Adaptado de Stanley (2018)

2.4 PARÂMETROS DE SOLDA

Segundo Hamza (2012), os parâmetros programados para a soldagem de pinos vão depender do tipo de material e do tamanho da base do pino utilizado na soldagem. O conhecimento das configurações, ajustes dos parâmetros e a relação deles com a qualidade da solda é bastante importante para garantir os melhores resultados para a soldagem dos pinos.

Para o estudo realizado foram considerados 5 parâmetros: Corrente, tempo, *lift*, *stick-out* e penetração. Com o objetivo de encontrar a melhor combinação entre eles, entender quais os fatores que exercem maior influência na soldagem e as correlações entre eles.

2.4.1 Corrente de solda

De acordo com Chambers (2001), a corrente, medida em Amperes (A), é controlada e gerada através da fonte de energia e flui através de um vazio de ar ocasionado pela distância entre o pino e o metal base. A intensidade de solda é resultante da corrente de forma que quanto maior a corrente maior a intensidade de solda.

De acordo com a ASM (1993), a intensidade de corrente de solda é o fator que tem a maior influência no controle do volume da poça de fusão e da penetração no metal base. Sendo assim temos que, o volume da poça de fusão, assim como a quantidade de penetração, aumenta de acordo com a intensidade da corrente.

2.4.2 Tempo de solda

A atividade de soldagem requer um tempo mínimo para que possa atingir a temperatura de fusão, o qual depende da densidade de corrente. Para a obtenção de soldas com alta resistência é necessário ter uma taxa de geração de calor adequada (AWS, 2015).

2.4.3 Lift

O *Lift* se refere à distância que o prisioneiro é elevado em relação ao material base. A pistola de solda puxa o pino, deixando um gap entre o mesmo e a chapa base.

Com isso se forma o arco elétrico devido ao aumento da diferença de potencial. Através da resistência à passagem de corrente é gerado calor para derreter a base do pino e criar a poça de fundição no material base a qual receberá no final da soldagem a aplicação do pino (CHAMBERS, 2001). A Figura 5 ilustra um gráfico comparativo entre os parâmetros de *Lift* e Corrente de solda, apresentado a seguir.

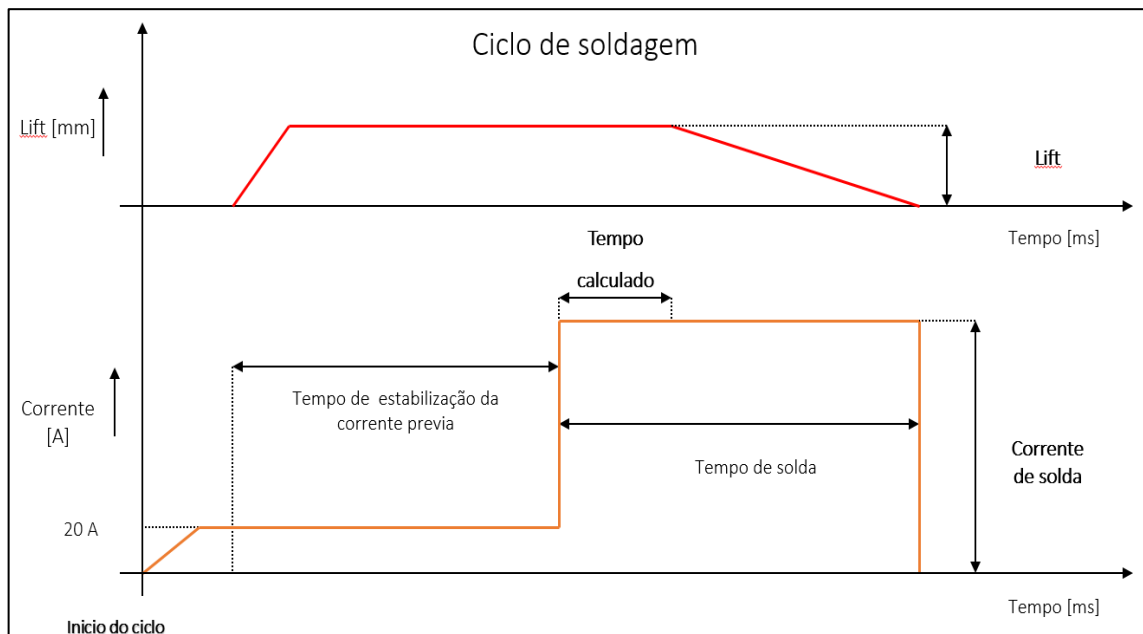


Figura 5: Comparativo entre Lift e Corrente de solda
Fonte: Stanley (2018)

2.4.4 Stick-out

O parâmetro *stick-out* ou *Plunge length* se refere a distância entre a base do pino roscado e o bocal da pistola, conforme a Figura 6. Essa configuração inicial é feita afrouxando os parafusos, o que permitirá o deslocando o bocal para frente ou para trás até encontrar a posição adequada (conforme a Figura 7). Após isso é feito o aperto dos parafusos novamente garantindo o ajuste realizado (TWE, 2013).

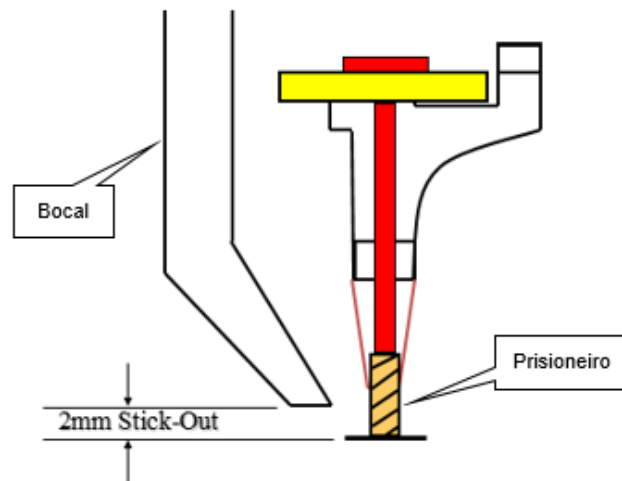


Figura 6: Stick-out
 Fonte: Adaptado de Stanley (2018)

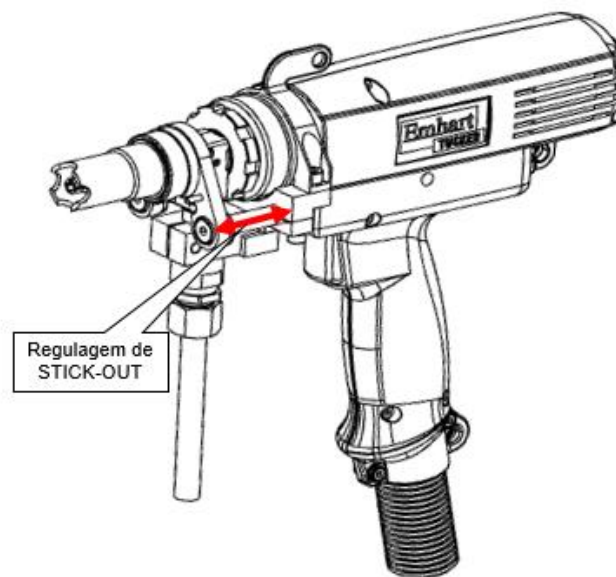


Figura 7: Regulagem do parâmetro Stick-out.
 Fonte: Adaptado de EMHART TECNOLOGIES TUCKER (2009).

2.4.5 Penetração

A penetração é um valor dado em mm e representa o quanto o prisioneiro deverá entrar na chapa base para garantir uma boa ancoragem dele. Na programação dos parâmetros de soldagem é possível inserir o valor que se quer obter para penetração do prisioneiro na chapa. Nessa programação também é possível

estabelecer limites de máxima e mínima penetração, aceita no processo. No programa temos a penetração de entrada e a penetração de saída (STANLEY, 2018).

- Penetração de entrada: é o valor programado pelo operador, para a condição de soldagem do processo.
- Penetração de saída: é o valor de penetração real obtido na soldagem do prisioneiro.

A penetração do prisioneiro ocorre no momento de deposição do prisioneiro sobre a poça de fundição gerada pelo arco elétrico por meio de uma pressão aplicada sobre o pino conforme ilustrado pela Figura 8 e Figura 9.

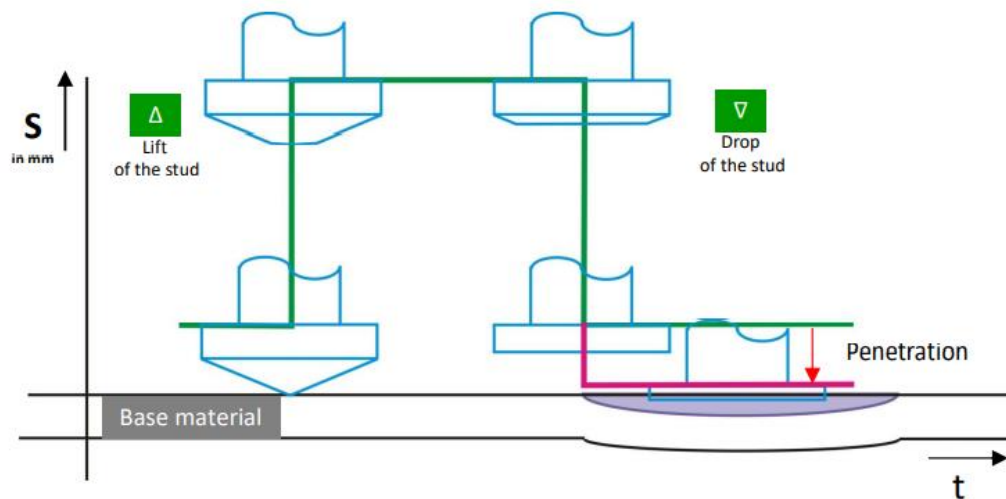


Figura 8: Processo de penetração.
Fonte: Stanley (2018).

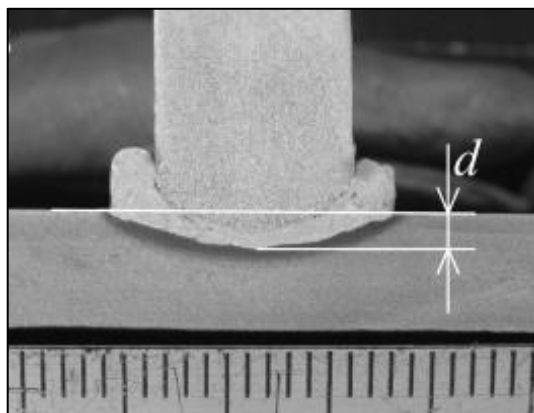


Figura 9: Profundidade de penetração d (mm).
Fonte: I. SAMARDŽIĆ et al. (2009).

2.5 QUALIDADE VISUAL DA SOLDAGEM DE PRISIONEIRO.

Avaliação visual de qualidade da solda do processo de SWS. Essa consiste em verificar se foi formada uma rebarba de solda de forma completa de 360° em volta da base do prisioneiro. A Figura 10 mostra soldagem, típica de pinos, aceitáveis e as que apresentam problemas de solda (ASM INTERNACIONAL, 1993).

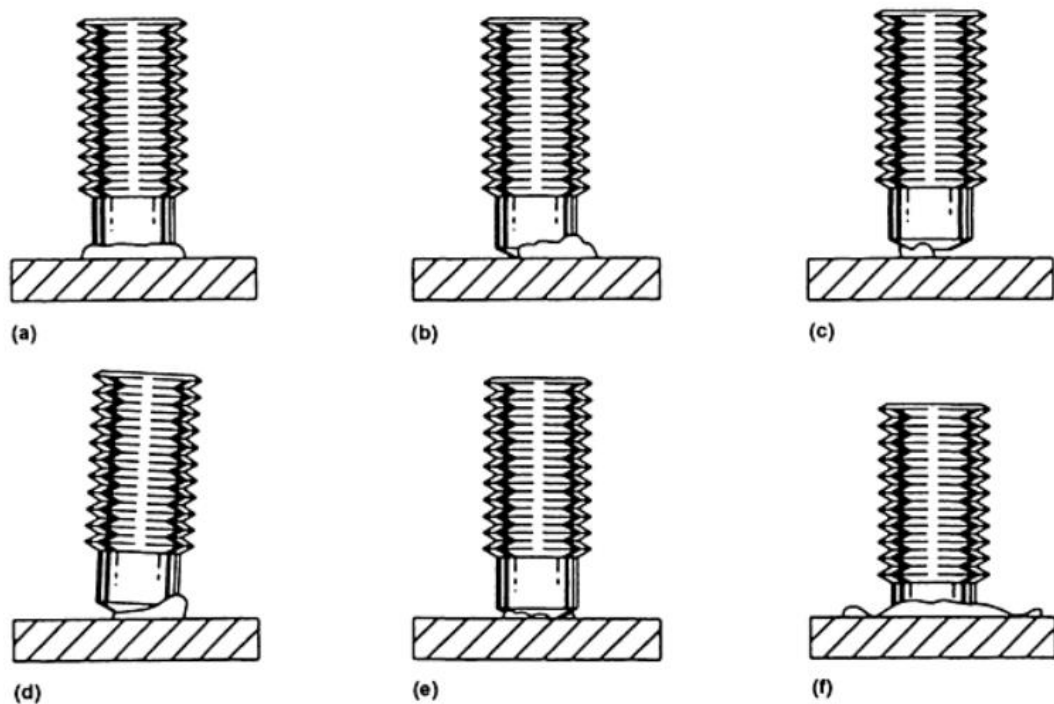


Figura 10: Característica de soldagem SW satisfatórias e não satisfatórias.

(a) Solda satisfatória, boa formação de arco, havendo uma camada de material fundido ao redor de toda a circunferência da base do pino; (b) Insatisfatório, mergulho curto, pouco material fundido, causado por stickout inadequado ou aterramento insuficiente para a peça; (c) Insatisfatória, comprimento de arco inadequado, causado pela movimentação do pino antes do ciclo completo; (d) Insatisfatório, desalinhamento do pino devido o posicionamento ruim da pistola; (e) Insatisfatório, solda a frio, a qual resulta em uma formação incompleta do arco em torno das bordas da base do pino; (f) Insatisfatório, solda quente, acontece quando tem a expulsão violenta do material fundido, o que resulta em uma má formação do arco. Fonte: ASM Internacional (1993).

2.6 PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS

A ferramenta estatística DOE (do inglês, Design of experiments) é composto por uma série de técnicas para a identificação e controle de parâmetros que tem influência sobre o desempenho e confiabilidade de um projeto de produto ou saída de

um processo. Esse método busca analisar a significância das variáveis nas saídas de um processo e a correlação entre os parâmetros estudados. O objetivo do estudo é otimizar os valores dos parâmetros que influenciam a saída do processo para obter os melhores resultados possíveis e tornar o processo mais confiável e com menos variações.

As técnicas do DOE utilizadas para melhoria de processos compreende a identificação e controle dos fatores (variáveis), os quais influenciam de forma considerável na saída de um processo. Para isso é necessário a escolha dos fatores e a escolha dos níveis (valores de trabalho), podendo ser dois ou mais valores. Com a definição dos fatores e níveis, são realizadas combinações entre esses e efetuado experimentos. Cada combinação realizada no experimento é conhecida como uma tentativa. A ideia central é realizar um pequeno número de experimentos com os diferentes parâmetros e verificar qual o efeito desse em uma saída definida, como força máxima resistida. Desse modo utilizando como base a análise dos dados é possível prever o desempenho do sistema (DALE, 2002).

2.6.1 Planejamento Fatorial Fracionado de Plackett e Burman

Existem vários métodos para a realização do DOE, a escolha de qual método usar vai depender da quantidade de fatores que se quer avaliar no estudo. A escolha do método mais adequado para a análise é de grande importância, pois torna o experimento mais eficiente e com menores gastos de tempo e materiais.

Esse problema da grande quantidade de experimentos ao aumentar o número de fatores foi estudado por três ingleses, sendo eles Fisher (1925) na década de 1920 especialmente na agricultura e por Plackett e Burman (1946) em processos de fabricação na década de 1940. Em um experimento a fração escolhida representa uma distribuição uniforme e equilibrada de todos os fatores avaliados, o qual possibilita a realização de menos experimentos em relação ao método fatorial completo 2^k , sendo k o número de fatores (DALE, 2002).

Para a análise de influência dos fatores escolhidos para o estudo foi utilizado o planejamento fracionário de Plackett e Burman. Esse planejamento emprega um total de 12, 20, 24, 28, ... ensaios para avaliar de forma concomitante até 11, 19, 23, 27, ... fatores. Dessa forma é possível estimar todos os $k = n - 1$ efeitos principais, onde n é

o número de ensaios com mínima variância (NETO; SCARMINIO; BRUNS, 2001). A Tabela 1 mostra o planejamento correspondente a $n=12$.

Tabela 1: Planejamento fracionário saturado de Plackett e Burman para o estudo de 11 variáveis com 12 ensaios.

| Ensaio | I | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
|--------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|
| 1 | + | + | + | - | + | + | + | - | - | - | + | - |
| 2 | + | + | - | + | + | + | - | - | - | + | - | + |
| 3 | + | - | + | + | + | - | - | - | + | - | + | + |
| 4 | + | + | + | + | - | - | - | + | - | + | + | - |
| 5 | + | + | + | - | - | - | + | - | + | + | - | + |
| 6 | + | + | - | - | - | + | - | + | + | - | + | + |
| 7 | + | - | - | - | + | - | + | + | - | + | + | + |
| 8 | + | - | - | + | - | + | + | - | + | + | + | - |
| 9 | + | - | + | - | + | + | - | + | + | + | - | - |
| 10 | + | + | - | + | + | - | + | + | + | - | - | - |
| 11 | + | - | + | + | - | + | + | + | - | - | - | + |
| 12 | + | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |

Fonte: Neto, Scarminio, Bruns (2001).

A Tabela 1 representa a distribuição da combinação entre os fatores e seus níveis, para cada número de variáveis trabalhada dentro do limite de 11 com 12 experimentos. Os sinais de + e -, representam a combinação dos níveis alto e baixo respectivamente para cada variável.

2.7 TESTE DE TRAÇÃO

Segundo a norma AWS D1.1 (2015) o teste de tração é um dos testes recomendados para verificar a qualidade da soldagem de prisioneiros. O teste deve ser realizado utilizando uma máquina de tração que seja capaz de fornecer a força necessária para o arrancamento do perno. O dispositivo utilizado para prender o corpo de prova deve ser conforme mostrado na Figura 11, devendo prender a chapa base de solda e a parte superior do prisioneiro para que seja possível o teste de arrancamento.

Para todos os tipos de teste e para qualquer diâmetro de base do prisioneiro o teste é considerado como soldagem qualificada, se nos corpos de prova ocorrer fratura no material da placa ou no próprio pino. Sendo assim é considerado desqualificado se houver ruptura na solda, entre o pino e a chapa base (AWS, 2015).

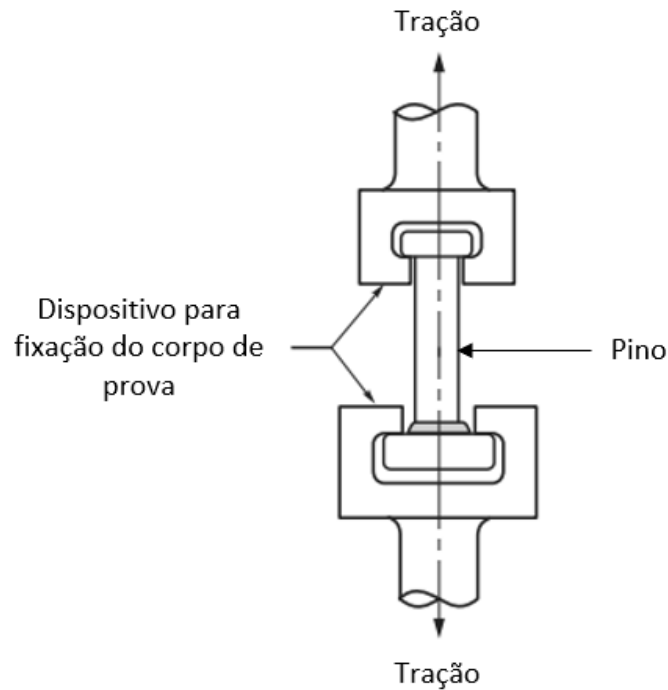


Figura 11: Ensaio de tração.
Fonte: AWS (2015).

2.8 DEFINIÇÃO DO PROCESSO DE SOLDAGEM MANUAL DE PRISIONEIROS

As atividades realizadas pelo colaborador no processo de soldagem manual dos prisioneiros são divididas conforme o fluxograma representado na Figura 12. Esse representa o processo realizado pelo operador para cada peça soldada na estação de trabalho estudada.

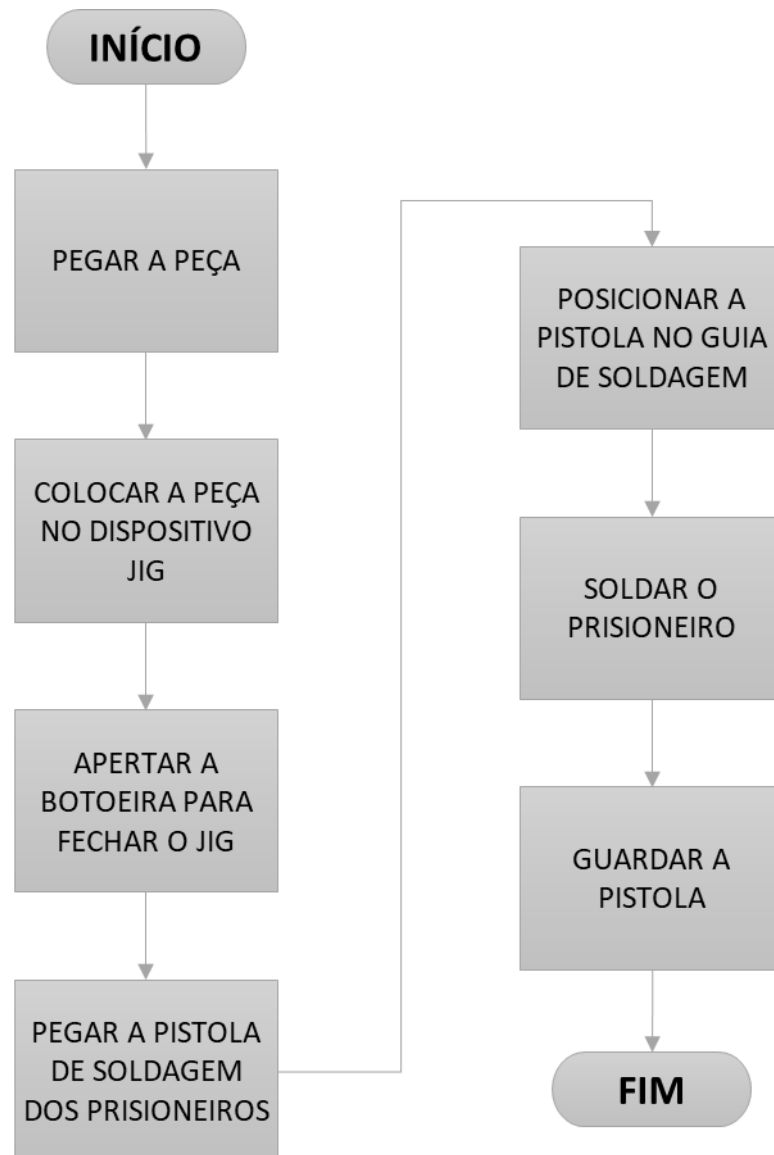


Figura 12: Fluxograma representativo para a atividade de soldagem manual dos prisioneiros na indústria automotiva estudada.
Fonte: Autor (2022).

2.9 ANÁLISE DE CAUSAS E EFEITOS

Através do mapeamento e definição do processo de soldagem manual dos prisioneiros, foi realizado o mapeamento de todas as possíveis causas que podem influenciar a falha (defeito) na solda. Para esse mapeamento utilizou-se o diagrama de Ishikawa também conhecido como Diagrama de Causa e Efeito ou 6M, o qual se encontra na Figura 13.

Esse diagrama é utilizado como um brainstorming para evidenciar ideias de prováveis causas de um problema e auxiliar posteriormente na geração de ideias para

a melhoria ou solução dele. O diagrama ilustra de forma clara as possíveis relações entre o efeito (problema) e as causas (fatores que contribuem para o problema), as quais são subdivididas em categorias diferentes para facilitar a análise. As principais categorias de divisão do diagrama são: Medida, Material, Mão de obra, Método, Máquina e Meio ambiente (DALE, 2003).

O diagrama de Ishikawa, foi realizado com embasamento teórico abordado no estudo e em conjunto com um grupo de especialistas em solda, que trabalham no setor de soldagem de carrocerias da fábrica a qual foi realizado o estudo.

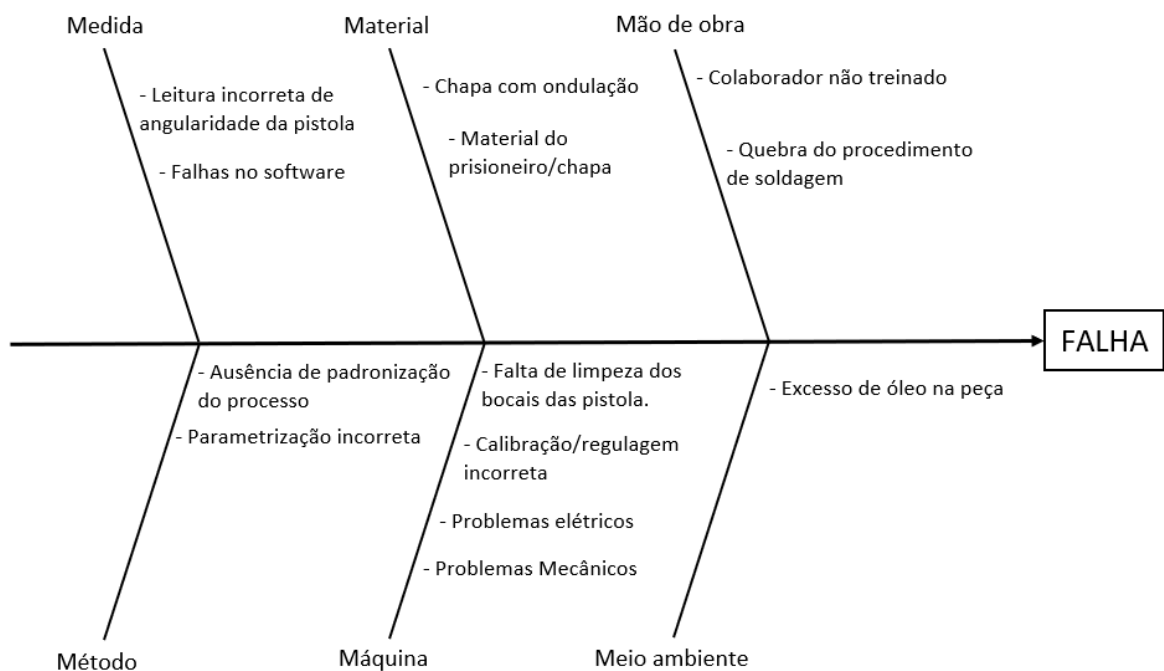


Figura 13: Diagrama de Ishikawa (causa e efeito).
Fonte: Autor (2022).

A partir do diagrama de Ishikawa foram identificadas várias possíveis causas para o problema. Dessa forma fez-se a utilização de outra ferramenta, a Matiz de Causa e Efeito. A qual busca classificar os principais efeitos que contribuem para a falha, a fim de trabalhar para a eliminação ou melhoria das causas que afetam de forma mais significativa o processo conforme apresentado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** (DAHLGAARD, KRISTENSE, KANJI, 2007).

| Matriz de Causa &Efeito | | | | |
|---|--|--------------------------|------------|---------------------------------|
| Avaliação de importância para o cliente | | 6 | 9 | Ranking Total das Causas |
| Saídas do processo | | Baixa qualidade da solda | Retrabalho | |
| Entradas do Processo | | | | |
| 1 | Quebra do procedimento de soldagem | 9 | 9 | 135 |
| 2 | Parametrização incorreta | 9 | 9 | 135 |
| 3 | Regulagem e calibração incorreta | 9 | 9 | 135 |
| 4 | Excesso de óleo na peça | 9 | 6 | 108 |
| 5 | Ausência de padronização do processo | 6 | 3 | 63 |
| 6 | Colaborador não treinado | 6 | 3 | 63 |
| 7 | Leitura incorreta de angularidade da pistola | 6 | 3 | 63 |
| 8 | Falhas no software | 3 | 3 | 45 |
| 9 | Chapa com ondulação | 3 | 3 | 45 |
| 10 | Material do prisioneiro/chapa base | 3 | 3 | 45 |
| 11 | Falta de limpeza dos bocais das pistolas | 3 | 3 | 45 |
| 12 | Problemas elétricos | 3 | 3 | 45 |
| 13 | Problemas Mecânicos | 3 | 3 | 45 |

Figura 14: Matriz de causa e efeito para avaliação do processo de soldagem SW estudado.

Fonte: Autor (2022).

Na matriz apresentada na Figura 14, foram inseridos nas linhas as causas e nas colunas os efeitos a serem eliminados ou melhorados no processo, como o alto índice de retrabalho e problemas de qualidade, logo acima desses foi colocado o peso do efeito para o cliente. Para a classificação das causas em relação aos efeitos foram utilizadas as seguintes referências de valores: 3 – baixa correlação, 6 – média correlação e 9 – alta correlação.

Em seguida foi calculado o somatório dos produtos, entre a classificação e o peso de cada causa em relação aos efeitos. Para exemplificar temos a causa

“parametrização incorreta” com a nota 135, esse valor foi obtido através do cálculo de 9 multiplicado por 6 mais 9 multiplicado por 9. Desse modo foi obtido a nota apresentada no ranking total das causas.

Através da classificação obtida com o auxílio da ferramenta apresentada, foi possível identificar as principais causas raízes para os efeitos a serem tratados. Com isso propôs-se estudar uma das causas com maior potencial de falha que é a parametrização incorreta. Para buscar adequar a soldagem aos parâmetros que melhor atendem a soldagem da região.

3 METODOLOGIA

O diagrama a seguir, descreve de forma sucinta o fluxo das atividades desenvolvidas para a realização do estudo proposto, em que ele pode ser averiguado na Figura 15, a apresentada a seguir.

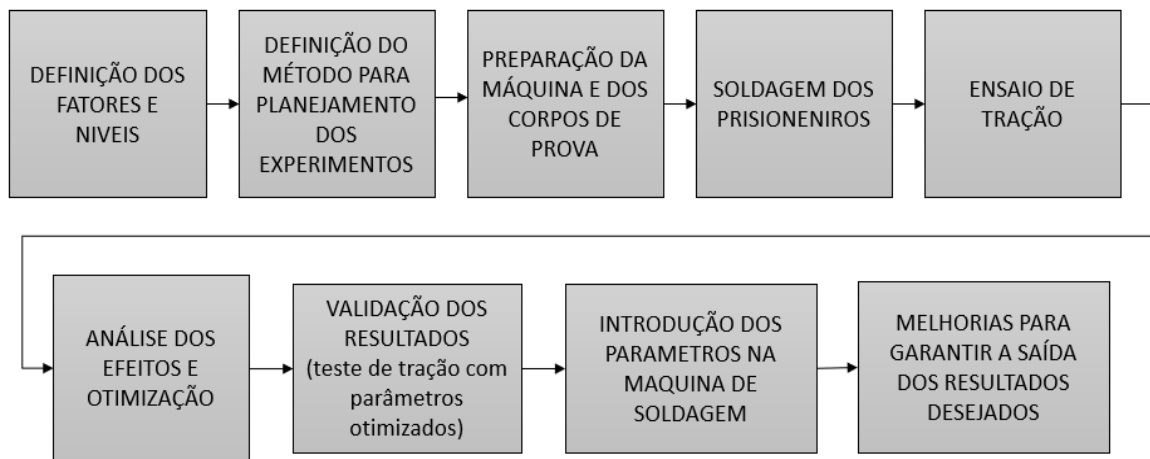


Figura 15: Diagrama de fluxo de composição para execução do estudo.
Fonte: Autor (2022).

3.1 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização dos experimentos foram utilizados equipamentos de soldagem de prisioneiros o qual é utilizado na linha de produção das carrocerias. Também foram utilizados o método de planejamento de experimentos, para que se fosse possível a obtenção de resultados mais confiáveis e eficientes.

3.1.1 Características do prisioneiro

Para o estudo realizado foi utilizado pinos do modelo de rosca métrica M6x14, de flange curta de 7 mm e possui revestimento de cobre. Os pinos de solda são utilizados em diversas áreas de manufatura industrial. Esse tem a função de fixação de uma grande variedade de componentes, e são amplamente usados nas indústrias automotivas.

De acordo com CDA (1998), o cobre dentre os materiais disponíveis no mercado atualmente, é o que possui as melhores combinações de características como: alta condutividade, boa resistência, ductilidade, usinagem, soldabilidade, durabilidade, boa resistência à oxidação.

O modelo de pino estudado neste trabalho e suas especificações de tamanho são apresentados na Figura 16.

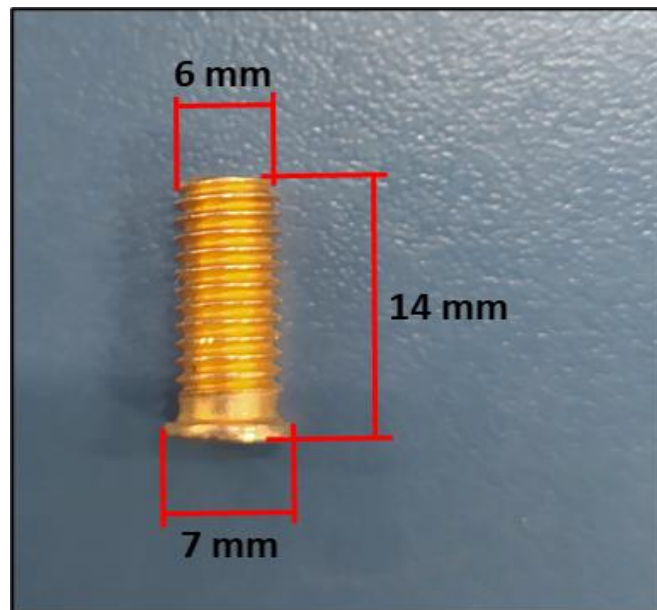


Figura 16: Modelo do Pino estudado M6x14.
Fonte: Autor (2022).

3.1.2 Equipamento de soldagem

Os equipamentos utilizados no processo de soldagem dos prisioneiros na indústria automotiva estudada são mencionados a seguir, os mesmos foram utilizados durante a soldagem dos corpos de prova, para a realização dos testes de tração.

3.1.1.1 Controlador de solda

É o que controla todo o processo de SWS, sendo ele a Energia de soldagem. Através do controlador é possível definir os parâmetros de soldagem como: Tempo, corrente, lift, penetração, entre outras configurações. É possível também através do monitor ou IHM verificar os valores de saída após a soldagem como: Penetração real do pino, entre outros fatores. A Figura 17 apresenta o controlador de solda.



Figura 17: Controlador de solda.
Fonte: Emhart Teknologies Tucker (2010).

3.1.1.2 Alimentador de parafusos

O alimentador é responsável por armazenar uma boa quantidade de parafusos para que sejam utilizados no decorrer do processo de soldagem na indústria. Esse diminui o número de abastecimentos durante a alta produção. A Figura 18 ilustra o alimentador de parafusos.



Figura 18: Alimentador de parafusos.
Fonte: Emhart Technologies Tucker (2010).

3.1.1.3 Pistola de Aplicação de Prisioneiros Manual

A pistola é a ferramenta de aplicação do prisioneiro na peça de forma manual, através do colaborador ela é posicionada no local correto de soldagem de forma perpendicular a peça. Na ferramenta contém um gatilho que libera a solda quando o posicionamento dela em relação a peça estiver correto. O colaborador verifica a leitura de posicionamento da pistola e aciona o gatilho para a execução da solda. A Figura 19 apresenta a pistola de aplicação de prisioneiros manual.



Figura 19: Pistola de aplicação de prisioneiros manual.
Fonte: Stanley (2018).

3.1.2 Definição dos fatores e níveis

Foram escolhidos cinco fatores de entrada para serem trabalhados no experimento, a fim de entender qual a influência desses na saída do processo e qual a melhor combinação para obter uma solda de qualidade.

A parametrização inicial de corrente e tempo para a soldagem do prisioneiro é dada pela Equações 1 e 2 respectivamente, as quais são utilizadas para calcular qual a corrente e tempo mínimos para a soldagem de um prisioneiro em chapa de 0,8 mm considerando uma superfície limpa e sem zinco de acordo com o fornecedor do equipamento Stanley (2018). Desse modo, através das fórmulas indicadas pelo fornecedor foi calculado a corrente e o tempo utilizando o valor da flange de solda (diâmetro da base do prisioneiro) igual a 7 mm. Foram obtidos valores de 600 A e 24 ms. Através desses valores determinamos os níveis de corrente e tempo conforme a Tabela 2.

$$(FLANGE\ DE\ SOLDA\ \varnothing - 1) \times 100A \quad (A) \quad (1)$$

$$(FLANGE\ DE\ SOLDA\ \varnothing - 1) \times 4ms \quad (A) \quad (2)$$

De acordo com o fornecedor Stanley (2018), os valores programáveis de elevação (*Lift*), para o modelo de pistola utilizado (PLM200), são de 0,5 mm à 2,5 mm. Desse modo os níveis trabalhados no experimento estão dentro do especificado.

Segundo Stanley (2018) os valores de *Stick-out* e penetração são determinados de acordo com tipo de pino e espessura de chapa utilizados no processo de soldagem. Para o stick-out o valor recomendado é de 2 mm.

Seguem os valores escolhidos para o experimento na Tabela 2.

Tabela 2: Fatores e níveis definidos para o experimento.

| FATORES | Nível Baixo | Nível Alto |
|-----------------|-------------|------------|
| Corrente (A) | 590 | 710 |
| Tempo (ms) | 24 | 32 |
| Lift (mm) | 0,6 | 1,2 |
| Stick out (mm) | 1,6 | 2 |
| Penetração (mm) | 0,8 | 1,2 |

Fonte: Autor (2022).

3.1.3 Definição das combinações para os testes de solda

A combinação entre os parâmetros é feita com base na metodologia de planejamento de estudos DOE, e os conceitos de Plackett e Burman. Para auxiliar no estudo e definição das combinações dos fatores e níveis a serem testados, foi utilizado o software estatístico *Minitab*.

Para a configuração do estudo na ferramenta de auxílio, foi escolhido a opção do método Plackett e Bruman. Após isso foram introduzidos, no software, os cinco fatores a serem trabalhados e seus níveis. Desse modo foi gerado, de forma automática, uma tabela com as combinações a serem testadas no estudo conforme Tabela 3.

Tabela 3: Definição das combinações para os experimentos

| Ordem | Corrente | Tempo | Lift (elevação) | Stick out | Penetração |
|-------|----------|-------|-----------------|-----------|------------|
| 1 | 710 | 24 | 1,2 | 1,6 | 0,8 |
| 2 | 710 | 32 | 0,6 | 2,0 | 0,8 |
| 3 | 590 | 32 | 1,2 | 1,6 | 1,2 |
| 4 | 710 | 24 | 1,2 | 2,0 | 0,8 |
| 5 | 710 | 32 | 0,6 | 2,0 | 1,2 |
| 6 | 710 | 32 | 1,2 | 1,6 | 1,2 |
| 7 | 590 | 32 | 1,2 | 2,0 | 0,8 |
| 8 | 590 | 24 | 1,2 | 2,0 | 1,2 |
| 9 | 590 | 24 | 0,6 | 2,0 | 1,2 |
| 10 | 710 | 24 | 0,6 | 1,6 | 1,2 |
| 11 | 590 | 32 | 0,6 | 1,6 | 0,8 |
| 12 | 590 | 24 | 0,6 | 1,6 | 0,8 |

Fonte: Autor (2022).

As combinações de parâmetros obtidas na Tabela 3 foram inseridas na programação do equipamento de solda para a realização da soldagem dos corpos de provas. Esses, por sua vez, foram testados através de uma máquina de tração, a fim de obter os resultados de força máxima resistida. O processo seguiu conforme indicado na Figura 20.

Para realizar as análises dos dados, obtidos com os testes, tem-se como ferramenta suporte, o software estatístico Minitab. A ferramenta estatística Minitab é utilizada para obter as respostas em formatos gráficos. Os quais apresentam as correlações entre os fatores, quais fatores são mais significativos para o processo, efeitos principais de cada fator, elaboração da otimização dos parâmetros trabalhados, obtenção de superfícies de respostas.

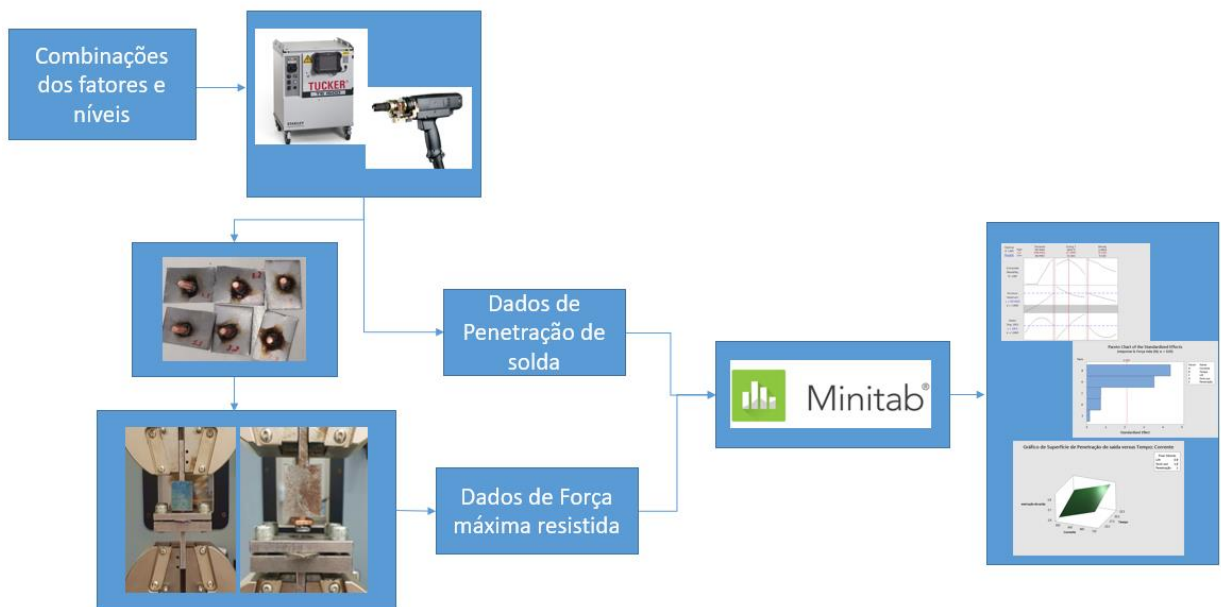


Figura 20: Mapa ilustrativo para obtenção e análise de dados.
Fonte: Autor (2022).

Os dados obtidos através do estudo de parâmetros e após as análises dos dados, serão introduzidos nos equipamentos de soldagem desse mesmo modelo de pino de mesma configuração de chapa. Para que deste modo a máquina trabalhe com parâmetros confiáveis, evitando o erro de parametrização e possíveis problemas de qualidade de solda.

O estudo também possibilita entender melhor a contribuição de cada variável para a resposta do processo e como trabalhá-las da melhor forma possível. Também

aumenta de forma significativa o entendimento das variáveis que são relevantes ao processo de soldagem, por parte dos colaboradores responsáveis pelo equipamento e garantia da qualidade da solda.

4 RESULTADOS E DISCUÇÕES

Foi realizado um estudo quantitativo das falhas encontrados na montadora relacionadas à soldagem dos prisioneiros com o objetivo de confirmar se o problema de rompimento tem a maior porcentagem comparado com outros tipos de defeitos. Nessa pesquisa, realizada no período de outubro a dezembro de 2021, as falhas foram catalogadas em quatro categorias: rompimento, faltando, quebrado e fora de posição.

Com base em uma planilha na qual a empresa faz o controle dos defeitos encontrados no produto, durante o processo de montagem, foi elaborado um gráfico de Pareto, apresentado na Figura 21. Esse gráfico mostra a quantidade de defeitos de cada categoria e o somatório da porcentagem dos erros.

Observa-se que o defeito de prisioneiro rompido (solda fraca) é o que contém maior número de ocorrências em relação aos demais defeitos de prisioneiros. Para reparar esses erros são realizados procedimentos reparo de solda. Esses reparos são retrabalhos para a montadora, propagando-se no custo final de produção do veículo.

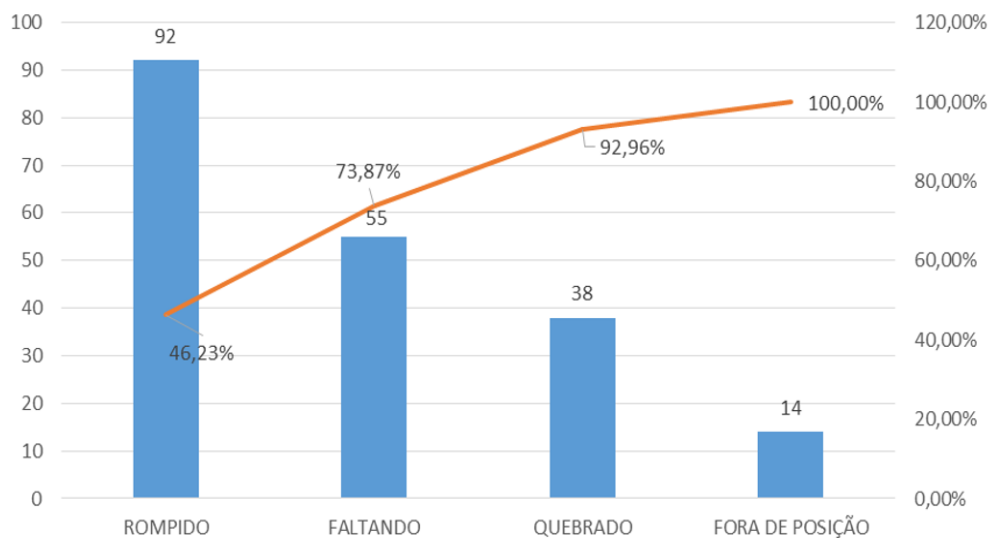


Figura 21: Gráfico Pareto referente a quantidade de defeitos dos prisioneiros por categorias. Dados coletados de outubro a dezembro de 2021.

Fonte: Autor (2022).

Visto que o rompimento é o defeito de maior ocorrência no processo de montagem final referente aos prisioneiros e, por consequência, agrega-se ao valor final do produto, foi realizado o estudo sobre os fatores que influenciam na soldagem dos prisioneiros.

No estudo realizado, analisou-se o processo de soldagem dos prisioneiros, a qual é feita por máquina manual. Essa máquina utiliza parâmetros os quais dependem do tipo de prisioneiro e da chapa em que ele será soldado.

Em concordância com as análises realizadas, um método que pode ser implementado para amenizar a perda de produtos e as pausas na linha de produção é identificar o melhor parâmetro para a condição de soldagem.

A fim de identificar as melhores combinações de parâmetros para se trabalhar no processo de soldagem dos prisioneiros, foi realizado o estudo considerando 5 fatores (corrente, tempo, *lift*, penetração e *stick-out*) trabalhados em 2 níveis de entrada, baixo e alto.

As combinações dos fatores representadas na Tabela 3, foram aplicadas na soldagem dos corpos de prova. Esses corpos de provas foram levados ao laboratório de testes de materiais da indústria onde foi realizado o estudo. Os corpos de provas passaram por teste de tração, para constatar quais combinações alcançaram os melhores resultados de força máxima resistida. A Figura 22 mostra o modelo de teste realizado.

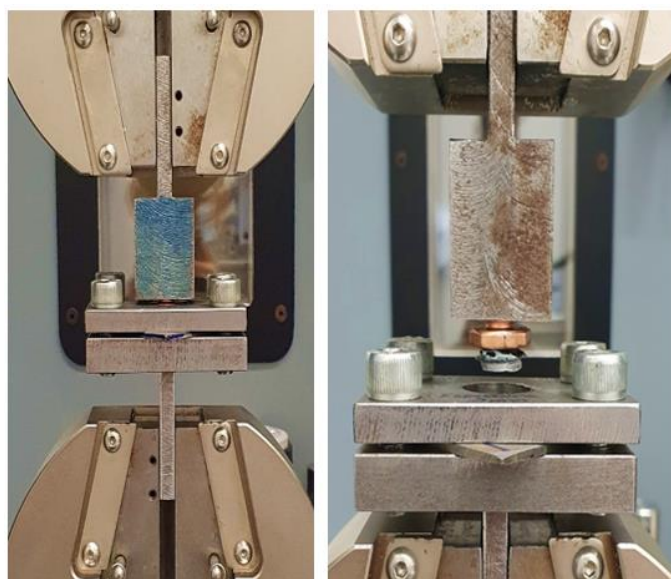


Figura 22: Teste de tração dos corpos de provas.
Fonte: Autor (2022).

De forma a mostrar visualmente o defeito de rompimento, foi registrado dois testes de tração da união soldada entre o prisioneiro e a chapa de aço. Os quais mostram os extremos dos resultados de solda ruim e solda boa, obtidos no estudo.

Na ilustração a esquerda da Figura 23 mostra uma solda fraca devido à baixa penetração na chapa e, de acordo com os resultados do teste de tração, com baixas propriedades mecânicas. A combinação dos parâmetros utilizada nessa solda deve ser evitada durante o processo, pois a resistência à esforços na montagem dos componentes é baixa.

A ilustração à direita dessa figura apresenta uma solda com boa penetração na chapa e, pelos testes de tração, altas propriedades mecânicas. Esse tipo de solda resiste à maiores esforços físicos, o que resulta em uma maior confiabilidade na montagem.

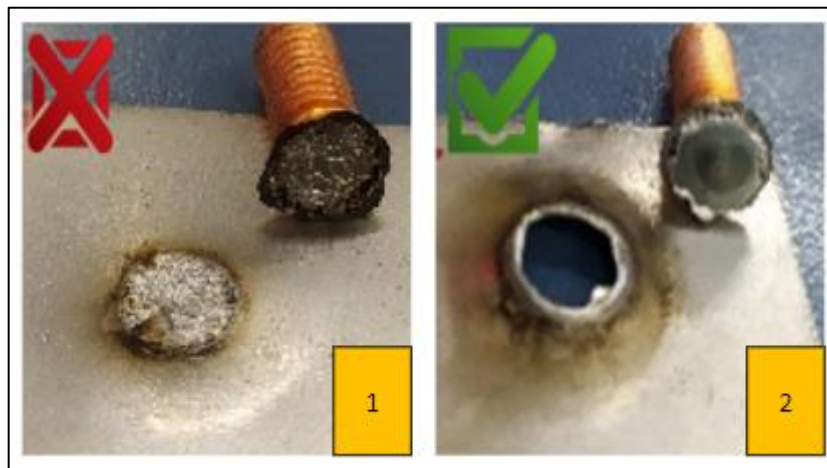


Figura 23: Condição da solda, 1- Solda com defeito (rompido), 2- Solda com boa qualidade.

Fonte: Autor (2022).

4.1 RESULTADOS DO EXPERIMENTO FATORIAL

Através dos testes de tração, realizados no laboratório, foram encontrados os resultados de força máxima resistida para cada corpo de prova soldado com as combinações inseridas no equipamento de soldagem. Esses resultados estão apresentados na Figura 24.

A fim de evitar erros nos resultados, devido a variabilidade inerentes ao processo de soldagem manual, os experimentos foram realizados de forma duplicada.

De forma que, do experimento 1 ao 12 seguem os parâmetros conforme a sequência de combinação presente na Figura 25 e do experimento 13 ao 24 é a replica dos parâmetros anteriores respectivamente.

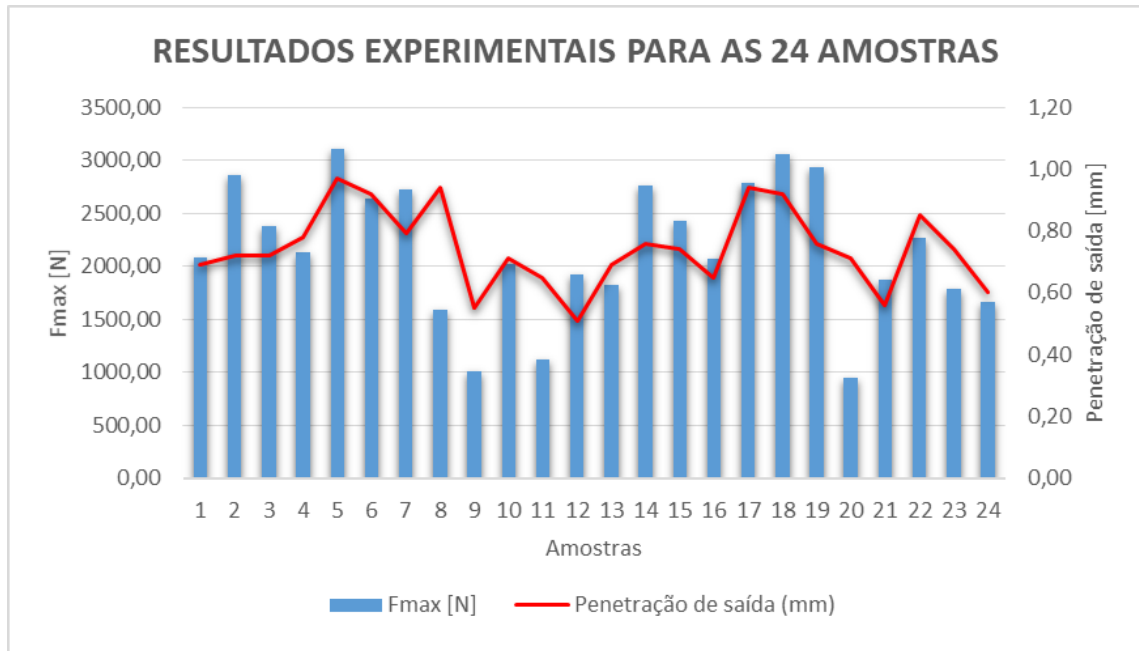


Figura 24: Resultados experimentais para força máxima resistida a tração e penetração de solda.
Fonte: Autor (2022).

A Figura 25, mostra visualmente os resultados da qualidade de solda obtida em cada teste de tração dos corpos de prova. Os quais foram soldados com os parâmetros estabelecidos no planejamento do experimento.

Podemos observar que foi possível obter soldas de boa qualidade como o teste 2, 5, 6 e 7 e em suas réplicas 14, 17, 18 e 19 respectivamente. Também é possível ver que os resultados de penetração de saída, anotados durante a soldagem dos corpos de prova, tem relação direta com a força resistida conforme apresentado na Figura 24. Dessa forma, quanto melhor a penetração do prisioneiro na chapa maior é a resistência da solda.



Figura 25: Resultados visuais dos testes de tração para cada combinação de parâmetros.
Fonte: Autor (2022)

Na Figura 25 podemos ver como ocorreu a fratura do material para cada união soldada a partir das combinações de fatores e níveis do experimento fatorial. Quanto maior a lentilha de solda arrancada maior é a força resistida pela união entre a chapa e o pino. Desse modo, podemos comparar visualmente as soldas que tiveram maior arrancamento do material de base, como por exemplo, a solda número 5. Essa também é a que obteve melhores resultados de força máxima resistida e alta penetração, conforme exposto na Figura 24.

4.2 ANÁLISE DE RESULTADO EXPERIMENTO FATORIAL

As variáveis de saída analisadas no estudo foram Força [N] e Penetração [mm]. Os resultados de Força foram obtidos de forma experimental a partir dos testes de tração realizados. Já os dados de penetração foram obtidos a partir da monitoração presente no software do equipamento.

Para melhor estudar os dados de saída, utilizou-se o programa de análise estatística Minitab, o qual permite avaliar de forma gráfica esses dados e entender a relevância e interação para cada fator trabalhado no experimento.

4.2.1 Análise dos efeitos

O gráfico de Pareto dos efeitos padronizados mostra os valores absolutos dos efeitos. Esse é utilizado para definir a relevância de cada fator em relação a resposta obtida, do maior para o menor. Os fatores (barras horizontais) que cruzam a linha de referência (linha tracejada em vermelho) são os mais significativos estatisticamente (MINITAB, LLC, 2021). Dessa forma podemos ver através dos gráficos, que os efeitos principais para a respostas de força máxima [N], de acordo com a Figura 26, são tempo e corrente respectivamente. Também podemos ver que para os resultados de penetração conforme Figura 27, os fatores mais relevantes são: o tempo, corrente e penetração programada, respectivamente.

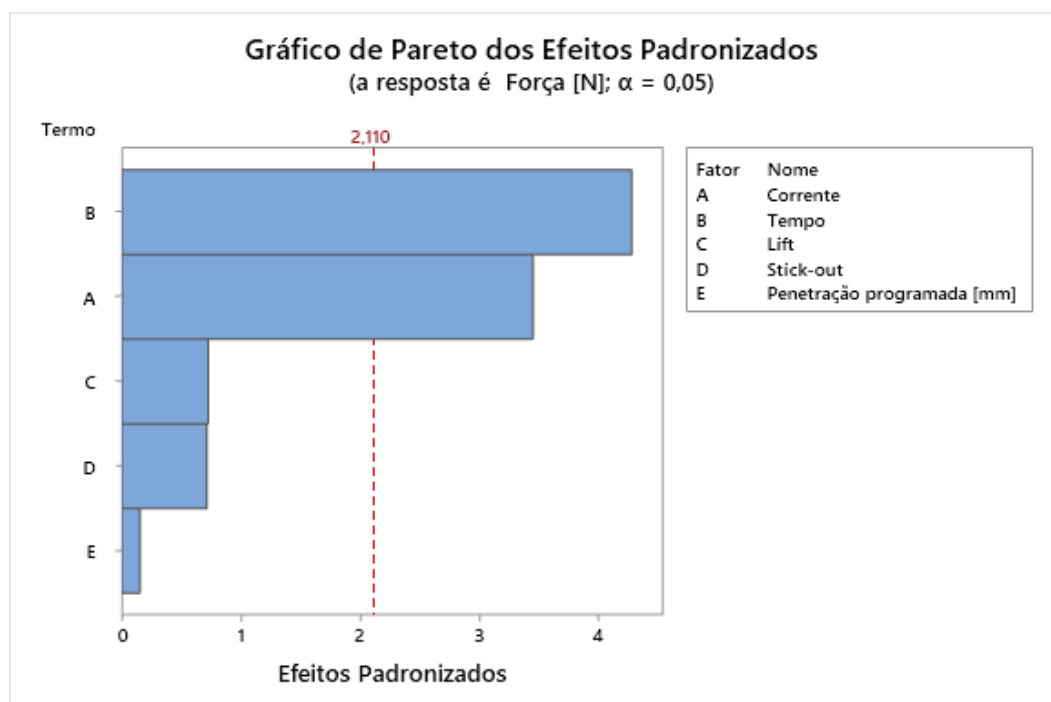


Figura 26: Gráfico dos Efeitos padronizados para Força [N]
Fonte: Autor (2022)

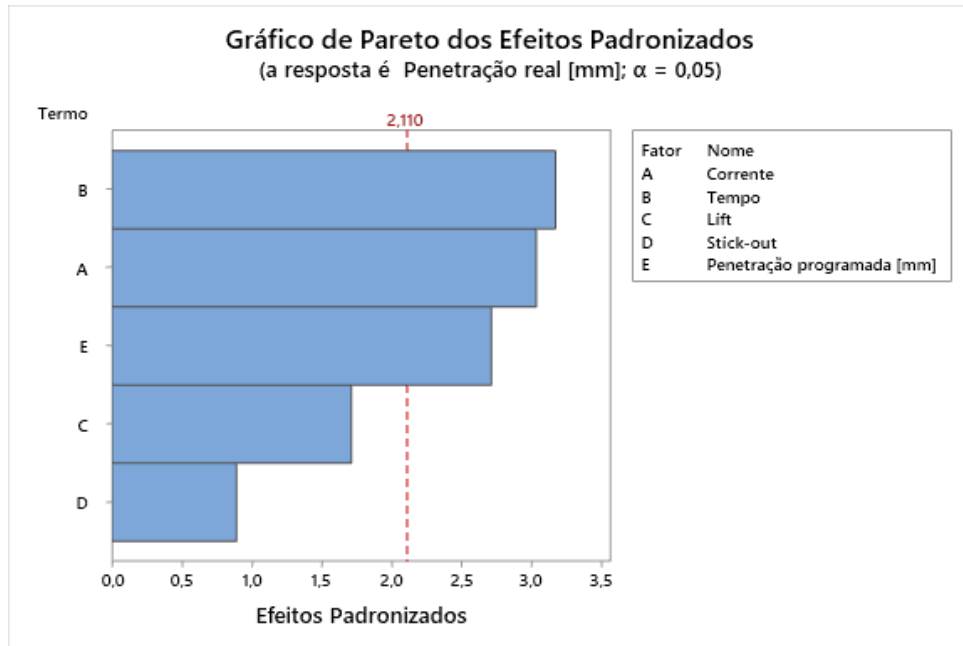


Figura 27: Gráfico dos Efeitos padronizados para Penetração de saída [mm]
Fonte: Autor (2022)

Através da análise dos gráficos da plotagem dos efeitos podemos identificar que os mesmos resultados dos gráficos de Pareto dos efeitos padronizados (Figura 26 e Figura 27) se repetem nos gráficos dos efeitos principais na Figura 28 e Figura 29. Esses gráficos mostram o quanto cada variável afeta nas saídas e se é proporcional ou inversamente proporcional as respostas.

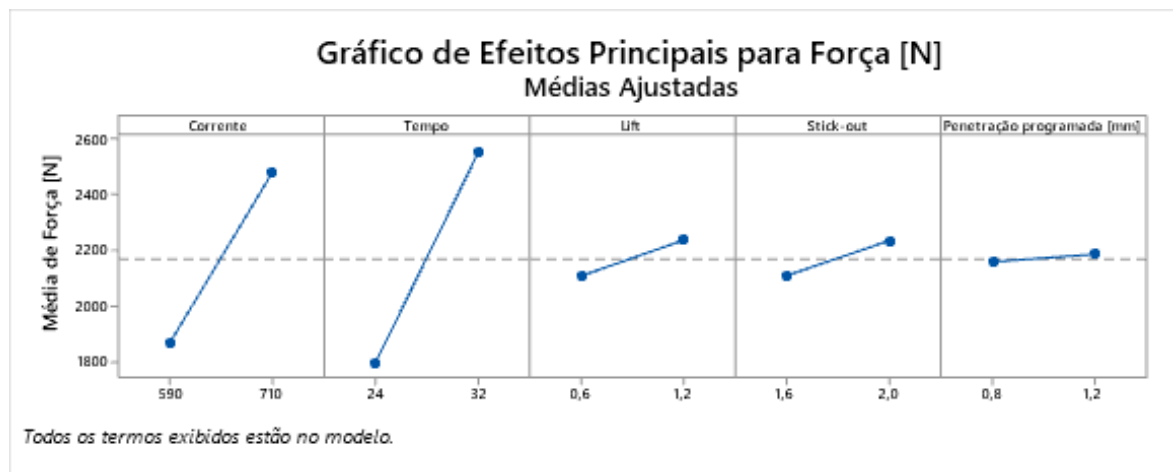


Figura 28: Gráfico dos efeitos principais para Penetração Força Máxima [N].
Fonte: Autor (2022)

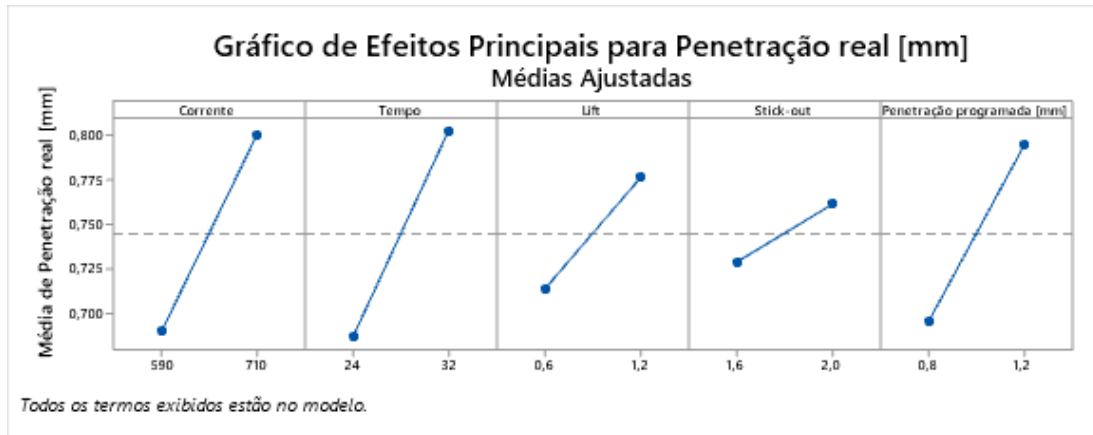


Figura 29: Gráfico de efeitos principais para Penetração de saída [mm].
Fonte: Autor (2022)

A partir dos gráficos de interação é possível avaliar a correlação entre as variáveis e se são proporcionais entre si. Para os resultados de força apresentados na Figura 30, apenas corrente e tempo não apresentam interação uma com a outra, as demais variáveis apresentam correlações umas com as outras. A partir do gráfico de interação para a resposta de penetração presente na Figura 31, é possível ver uma menor interação entre as variáveis trabalhadas no estudo.

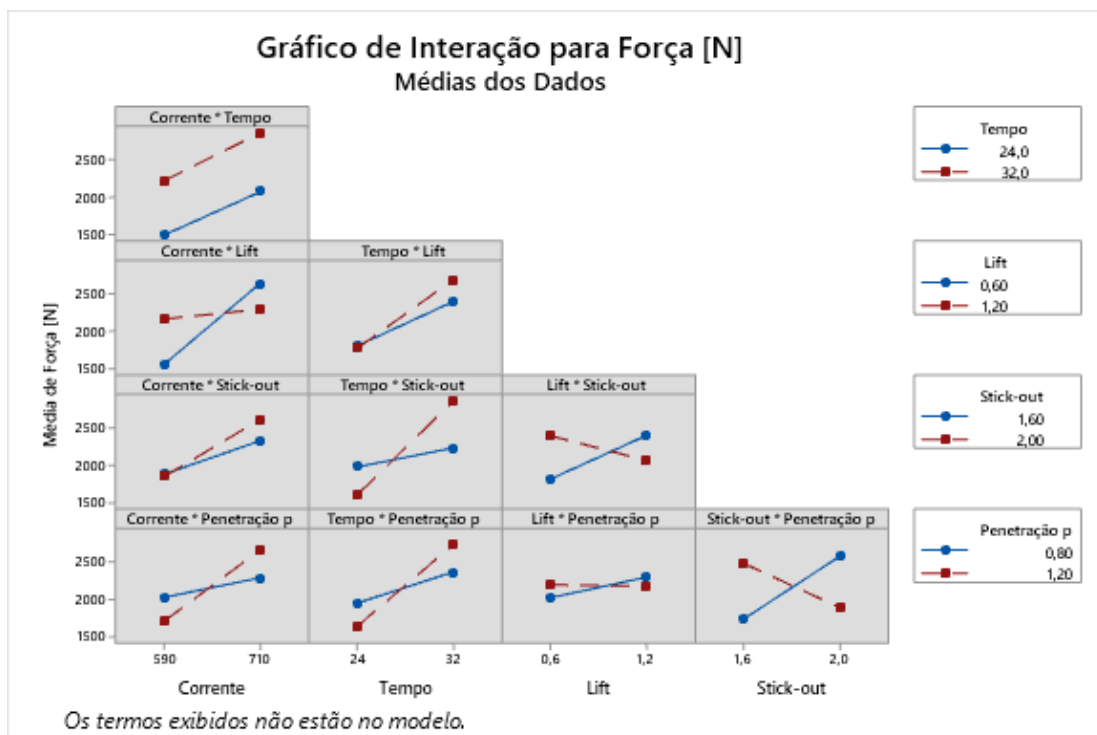


Figura 30: Gráfico de interação para Força máxima [N].
Fonte: Autor (2022)

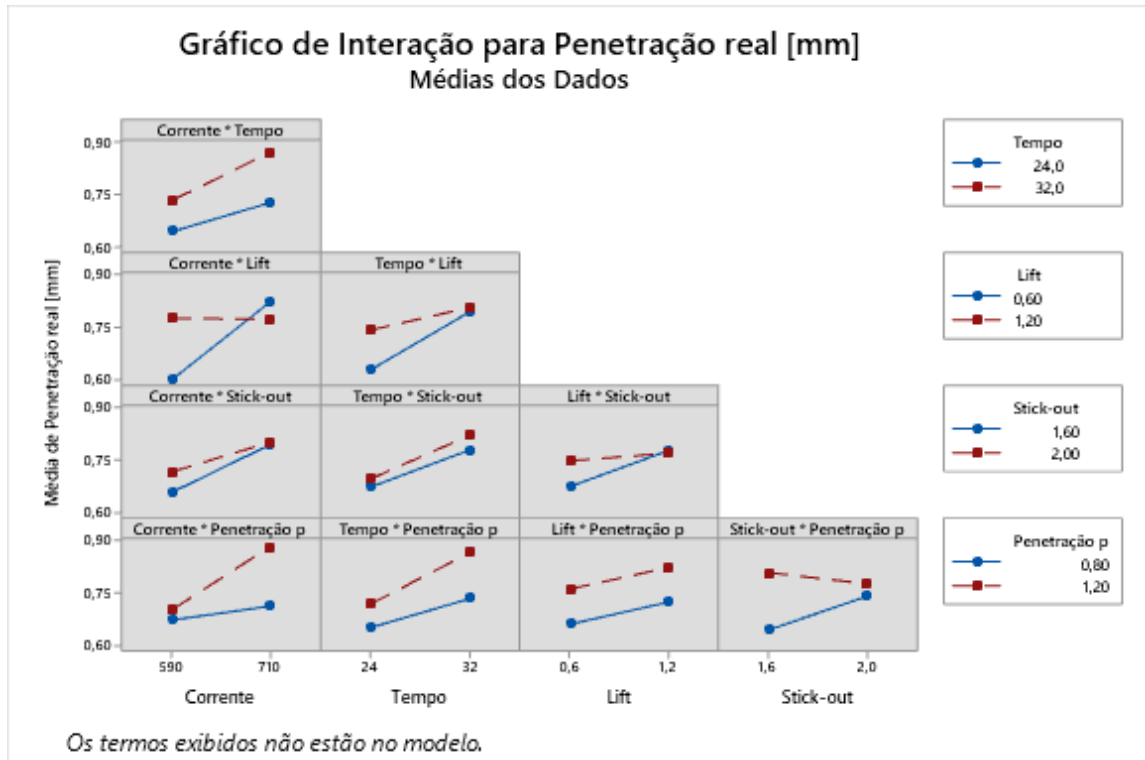


Figura 31: Gráfico de interação para Penetração de saída [mm].
Fonte: Autor (2022)

Com a avaliação dos gráficos de superfície foi possível identificar uma forte similaridade entre os perfis de respostas para força e penetração, quando plotados em relação aos dois parâmetros com maior relevância nos resultados (corrente e tempo). Dessa forma é possível assumir que quanto maior a penetração da solda na chapa base maior também será a sua força máxima de resistência ao arranchamento, sendo também válido o contrário.

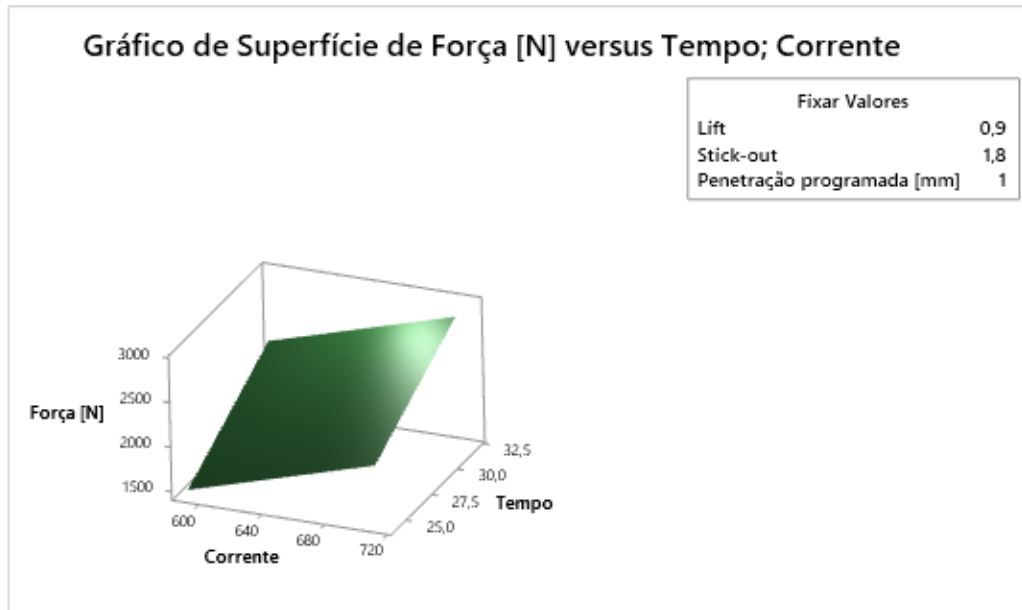


Figura 32: Superfície de resposta para Força máxima [N].
Fonte: Autor (2022).

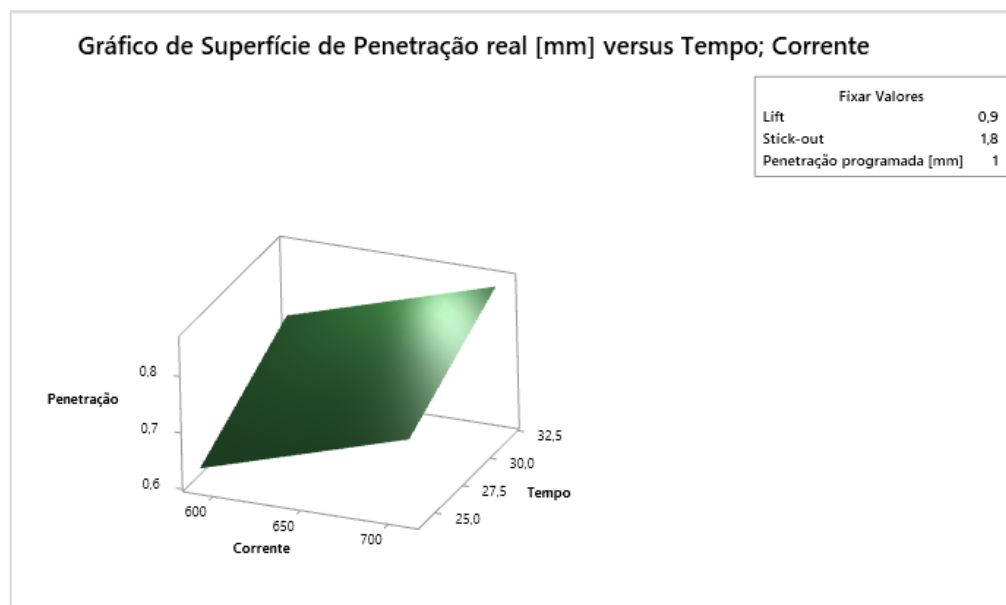


Figura 33: Superfície de resposta para Penetração de saída [mm].
Fonte: Autor (2022).

4.2.2 Otimização dos parâmetros

Visando alcançar a melhor combinação de parâmetros, que atenda o processo de soldagem, para o conjunto chapa base e prisioneiro apresentados no estudo, foi realizada a otimização dos parâmetros de soldagem. Essa foi obtida através de modelagem matemática do Response Optimizer contido no programa Minitab.

Para a otimização foi adicionado como objetivo a maximização da força, visando obter o maior valor possível dentro das condições definidas, e a penetração com valor alvo de 0,9 mm, de acordo com os melhores resultados de solda obtidos no experimento. Sendo assim temos 3 respostas de otimização apresentadas na Figura 34 e Figura 35.

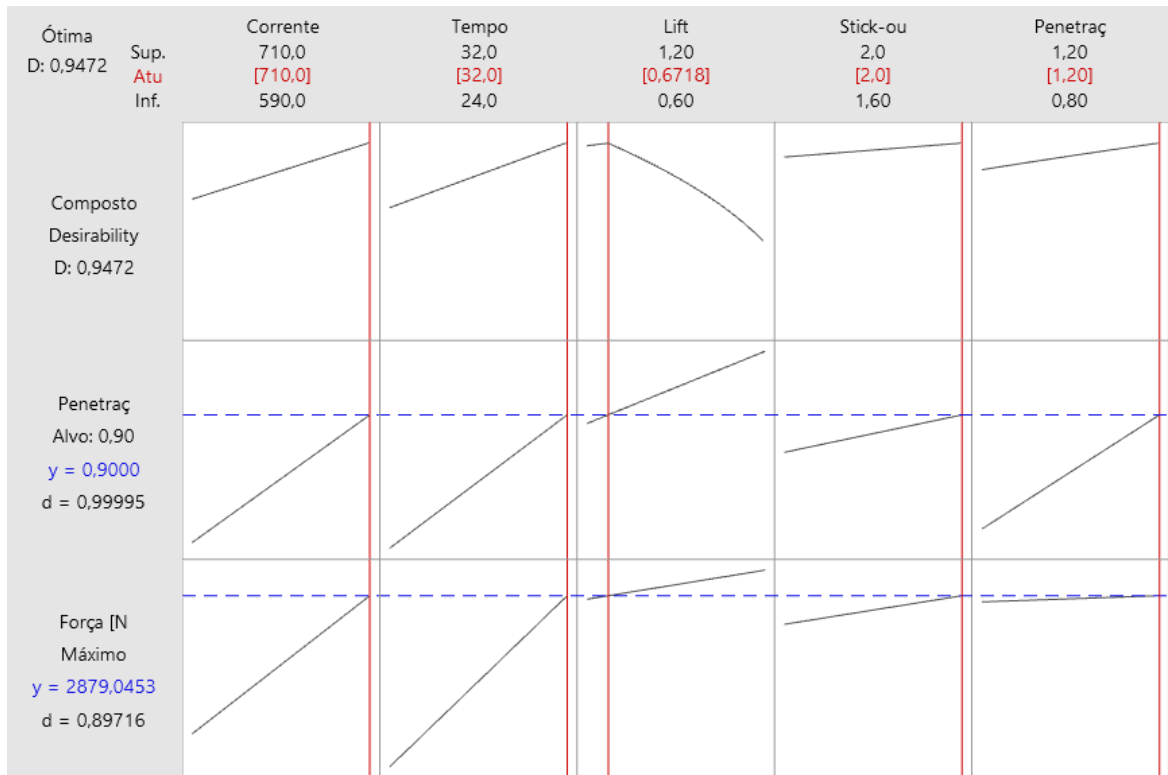


Figura 34: Otimização dos parâmetros de solda, com alvo estabelecido para maximização da força e penetração igual a 0,9mm.

Fonte: Autor (2022)

No gráfico presente na Figura 34 é apresentado o resultado da otimização para o alvo definido e seus limites inferior e superior obtidos de forma automática. Também podemos avaliar que a resposta de combinação dos parâmetros obtida, possui uma função Desirability (D) próximo de 1 o que significa que a solução encontrada para o problema estudado é muito próxima do caso ideal (KOMAKI; MALAKOOTI, 2016).

| Soluções | | | | | | | |
|-----------------------|----------|---------|---------|-----------|----------------------------|-----------------------------|------------------|
| Solução | Corrente | Tempo | Lift | Stick-out | Penetração programada [mm] | Penetração real [mm] Ajuste | Força [N] Ajuste |
| 1 | 710,000 | 32,0000 | 0,67179 | 2,00000 | 1,20000 | 0,899979 | 2879,05 |
| 2 | 692,116 | 30,7637 | 1,14824 | 1,98230 | 1,14453 | 0,900000 | 2763,75 |
| 3 | 702,877 | 31,5184 | 1,17793 | 1,60000 | 1,17557 | 0,900592 | 2777,43 |
| Desirability Composta | | | | | | | |
| Solução | | | | | | | |
| 1 | 0,947157 | | | | | | |
| 2 | 0,918419 | | | | | | |
| 3 | 0,917972 | | | | | | |

Figura 35: Apresentação das soluções com as configurações ótimas para a solda estudada, propostas a partir da otimização dos parâmetros pelo programa Minitab. Fonte: Autor (2022).

Na Figura 35 são apresentados os valores de configurações ótimas, propostas pela otimização realizada no programa Minitab, para a soldagem dos materiais (chapa e pino) que foram abordados no projeto de experimentos. A solução apresenta todas as variáveis otimizadas simultaneamente.

4.3 EXPERIMENTO DE VALIDAÇÃO DAS RESPOSTAS DE OTIMIZAÇÃO

A fim de validar os parâmetros obtidos através da otimização foi realizado um novo experimento, igual ao anterior, utilizando as três respostas obtidas. Cada resposta obtida pela otimização foi repetida três vezes, visando a repetitividade dos resultados para cada combinação de parâmetros testados.

Nesse experimento de validação foram soldados 9 corpos de prova, sendo três corpos de prova para cada resposta de otimização obtida, conforme apresentado na Figura 36 e Tabela 4.



Figura 36: Corpos de prova utilizados para o experimento de validação.
Fonte: Autor (2022)

Tabela 4: Parâmetros utilizados para soldagem dos corpos de prova do experimento de validação.

| RESULTADOS DA OTIMIZAÇÃO | CORRENTE | TEMPO | LIFT | STICK OUT | PENETRAÇÃO ENTRADA |
|--------------------------|----------|-------|------|-----------|--------------------|
| 1.1 | 710 | 32 | 0,7 | 2 | 1,2 |
| 1.2 | 710 | 32 | 0,7 | 2 | 1,2 |
| 1.3 | 710 | 32 | 0,7 | 2 | 1,2 |
| 2.1 | 690 | 30 | 1,2 | 2 | 1,2 |
| 2.2 | 690 | 30 | 1,2 | 2 | 1,2 |
| 2.3 | 690 | 30 | 1,2 | 2 | 1,2 |
| 3.1 | 700 | 31 | 1,2 | 1,6 | 1,2 |
| 3.2 | 700 | 31 | 1,2 | 1,6 | 1,2 |
| 3.3 | 700 | 31 | 1,2 | 1,6 | 1,2 |

Fonte: Autor (2022)

A Tabela 4 apresenta a configuração dos experimentos para validação da otimização dos parâmetros. Nela estão apresentados a combinação dos parâmetros que foram adquiridos a partir das soluções ótimas encontradas da Figura 35. Dessa forma foram realizadas as soldagens dos corpos de prova seguindo a mesma configuração conforme exposto na Figura 36.

4.4 RESULTADOS DO EXPERIMENTO DE VALIDAÇÃO

A partir dos resultados experimentais obtidos, podemos observar que as soluções propostas pela otimização dos parâmetros de soldagem, cumprem os objetivos de penetração (0,9 mm) e maximização da força que foram definidos como alvo para otimização dos parâmetros.

Na Figura 37 é possível ver que, os dados obtidos para penetração ficaram todos próximos de 0,9 mm e de força acima de 2000 N. Os resultados visuais expostos na Figura 38 confirmam que não houve nenhum rompimento de prisioneiro (ruptura entre a chapa e o pino). Dessa forma foi possível validar as soluções obtidas pela otimização.

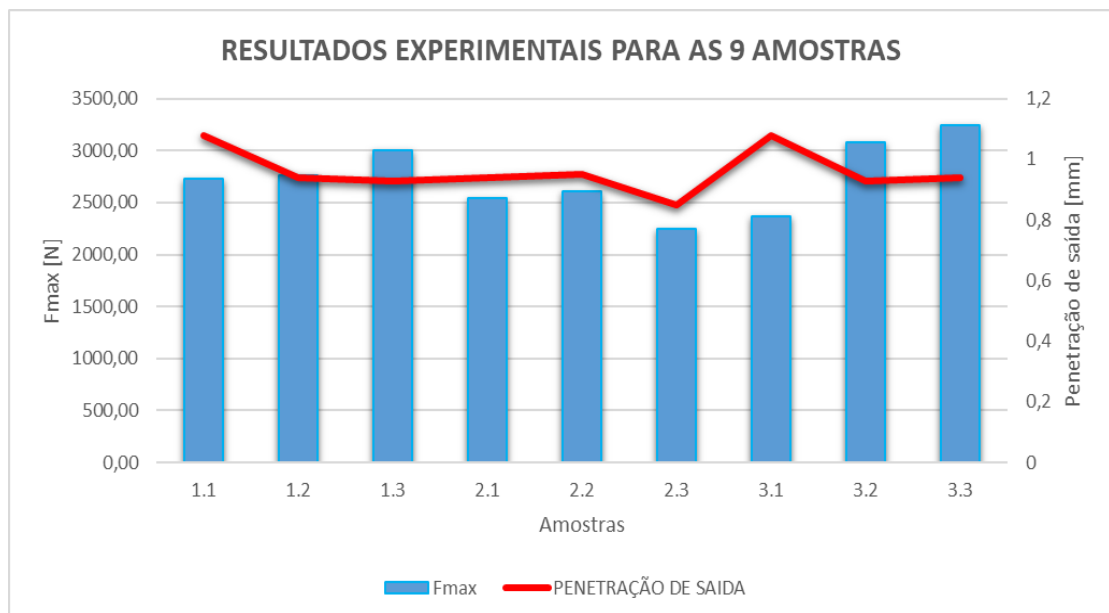


Figura 37: Resultados experimentais para força máxima resistida a tração e penetração de solda, para as respostas de otimização dos parâmetros de solda.
Fonte: Autor (2022).

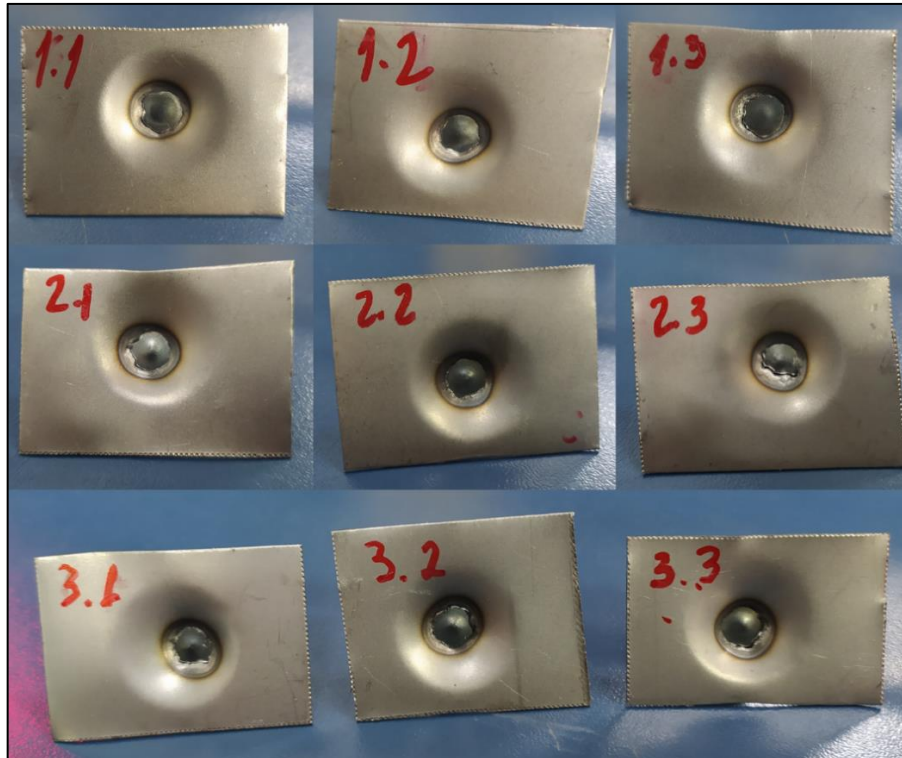


Figura 38: Resultados visuais dos corpos de prova, utilizados nos testes de tração para as três soluções obtidas a partir da otimização dos parâmetros de solda.
Fonte: Autor (2022).

A Figura 38 apresenta o resultado visual dos testes de tração realizados nos corpos de prova soldados com os parâmetros adquiridos através da otimização. É possível ver que não houve nenhum corpo de prova onde a união entre pino e chapa tenham se rompido. Sendo assim, os parâmetros testados se mostram eficientes para a união dos materiais utilizados no processo de montagem dos veículos.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 CONCLUSÃO

No trabalho foi abordado o processo de soldagem de prisioneiros e os principais defeitos gerados no processo. Através da análise do gráfico de Pareto, foi possível identificar o principal defeito que geram os retrabalhos na fábrica, e assim qual contribui de forma significativa para o aumento dos custos com retrabalhos.

A fim de obter maior confiabilidade na solda dos prisioneiros, soldados nas carrocerias, foi elaborado o estudo dos parâmetros de soldagem para adequar a

condição de chapa e pino que se encontram no processo. Como os prisioneiros são componentes de grande importância na montagem dos componentes do veículo, veio a preocupação em melhorar a qualidade da solda e por consequência diminuir os retrabalhos relacionados a esse item.

Realizou-se o estudo do processo utilizando ferramentas da qualidade como base para definição, análise e classificação dos potenciais causas dos problemas na soldagem dos prisioneiros. Dessa forma foram utilizadas as ferramentas Ishikawa para a análise das causas e Matriz de causa e efeito para a classificação de maior relevância das causas. Desse modo, foi possível entender quais causas seriam mais importantes trabalhar durante o estudo.

No estudo foram definidas cinco variáveis (corrente, tempo, *lift*, penetração e *stick-out*) que havia a possibilidade de interferência na soldagem dos pinos. Para cada uma das variáveis foi escolhido dois níveis (baixo e alto), de modo a entender como cada uma interfere no resultado da solda. Dessa forma, foi utilizado a ferramenta DOE e os conceitos do método Plackett e Bruman, para definir as combinações de fatores e níveis utilizados no experimento.

A partir dos resultados obtidos de penetração e força foi possível identificar as diferenças entre as combinações dos fatores e níveis, e entender melhor como esses interferem no resultado da solda. Também foi possível a partir da utilização do programa Minitab identificar as variáveis mais relevantes no processo e qual a interação entre elas.

Os dados de penetração e solda, obtidos para cada corpo de prova soldado, foram utilizados para realizar a otimização dos parâmetros. Essa foi executada com a utilização do Response Optimizer, o qual se encontra no programa Minitab. O alvo definido para as respostas otimizadas foi a maximização da força resistida e uma penetração de 0,9 mm.

As três respostas de otimização obtidas no estudo foram imputadas na máquina de soldagem e assim foram soldados novos corpos de prova. Para cada resposta foram elaborados três corpos de prova para contemplar possíveis variações no processo de soldagem manual. A partir desse novo experimento foi possível validar as respostas de otimização obtidas pelo programa.

O segundo experimento mostrou que o alvo definido para a otimização dos parâmetros foi alcançado. Também apresentou, que as combinações de parâmetros

obtidas atendem os objetivos do projeto, que é a melhoria da qualidade da solda e a entrega de maior resistência da união soldada entre a chapa base e o pino.

5.2 TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros podem ser estudados os parâmetros de solda para outros tipos de prisioneiros, utilizados em carrocerias monobloco, como os pinos de aterramento.

REFERÊNCIAS

ASM INTERNACIONAL. Welding, Brazing, and Soldering. vol. 6, 1993.

AWS. Structural Welding Code: Steel. Welding Handbook. ed. 23, 2015.

CDA. High Conductivity Coppers: for electrical engineering. 1998. Disponível em: <<https://cupdf.com/document/high-conductivity-coppers-for-electrical-engineering.html?page=2>>. Acesso em: 29 de março de 2022.

CHAMBERS, H. A. Principles and practices of stud welding. PCI Journal, p. 46-58, 2001. Disponível em: <<https://weldlx.com/pdf/3.pdf>>. Acesso em: 29 de março de 2022.

DALE, B. G. Managing Quality. ed. 4, Hong Kong: Blackwell Publishers Ltd, 2002.

DAHLGAARD, J. J.; KRISTENSEN, K.; KANJI, G. K. Fundamentals of Total Quality Management: Process analysis and improvement. Londres: Taylor & Francis e-Library, 2007.

EMHART TEKNOLOGIES TUCKER. Assembly Instructions Stud Welding Head LM 310. 2010. Disponível em: <<http://www.emhart.eu/wAssets/Downloads/Documents/Manuals/SWS/MTA-LM310-02-en.pdf>>. Acesso em: 29 de março de 2022.

HAMZA, R. M. A. Optimized Stud Arc Welding Process Control Factors by Taguchi Experimental Design Technique. London: IntechOpen, 2012. Disponível em: <<https://www.intechopen.com/chapters/40993>>. Acesso em: 29 de março de 2022.

HARIDAS, Afiq Das Bin Mohd Harith; ASARI, Rashidi. **Drawn Arc Stud Welding: Process Parameters Analysis & Simulation Development.** researchgate. n, 2020. 16p. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/349238319>>. Acesso em: 21 nov. 2022.

JUNIOR, L. G.; TREMONTI, M. A. Soldagem de pinos e suas aplicações específicas. In: Casa do Trabalhador São Paulo, 2015. Disponível em: <<https://saopauloct.blogspot.com/2015/04/soldagem-de-pinos-e-suas-aplicacoes.html>>. Acesso em: 29 de março de 2022.

KOMAKI, Mohammad; MALAKOOTI, Behnam. **Composite Desirability Function (CDF) Approach for Evolutionary Algorithm Parameter Tuning.** International Conference on Industrial Engineering and Operations Management Detroit. Michigan, USA, 2016. Disponível em: <<http://ieomsociety.org/ieomdetroit/pdfs/283.pdf>>. Acesso em: 4 fev. 2023.

MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V. Soldagem I: Introdução aos processos de soldagem. Universidade Federal de Minas Gerais, 2000. Disponível em: <<https://asmtreinamentos.com.br/downloads/soldador/arquivo84.pdf>>. Acesso em: 29 de março de 2022.

NELSON, T. Máquina de solda de parafuso prisioneiro. 1944. Disponível em: <<https://asmtreinamentos.com.br/downloads/soldador/arquivo84.pdf>>. Acesso em: 29 de março de 2022.

NETO, B. de B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria, Campinas, SP: Editora da Unicamp, 2001.

TWE. SC1650: Stud Welding System Operations Manual. 2013. Disponível em: <<https://truweldstudwelding.com/wp-content/uploads/2016/04/sc1650-manual.pdf>>. Acesso em: 29 de março de 2022.

STANLEY. Treinamento de solda TUCKER. 2018. 57 slides.

VILLANI, P. Soldagem: Fundamentos e Tecnologia. Barueri: Grupo GEN, 2016.

DALE, B. G. Managing quality. 5th ed; New York: Willey India, 2007.)

I. SAMARDŽIĆ et al.: THE INFLUENCE OF WELDING PARAMETERS ON WELD CHARACTERISTICS IN ELECTRIC ARC STUD WELDING. METABK, Slavonski Brod, Croatia, v. 3, n. 48, p. 181-185, 2009. Faculty of Mechanical Engineering, University of Osijek.

EMHART TECHNOLOGIES TUCKER. Instruções de serviço pistola de soldadura PLM200/00.01/6.14. 2009.. Manual de informações técnicas do produto.

MINITAB, LLC. **Gráficos de efeitos para Análise de experimento fatorial**. Suporte ao Minitab® 20. 2021. Disponível em: <<https://support.minitab.com/pt-br/minitab/20/help-and-how-to/statistical-modeling/doe/how-to/factorial/analyze-factorial-design/interpret-the-results/all-statistics-and-graphs/effects-plots/>>. Acesso em: 18 out. 2022.