

FAACZ – FACULDADES INTEGRADAS DE ARACRUZ
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ANDERSON SPERANDIO SILVA
LUAN CABIDELLI DOS SANTOS

**APLICAÇÃO DA METODOLOGIA SEIS SIGMA NO ESTUDO DA RESISTÊNCIA
MECÂNICA DA SOLDA NA CARÇAÇA DE MOTORES ELÉTRICOS**

ARACRUZ
2017

**ANDERSON SPERANDIO SILVA
LUAN CABIDELLI DOS SANTOS**

**APLICAÇÃO DA METODOLOGIA SEIS SIGMA NO ESTUDO DA RESISTÊNCIA
MECÂNICA DA SOLDA NA CARCAÇA DE MOTORES ELÉTRICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdades Integradas de Aracruz, como requisito parcial para obtenção do título de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Anderson Fanchiotti Silva

ARACRUZ

2017

**ANDERSON SPERANDIO SILVA
LUAN CABIDELLI DOS SANTOS**

**APLICAÇÃO DA METODOLOGIA SEIS SIGMA NO ESTUDO DA RESISTÊNCIA
MECÂNICA DA SOLDA NA CARÇAÇA DE MOTORES ELÉTRICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdades Integradas de Aracruz, como requisito parcial para obtenção do título de Graduação em Engenharia Mecânica.

Aprovado em 12 de dezembro de 2017.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Esp. Anderson Fanchiotti da Silva
Faculdades Integradas de Aracruz
Orientador

Prof. Me. João Paulo Calixto da Silva
Faculdades Integradas de Aracruz

Prof. Me. Josimar Antônio Cusini Grippa
Instituto Federal do Espírito Santo

DECLARAÇÃO DO AUTOR

Declaro, para fins de pesquisa acadêmica, didática e técnico-científica, que este Trabalho de Conclusão de Curso pode ser parcialmente utilizado, desde que se faça referência à fonte e aos autores.

Aracruz, 12 de dezembro de 2017.

Anderson Sperandio Silva

Luan Cabidelli dos Santos

AGRADECIMENTOS

Agradecemos, primeiramente, a Deus, que nos deu sabedoria e empenho para concluir todo esse trabalho.

À família por todo apoio, paciência e incentivo durante todos os anos que estivemos na faculdade.

A todos os professores do curso de Engenharia Mecânica por todo ensinamento e paciência ao longo do curso.

Aos colegas pelo grande companheirismo e amizade durante os longos anos de graduação.

Aos amigos e amigas que nunca deixaram de nos apoiar.

*“Tudo tem seu tempo determinado, e há tempo
para todo o propósito debaixo do céu.”*

(Eclesiastes 3:1)

RESUMO

O presente trabalho descreve um estudo de caso realizado em uma empresa de motores elétricos. O estudo foi realizado através de uma parceria do Departamento de Controle de Qualidade e o Departamento de Estamparia da empresa de Motores Elétricos Ltda, envolvendo a utilização da metodologia Seis Sigma para a redução de defeitos na solda em carcaças de motores elétricos. Analisando os indicadores de qualidade, identificou-se que o número de peças com defeitos de solda no início do projeto foi de 67 carcaças em média no primeiro trimestre de 2016. Esse número indicou o defeito na solda das carcaças como o maior causador de refugos no Departamento de Estamparia naquela época, mostrando-se necessário um estudo mais aprofundado para identificação da causa raiz e a redução do número de peças defeituosas. Desta forma, foram elaborados experimentos planejados baseados no ciclo DMAIC da metodologia Seis Sigma, onde foram utilizadas diversas combinações dos parâmetros que configuram o processo de solda dos componentes da carcaça, na máquina de solda por resistência elétrica. Assim, as peças geradas nos experimentos foram submetidas a ensaios de tração para avaliação da força média de tração em que cada configuração de parâmetro da máquina de solda determinou para a carcaça. Os parâmetros mais influentes foram identificados como Potência de Solda, 1ª Compressão e Alinhamento do Eletrodo Superior, através da análise estatística dos resultados dos experimentos.

Palavras-chave: Seis sigma, soldagem por resistência elétrica.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Interações entre fenômenos elétrico, térmico, metalúrgico e mecânicos .	18
Figura 2 – Esquema do processo de soldagem por projeção	20
Figura 3 – Lóbulo de soldabilidade, diagrama generalizado da janela de fusão da soldagem por resistência elétrica	23
Figura 4 – Representação do ciclo de soldagem	24
Figura 5 – O ciclo de hipótese e análise da causa raiz	30
Figura 6 – Planejamento Fatorial Completo de 2 níveis	33
Figura 7 – Estratégia de amostragem (DOE I)	37
Figura 8 – Estratégia de amostragem (DOE II)	38
Figura 9 – Vista geral dispositivo com carcaça	39
Figura 10 – Carcaça e dispositivos acoplados à máquina	40
Figura 11 – Software “JMP”	41
Figura 12 – Estratégia de amostragem (Validação)	42
Figura 13 – Diagrama de causa e efeito	43
Figura 14 – Mapa de processo	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Descrição geral (DOE I)	36
Tabela 2 – Descrição geral (DOE II)	38
Tabela 3 – Descrição geral (validação)	42
Tabela 4 – Descrição da Estratégia de amostragem (DOE I)	45
Tabela 5 – Descrição da Estratégia de amostragem (DOE II)	50
Tabela 6 – Comparação condição anterior e ajustada	56

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Variação da força de tração (DOE I).....	46
Gráfico 2 – Influência dos parâmetros selecionados no processo em análise (DOE I)	47
Gráfico 3 – Gráfico de variabilidade dos parâmetros selecionados (DOE I)	48
Gráfico 4 – Estudo de variabilidade do parâmetro A isoladamente (DOE I).....	49
Gráfico 5 – Estudo de variabilidade do parâmetro B isoladamente (DOE I)	50
Gráfico 6 – Variação da força de tração (DOE II).....	52
Gráfico 7 – Influência dos parâmetros selecionados no processo em análise (DOE II)	53
Gráfico 8 – Gráfico de variabilidade dos parâmetros selecionados (DOE II).....	54
Gráfico 9 – Estudo de variabilidade do parâmetro C isoladamente (DOE II)	55
Gráfico 10 – Estudo de variabilidade do parâmetro A isoladamente (DOE II).....	56
Gráfico 11 – Variação da força de tração (validação)	57
Gráfico 12 – Evolução dos defeitos testes e ensaios soldagem.....	57

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

DOE – Desing of Experiments.

DMAIC – Definir, Medir, Analisar, Melhorar, Controlar.

DFSS – Design For Six Sigma.

CPK – Capability Process Kategori

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVOS.....	16
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1	SOLDAGEM	17
2.1.1	Soldagem por resistência elétrica	17
2.1.1.1	Princípio de operação do processo de solda por resistência elétrica ...	18
2.1.1.2	Soldagem por resistência elétrica por projeção	19
2.1.1.3	Vantagens e desvantagens da solda por resistência elétrica por projeção	20
2.1.1.4	Parâmetros que influenciam a solda por resistência elétrica	21
2.1.1.4.1	Força do eletrodo.....	22
2.1.1.4.2	Corrente de soldagem	22
2.1.1.4.3	Soldabilidade	23
2.1.1.4.4	Tempo de soldagem	24
2.1.1.4.5	Tempo de compressão	24
2.1.1.4.6	Tempo de subida de corrente de soldagem	25
2.1.1.4.7	Tempo de descida da corrente de soldagem.....	25
2.1.1.4.8	Tempo de pós-pressão	25
2.1.1.4.9	Tempo de pausa.....	26
2.1.1.5	Qualidade da soldagem por resistência elétrica	26
2.2	ENSAIO DE TRAÇÃO	26
2.3	METODOLOGIA SEIS SIGMA	27
2.3.1	As fases DMAIC	29
2.3.1.1	A fase “Definir”	29
2.3.1.2	A fase “Medir”	29
2.3.1.3	A fase “Analisar”	29
2.3.1.4	A fase “Melhorar”	30
2.3.1.5	A fase “Controlar”	31
2.3.2	DOE (Design of Experiments – Planejamento de Experimentos) ..	31
2.3.2.1	Planejamento fatorial completo.....	32

3	METODOLOGIA	34
3.1	<i>BRAINSTORMING</i> E DIAGRAMA DE CAUSA E EFEITO	35
3.2	MAPA DE RACIOCÍNIO	35
3.3	MAPA DE PROCESSO	35
3.4	AJUSTE DA COMBINAÇÃO DE PARÂMETROS DESEJADA DOE I..	36
3.5	EXECUÇÃO DA SEQUÊNCIA DE DISPAROS PARA CADA COMBINAÇÃO DE PARÂMETROS DE CONTROLE DOE I.....	36
3.6	AJUSTE DA COMBINAÇÃO DE PARÂMETROS DESEJADA DOE II	37
3.7	EXECUÇÃO DA SEQUÊNCIA DE DISPAROS PARA CADA COMBINAÇÃO DE PARÂMETROS DE CONTROLE DOE II.....	38
3.8	ENSAIO DE TRAÇÃO	39
3.9	ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	40
3.10	VALIDAÇÃO DOS DADOS.....	41
3.11	RESULTADO NO INDICADOR DE REFUGO	42
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	43
4.1	DIAGRAMA DE CAUSA E EFEITO	43
4.2	MAPA DE PROCESSO	43
4.3	ANÁLISE DOE I.....	44
4.3.1	Análise prática (DOE I)	46
4.3.2	Análise quantitativa (DOE I)	46
4.3.2	Análise gráfica (DOE I)	47
4.4	ANÁLISE DOE II.....	50
4.4.1	Análise prática (DOE II)	51
4.4.2	Análise quantitativa (DOE II)	52
4.4.3	Análise gráfica (DOE II)	53
4.5	VALIDAÇÃO	56
4.6	INDICADOR DE REFUGO	57
5	CONCLUSÕES	58
6	SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	59
7	REFERÊNCIAS	60
	ANEXOS	63
	ANEXO A – Mapa de raciocínio.....	63

1. INTRODUÇÃO

Um dos programas utilizados para reduzir de maneira contínua a variabilidade nos processos de produção, de maneira a eliminar os defeitos ou falhas nos produtos e serviços é a metodologia Seis Sigma: uma prática de gestão, que visa melhorar a rentabilidade das empresas, aumentar a participação de mercado, diminuir custos e otimizar as operações. A aplicação desse programa acontece com o auxílio de várias ferramentas para a identificação, análise e solução dos problemas, com acentuado embasamento na coleta e tratamento de dados, e com suporte estatístico. (ANDRIETTA e MIGUEL, 2006).

Alguns benefícios comprovados da aplicação da metodologia Seis Sigma podem estar em indicadores de custo e qualidade. Segundo Santos (2016), durante estudo de caso com a metodologia para análise de retrabalho em juntas soldadas, tem-se como resultado a redução de 76% do índice de retrabalho em relação ao nível inicial, e uma economia média mensal do custo da não qualidade superior a R\$ 58.000,00, demonstrando a eficácia da aplicação da metodologia Seis Sigma.

Com esse contexto de redução de variabilidade de processos, redução de defeitos, aumento da produtividade e de lucratividade, desenvolve-se o tema central deste trabalho, que trata da aplicação da metodologia Seis Sigma para a redução de defeitos na solda em carcaças de motores elétricos.

O índice dos defeitos na solda de carcaças é um indicador interno da Fábrica de Motores Elétricos, e é controlado pelo número de peças refugadas com falhas no ato da preparação da máquina de solda por resistência elétrica, onde há a ruptura do ponto de solda através do ensaio de tração dos componentes soldados. Para que a solda da carcaça seja aprovada, os pontos de solda dos componentes da carcaça não podem romper durante o ensaio de tração, ou seja, a ruptura deve ocorrer no próprio material dos componentes, fora do ponto de solda. Quando há uma peça refugada na preparação da máquina, é necessário um ajuste dos parâmetros do processo de fabricação, para que seja fabricada outra peça para realização novamente do ensaio de tração, até que

se consiga uma carcaça sem ruptura do ponto de solda, liberando assim o processo de fabricação da Ordem de Produção do material.

Esses dados são compilados mensalmente, e através do Controle de Qualidade da empresa, geram os indicadores de defeitos do Departamento de Estamparia. No primeiro trimestre de 2016 o indicador apontava uma média de 67 peças defeituosas por mês, geradas por defeitos de solda na carcaça.

Tendo em vista reduzir o índice de refugo e retrabalho no processo de soldagem da carcaça de motores elétricos, o presente trabalho propõe realizar, por meio da metodologia Seis Sigma e teste de tração, um estudo detalhado dos fatores que afetam a resistência mecânica da solda e identificar a causa raiz dentre estes fatores.

1.1. OBJETIVO

Analisar a causa do alto índice de refugo ocorrido no processo da soldagem da carcaça de motores elétricos através da metodologia Seis Sigma.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar a causa raiz da falha através do modelo DMAIC (definir, medir, analisar, melhorar e controlar);
- Estudar a influência dos parâmetros que configuram o processo de soldagem da carcaça de motores elétricos;
- Propor novas configurações no processo produtivo.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. SOLDAGEM

A soldagem é o mais importante processo industrial de fabricação de peças metálicas. Processos de soldagem e processos afins são também utilizados na recuperação de peças desgastadas, para a aplicação de revestimentos de características especiais sobre superfícies metálicas e para corte (MONDENESI et. al, 1996).

O sucesso da soldagem está associado a diversos fatores e, em particular, com a sua relativa simplicidade operacional. Por outro lado, apesar desta simplicidade, não se pode esquecer que a soldagem pode ser muitas vezes um processo “traumático” para o material, envolvendo, em geral, a aplicação de uma elevada densidade de energia em um pequeno volume do material, o que pode levar a importantes alterações estruturais e de propriedades dentro e próximo da região da solda (MONDENESI et. al, 1996).

Vale destacar que na empresa de Motores Elétricos Ltda, durante o processo de produção da carcaça do motor elétrico, utiliza o processo de soldagem por resistência elétrica.

2.1.1. Soldagem por resistência elétrica

O processo de soldagem por resistência elétrica é utilizado há muitos anos como um dos principais processos para a união de peças metálicas, em vários setores industriais, com destaque para a indústria automotiva e aeroespacial (WU et. al 2008).

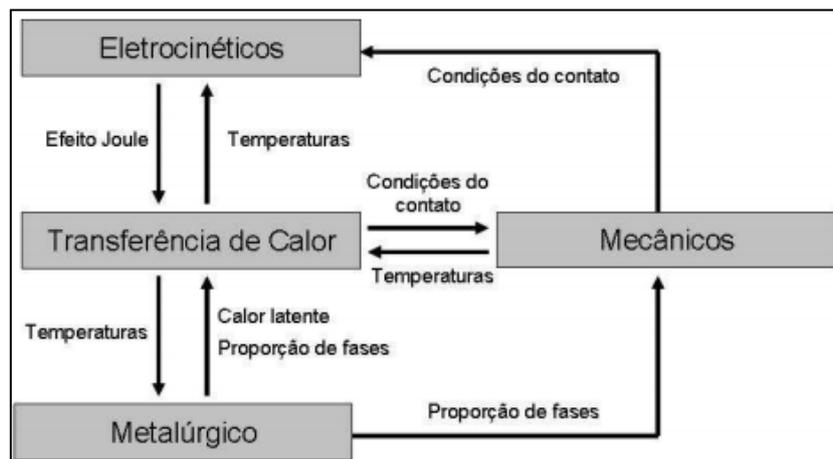
Segundo Maciel (2006) são diversas as vantagens na utilização do processo, tais como:

- Possui alta taxa de produção;

- Indicado para soldar chapas finas;
- Fácil operação;
- Apresenta excelente flexibilidade;
- Manutenção fácil e barata;
- Não necessita uso de consumíveis, como materiais de brasagem, ou eletrodos de solda.

Segundo Chang & Zhou (2003) e Rogeon et al (2008), a solda por resistência elétrica é um processo complexo, devido à combinação e interação de vários fenômenos (elétricos, térmicos, metalúrgicos e mecânicos) conforme mostrado na Figura 1:

Figura 1 – Interações entre fenômenos elétrico, térmico, metalúrgico e mecânicos



Fonte: Chang & Zhou (2003)

2.1.1.1. Princípio de operação do processo de solda por resistência elétrica

O nome de solda por resistência elétrica deriva do fato de que a resistência das peças a serem soldadas e dos eletrodos são combinados para gerarem calor em suas interfaces, podendo, portanto, ser definido como um processo de geração de calor. A corrente passa dos eletrodos para as peças a serem soldadas devido ao efeito Joule, permitindo a geração de calor. O cálculo do

calor gerado é bastante simples (conforme Equação 1) e a quantidade de calor gerada depende principalmente de três fatores MACIEL (2011):

- Corrente de solda (I);
- Resistência elétrica do conjunto (R);
- Duração da corrente (t).

A fórmula geral é dada pela Lei de Joule:

$$Q = I^2 * R * t \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

I é dado em Ampere;

R é dado em Ohms e;

t em milissegundos.

O fluxo de corrente deve permanecer até que as superfícies desenvolvam calor suficiente para atingirem o ponto de fusão. No momento em que a interface superfície/superfície atinge o ponto de fusão dos materiais, a poça de fusão (lentilha de solda) começa a se formar e crescer, quando o fluxo de corrente é interrompido, a poça de solda se solidifica e une as superfícies das peças MACIEL (2011).

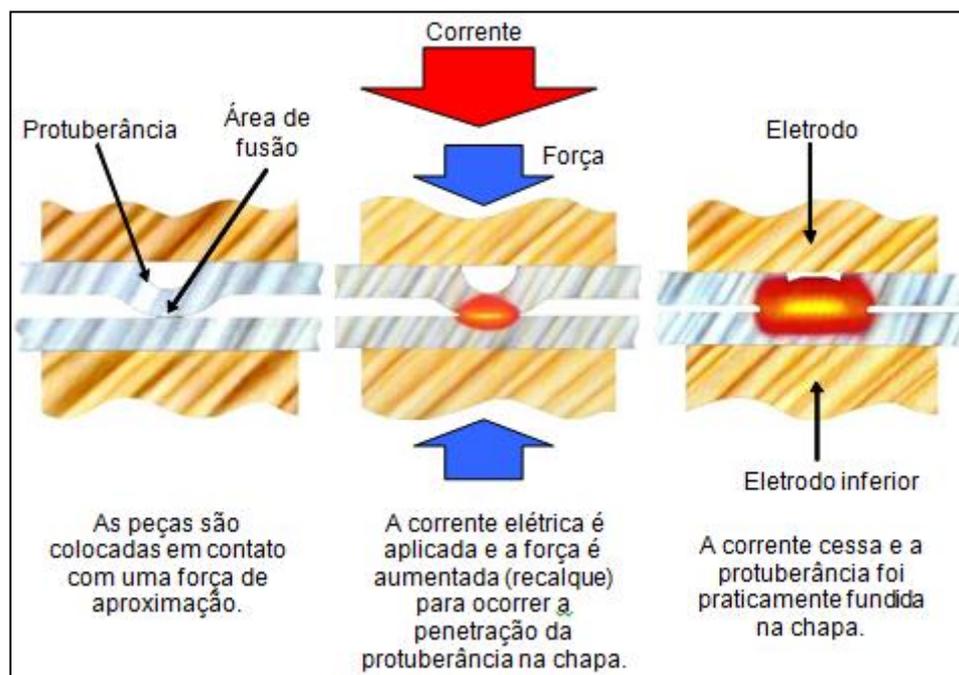
Na empresa de Motores Elétricos Ltda, durante o processo de produção da carcaça de motores elétricos, os componentes da carcaça são unidos através do processo de soldagem por resistência elétrica por projeção. Desta forma, observa-se a importância de dissertar-se a respeito do princípio, características, fatores de influência, vantagens e desvantagens, dentre outros fatores deste processo.

2.1.1.2. Soldagem por resistência elétrica por projeção

Nessa variação executa-se a soldagem de peças com protuberâncias em chapas, popularmente chamadas de soldagem por projeção, conforme Figura

2. Utiliza-se quando as espessuras dos materiais são muito diferentes, quando uma das partes possui forma específica, ou pela necessidade de precisão de posicionamento da peça em relação à outra. Uma das peças possui saliência no material, determinando a quantidade de massa que será fundida (BATISTA, 2011).

Figura 2 – Esquema do processo de soldagem por projeção



Fonte: Batista (2011)

2.1.1.3. Vantagens e desvantagens da solda por resistência elétrica por projeção

Em geral, a solda por projeção pode ser usada nas mesmas aplicações da solda por ponto para unir pequenas peças entre si e a peças maiores. A seleção de um método sobre o outro depende de fatores econômicos, vantagens e limitações dos dois processos. Dentre as principais vantagens da solda por projeção estão (COLOMBARI, 2004):

- Um número de soldas pode ser feito simultaneamente em apenas um ciclo de soldagem da máquina;
- Menor sobreposição e diminuição do espaço entre as soldas;

- Amplitude de espessuras de no mínimo 6 para 1 são possíveis, em virtude da flexibilidade de tamanho e posição das projeções;
- As soldas por projeção podem ser posicionadas com maior precisão e consistência em relação a solda por ponto, e as soldas são geralmente mais consistentes em virtude da uniformidade das projeções;
- A solda por projeção geralmente tem uma melhor aparência, no lado oposto à projeção, em relação ao acabamento da solda por ponto;
- São usados eletrodos maiores e de face plana; conseqüentemente, o manuseio do eletrodo é menor do que o necessário para a solda por ponto, reduzindo os custos de manutenção;
- Óleo, impurezas e proteções superficiais causam menos problemas do que na solda por ponto, porque a ponta das projeções tende a retirar os materiais estranhos no início do ciclo de soldagem.
- As maiores limitações da soldagem por projeção são (COLOMBARI, 2004):
 - A confecção das projeções geralmente exige uma operação adicional;
 - Para múltiplas soldas, controles precisos da altura das projeções e o alinhamento preciso das ferramentas de soldagem são necessários para a força nos eletrodos e a corrente de soldagem;
 - Para chapas de aço, o processo é limitado a espessuras onde as características aceitáveis das projeções podem ser formadas, necessitando também de equipamentos específicos;
 - Múltiplas soldas podem ser feitas simultaneamente, o que requer equipamentos com maiores capacidades do que os usados na solda por ponto. Isso também limita o tamanho do componente que contém as projeções.

2.1.1.4. Parâmetros que influenciam a solda por resistência elétrica

Os parâmetros de soldagem são condições onde um determinado valor e a adequada combinação entre eles resultam na formação do ponto de solda. Os

valores corretos destes parâmetros são responsáveis pela boa ou má qualidade da solda (PENTEADO, 2011).

Com a evolução da eletrônica, os fabricantes de equipamento de soldagem incorporaram diversos parâmetros programáveis nos controladores dos equipamentos de soldagem por resistência, tornando a programação mais flexível e, consecutivamente, promovendo maior robustez no processo de soldagem (PAES et al., 1989).

2.1.1.4.1. Força do eletrodo

É a força encarregada de unir as peças de trabalho, exercendo pressão antes, durante e depois do fornecimento de corrente. Tal força é responsável por forjar os metais quando eles se encontram no estado plástico. Este parâmetro pode ser subdividido em: pré-pressão (compressão ou aperto), pressão de soldagem e pós-pressão (retenção) (VARGAS, 2006).

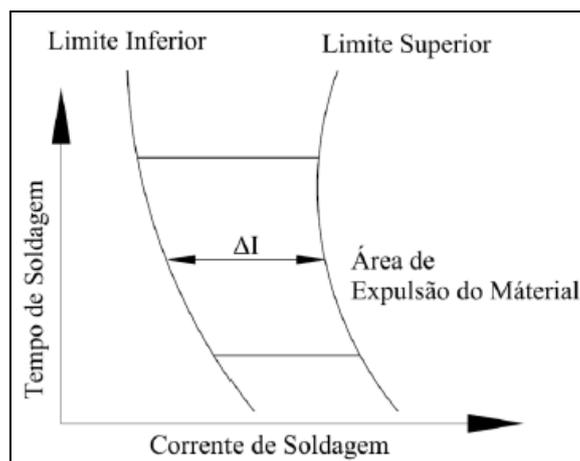
A força de pré-pressão é responsável por pressionar as chapas de modo que ocorra um bom assentamento para evitar problemas de expulsão de metal fundido da zona soldada. (ASLANLAR, 2006).

2.1.1.4.2. Corrente de soldagem

A fonte de potência dos equipamentos de soldagem por resistência é encontrada em duas formas, ou seja, com saídas de corrente alternada ou saídas de corrente contínua, em ambas as fontes de potência existem controladores de intensidade de energia que, por intermédio dos parâmetros de soldagem, controlam a densidade de corrente que será fornecida durante o tempo de soldagem (PINHEIRO, 2011).

A Figura 3 ilustra o diagrama do lóbulo de soldabilidade de uma peça genérica, a janela compreendida entre as linhas do lóbulo, identificada como ΔI , indica a região onde as soldas são aceitáveis (PINHEIRO, 2011).

Figura 3 – Lóbulo de soldabilidade, diagrama generalizado da janela de fusão da soldagem por resistência elétrica



Fonte: AWS (1998)

2.1.1.4.3. Soldabilidade

A American Welding Society (AWS) define soldabilidade como “a capacidade de um material ser soldado nas condições de fabricação impostas por uma estrutura específica projetada de forma adequada e de se comportar adequadamente em serviço” (MODENESI, 2011).

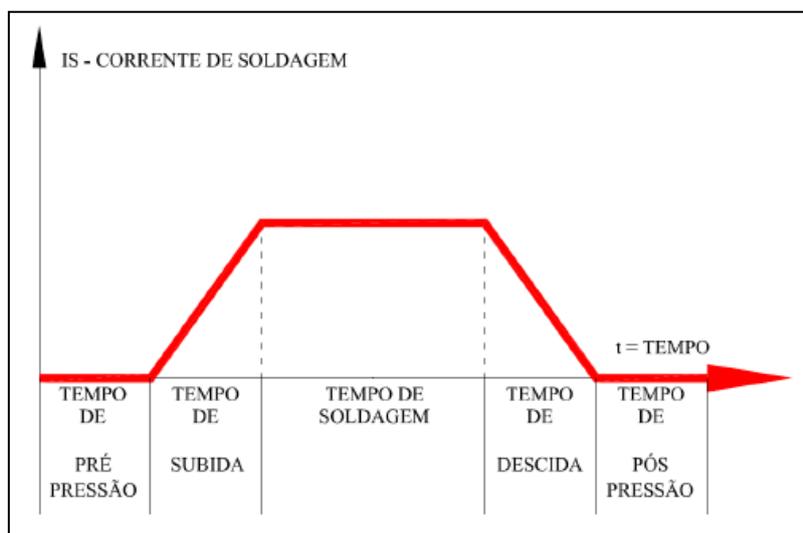
A maioria das ligas metálicas são soldáveis, mas, certamente, algumas são muito mais difíceis de serem soldadas por um dado processo que outras. Por outro lado, o desempenho esperado para uma junta soldada depende fundamentalmente da aplicação a que está se destina. Assim, para determinar a soldabilidade de um material, é fundamental considerar o processo e procedimento de soldagem e a sua aplicação (MODENESI, 2011).

2.1.1.4.4. Tempo de soldagem

Considera-se como tempo de soldagem o tempo em ciclos em que o sistema libera o fornecimento da corrente de soldagem para a realização do ponto de solda. Basicamente o tempo de soldagem orienta-se principalmente na espessura da chapa, tanto mais grossa a chapa, mais tempo deverá ter a soldagem (AWS, 1998).

Dentro deste tempo estão contidos outros parâmetros de soldagem denominados de tempo de subida de soldagem, tempo de descida de soldagem e corrente de soldagem, vide Figura 4. A relação entre o tempo de soldagem e a corrente de soldagem é inversamente proporcional (FARIA, 2003).

Figura 4 – Representação do ciclo de soldagem



Fonte: Faria (2004)

2.1.1.4.5. Tempo de compressão

Considera-se como tempo de compressão o tempo em ciclos entre a aplicação inicial da força do eletrodo, que ocorre logo após a partida do equipamento, até o início da aplicação da corrente de soldagem. Por sua vez o tempo de

compressão se divide em duas etapas, tempo de acostamento e tempo de pré-pressão. Nesse caso o tempo de acostamento é o tempo que os eletrodos demoram desde a sua posição inicial, afastado das chapas, até entrar em contato com a peça. Finalmente o tempo de pré-pressão é o tempo que o eletrodo demora depois de entrar em contato com a peça para atingir a força de compressão necessária para realizar a soldagem.

2.1.1.4.6. Tempo de subida da corrente de soldagem

O tempo de subida de soldagem tem a função de prover um incremento gradual e linear na corrente de soldagem, sendo o mesmo programado em ciclos e contido dentro do tempo de soldagem. Tempos elevados deste parâmetro além de não contribuir para o incremento da qualidade do ponto de solda, pode comprometer a produtividade devido ao excessivo tempo do ciclo de soldagem (ASM, 1993; AWS, 1998).

2.1.1.4.7. Tempo de descida da corrente de soldagem

O tempo de descida da corrente de soldagem é um parâmetro analogamente inverso ao tempo de subida da corrente de soldagem e também está contido dentro do tempo de soldagem é programado em ciclos. Este tempo tem a função de realizar uma diminuição gradual e linear da intensidade da corrente no tempo final da soldagem (AWS, 1998).

2.1.1.4.8. Tempo de pós-pressão

Segundo Branco (2004) e Vargas (2006), considera-se como tempo de pós-pressão, o tempo em que os eletrodos permanecem fechados exercendo uma pressão entre as chapas logo após a finalização da corrente de soldagem. O

tempo de pós-pressão permite que o ponto de solda solidifique antes que os eletrodos sejam removidos.

2.1.1.4.9. Tempo de pausa

Etapa posterior ao tempo de pós-pressão, é o tempo que inicia no encerramento da pós-pressão, e vai até o início do próximo ciclo de soldagem. Este parâmetro de soldagem não tem influência direta na qualidade do ponto de solda e esta normalmente relacionada com a distância física entre os pontos de solda e a velocidade de deslocamento da peça ou do equipamento de soldagem (NAKANO, 2005).

2.1.1.5. Qualidade da soldagem por resistência elétrica

A soldagem por resistência elétrica pode ter sua qualidade avaliada através de ensaios não destrutivos e destrutivos (DARWISH e AL-DEKHAL, 1999; VARGAS, 2006).

Os ensaios não destrutivos normalmente não são utilizados na inspeção deste processo (DARWISH e AL-DEKHAL, 1999).

2.2. ENSAIO DE TRAÇÃO

Este ensaio pode ser classificado ou não como destrutivo, podendo ser realizados em corpos de prova de chapas idênticas as utilizadas no processo, ou pode ser realizado com a própria peça que está sendo produzida, o que no caso vem a caracterizá-lo como destrutivo. É realizado com uma amostragem reduzida estatisticamente aprovada pela engenharia. Este ensaio é normalizado pela “Deutscher Verband für Schweißen” DVS 2904 (PINHEIRO, 2011).

A peça é colocada em um equipamento que fará um movimento de tração forçando a junção da solda, o equipamento tem um dinamômetro que mede a força que está sendo aplicada. Para o ponto ser previamente aprovado deve ocorrer o destacamento das chapas, mas não do ponto de solda, o resultado da intensidade de força aplicada e o diâmetro do ponto de solda destacado da peça no ensaio irão validar a qualidade do ponto de solda (SANTOS, 2006).

Segundo Santos (2006) o ensaio de tração é o mais tradicional, e ainda encontra muitos adeptos em função da precisão e da certeza que traz o seu resultado. Por esse motivo, este ensaio é considerado definitivo e tem prioridade de validade sobre os demais ensaios praticados.

Como resultado da aplicação da metodologia Seis Sigma, tem-se Santos (2016) que realizou estudo para redução de retrabalhos em juntas soldadas com economia média mensal superior a R\$ 58.000,00.

2.3. METODOLOGIA SEIS SIGMA

Seis Sigma é considerado a metodologia da qualidade para se reduzir de maneira contínua a variabilidade dos processos de produção, de forma a eliminar os defeitos ou falhas nos produtos e serviços. Várias empresas têm conquistado resultados financeiros importantes com a sua utilização.

O Seis sigma surgiu com a Motorola em 1987, com o objetivo de melhorar a qualidade de seus produtos, aumentar a margem de lucro e se tornar mais competitiva no mercado. Em 1988, a Motorola recebeu o prêmio *Malcolm Baldrige* de Qualidade e a introdução do programa Seis Sigma passou a ser reconhecida como responsável pelo sucesso alcançado pela organização. Logo em seguida, empresas como a AlliedSignal, Kodak, Sony e General Eletric passaram a adotar o programa, e a divulgação dos ganhos obtidos por essas empresas geraram crescente interesse pelo Seis Sigma.

Entretanto, o caso de maior sucesso na aplicação do Seis Sigma foi o da General Eletric, que adotou o programa em 1996 e, a partir de então, alcançou um considerável crescimento na margem de lucro operacional, registrando

depois de três anos uma economia de mais de U\$\$ 1,5 bilhões (BAÑUELAS; ANTONY, 2002).

Segundo Pande et al. (2001), Seis Sigma é definido como um sistema abrangente e flexível para alcançar, sustentar e maximizar o sucesso empresarial, onde é singularmente impulsionado por uma estreita compreensão das necessidades dos clientes, pelo uso disciplinado de fatos, dados e análise estatística e a atenção diligente à gestão, melhoria e reinvenção dos processos de negócios. Esta definição fornece a base de todos os esforços para se descerrar o potencial do Seis Sigma para uma organização. Os tipos de sucesso empresarial são proporcionais aos inúmeros benefícios comprovados que se pode alcançar com o Seis Sigma, tais como:

- Redução de custos;
- Melhoria de produtividade;
- Crescimento da fatia de mercado;
- Retenção de clientes;
- Redução de tempo de ciclo;
- Redução de defeitos;
- Mudança cultural;
- Desenvolvimento de produto/serviço.

Segundo Pande et al. (2001) o Seis Sigma conta com duas metodologias de máxima eficiência que são: Design For Six Sigma (DFSS), que é utilizado quando se precisa desenvolver um produto ou processo novo ou adaptar um produto que foi fabricado em outro país para as necessidades do novo mercado; a segunda metodologia é a Define, Measure, Analyse, Improve, Control (DMAIC), que está dividida em cinco fases ou estágios básicos para se obter o desempenho Seis Sigma em um processo, divisão ou empresa. Essas cinco fases são conhecidas como: Define (Definir), Measure (Medir), Analyse (Analisar), Improve (Melhorar) e Control (Controlar).

Esse método DMAIC passou a ser a base da filosofia Seis Sigma para as empresas, sendo fundamental para o seu sucesso (ROTONDARO et al., 2002). A metodologia Seis Sigma utilizada na empresa de Motores Elétricos Ltda é a DMAIC.

2.3.1. As fases DMAIC

2.3.1.1. A fase “Definir”

Na exposição de Rotondaro et al. (2002), a primeira fase é atribuída à chamada “Seleção de Projetos”, na qual consiste em definir claramente qual o efeito indesejável de um processo que deve ser eliminado ou melhorado, desde que haja uma relação clara com um requisito especificado do cliente e que um projeto seja economicamente vantajoso.

2.3.1.2. A fase “Medir”

Nesta fase tem-se o objetivo de se saber como o processo é medido e qual é sua respectiva performance. O tempo de projeto Seis Sigma procura identificar os processos internos principais que influenciam as características críticas para a qualidade e medem os defeitos atualmente gerados, relativos a estes processos (HENDERSON e EVANS, 2000).

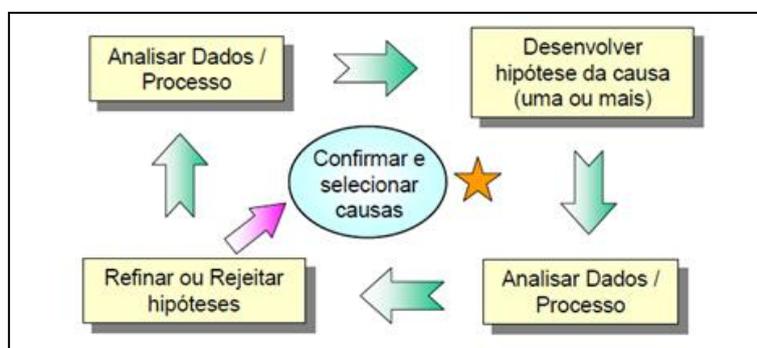
2.3.1.3. A fase “Analisar”

Nesta fase tem-se o objetivo de se identificar a lacuna existente entre as performances do processo atual e do processo desejado, priorizando problemas e identificando as causas desses problemas (PORTER, 2000).

Pande et al. (2001) considera esta fase como sendo a mais imprevisível do DMAIC, pois ele afirma que não existe certeza absoluta de uma causa raiz. As ferramentas que se devem usar e a maneira de como aplicá-las vão depender muito do problema a ser estudado, bem como do processo envolvido. Ele ainda apresenta a fase ANALISAR como um ciclo aplicado na melhoria de processo. O ciclo é impulsionado através da geração e da avaliação de hipóteses (ou

estimativas) quanto à causa do problema. Pode-se entrar num ciclo ou no ponto (a) examinando-se o processo e os dados para se identificar causas possíveis; ou no ponto (b) onde se começa com a suspeita de uma causa e procura confirmá-la ou rejeitá-la através de uma análise, conforme mostrado na Figura 5. Quando se encontra uma hipótese que não seja correta, pode-se ter que voltar ao início do ciclo para se obter uma explicação completamente diferente. Mas, mesmo as causas incorretas, na verdade, são oportunidades para refinar e estreitar a explicação do problema.

Figura 5 – O ciclo de hipótese e análise da causa raiz



Fonte: Pande et al (2001)

2.3.1.4. A fase “Melhorar”

Conforme Henderson e Evans (2000), esta fase é baseada em como se remover as causas dos erros e/ou defeitos do processo. A equipe de projeto Seis Sigma consolida as variáveis essenciais e quantifica seus efeitos sobre as características críticas para a qualidade. São também identificados os limites máximos aceitáveis para essas as variáveis essenciais, bem como a validação de um sistema de medição de desvios para as variáveis. A equipe modifica então o processo para que este possa apresentar uma performance quanto à variabilidade dentro dos limites aceitáveis.

Com uma definição mais branda e simplificada, Porter (2000) define esta fase como sendo uma etapa que envolve a geração de soluções de melhoria e

resolução de problemas para que sejam alcançados os requisitos financeiros e outros objetivos de performance.

2.3.1.5. A fase “Controlar”

Henderson e Evans (2000) definem esta fase através de uma simples pergunta: “Como nós podemos manter as melhorias?”. Para tanto ele alega que ferramentas de auxílio devem ser colocadas em prática para se assegurar que as variáveis principais dos processos modificados permaneçam dentro das faixas aceitáveis definidas por todo tempo.

A fase DMAIC se faz presente em toda elaboração do DOE, desde as fases de planejamento, coleta e análise de dados, até a fase aplicação dos resultados obtidos.

2.3.2. DOE (Design of Experiments - Planejamento de Experimentos)

A aplicação do programa Seis Sigma acontece com o auxílio de várias ferramentas para a identificação, análise e solução dos problemas, com acentuado embasamento na coleta e tratamento de dados, e com suporte estatístico. (ANDRIETTA e MIGUEL, 2006).

Nesse sentido, uma alternativa que vem sendo utilizada por vários autores para investigação da influência dos parâmetros do processo de fabricação na resposta é a aplicação das técnicas de projeto e análise de experimentos conhecida como Design of Experiments (DOE). Esta técnica tem como objetivo principal verificar a influência dos principais parâmetros do processo de fabricação sobre a qualidade final do produto.

Um experimento planejado é um teste, ou série de testes, no qual são feitas mudanças propositalmente nas variáveis de entrada de um processo, de modo a podermos observar e identificar mudanças correspondentes na resposta. O

processo pode ser visualizado como uma combinação de máquinas, métodos e pessoas, que transforma um material de entrada em um produto MONTGOMERY (1991).

Segundo Paiva (2008), para realização de um experimento deve-se considerar três estratégias que podem ser adotadas de forma individual ou combinadas. São elas:

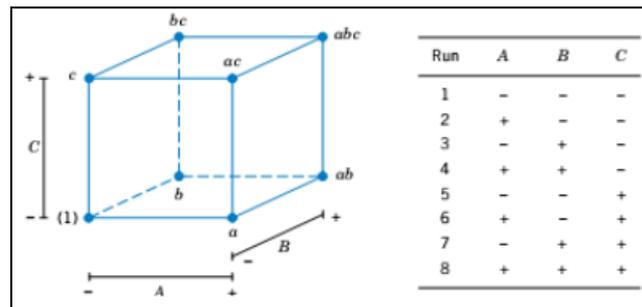
- Réplicas: consistem na repetição de um mesmo teste várias vezes, em unidades experimentais diferentes, criando-se uma variação para a variável de resposta que pode ser utilizada para se avaliar a significância estatística do incremento experimental;
- Aleatorização: ao se aleatorizar um experimento, aumenta-se sua validade, porque aumenta a chance dos efeitos desconhecidos serem distribuídos através dos níveis e fatores;
- Blocagem: quando não for possível manter a homogeneidade das condições experimentais, deve-se empregar a blocagem. Essa técnica permite avaliar se a falta de homogeneidade interfere nos resultados. Um bloco consiste de uma parte do experimento completo que se presume ser mais uniforme do que o todo.

2.3.2.1. Planejamento fatorial completo

A técnica de planejamento fatorial completo (2^k) consiste em um experimento com k fatores, sendo cada um deles composto por dois níveis. Neste tipo de experimento são realizados testes com todas as possíveis combinações dos níveis dos fatores. Após a realização dos testes são identificados os efeitos principais e de interação dos fatores, determinando as melhores condições experimentais do produto ou processo de fabricação (COLOMBARI, 2004).

Todas as variáveis são testadas em dois níveis (alto e baixo), sendo possíveis todas as combinações, conforme a Figura 6:

Figura 6 – Planejamento Fatorial Completo de 2 níveis



Fonte: Montgomery (2003)

Coleman & Montgomery (1993) propõem as seguintes etapas para o desenvolvimento de um Planejamento de Experimentos na Indústria:

- Caracterização do problema e definição dos objetivos do experimento;
- Escolha dos fatores de influência que devam variar, os seus intervalos sobre os quais esses fatores vão variar e os níveis específicos nos quais cada corrida será feita;
- Seleção das variáveis respostas devendo se certificar de que essas variáveis realmente vão fornecer informações úteis sobre o processo em estudo;
- Determinação de um modelo de planejamento de experimento, sendo que escolha desse modelo leva em consideração o tamanho da amostra (número de replicações), seleção de uma ordem adequada de rodadas para as tentativas experimentais;
- Condução do experimento, sendo extremamente importante monitorar o processo para que não haja erros e que tudo ocorra de acordo com o planejado;
- Análise dos dados por meio de ferramentas analíticas e estatísticas (descritivas e inferenciais) que poderão ser aplicadas utilizando-se pacotes estatísticos disponíveis no mercado;
- Conclusões e recomendações baseando-se nos resultados dos itens anteriores.

3. METODOLOGIA

Foi montado um grupo de trabalho formado por gerente de fábrica, chefe de produção, analista de engenharia da seção qualidade (autor 1), analista de engenharia da seção engenharia industrial (autor 2), técnicos do processo e preparadores, para contribuir no desenvolvimento inicial do projeto, visto que possuem alto conhecimento no processo produtivo.

Para que haja aplicabilidade com o modelo DMAIC às atividades desenvolvidas no decorrer do projeto foram realizadas na sequência abaixo, respeitando os estágios de: definição (D), coleta de dados (M), análise dos resultados (A), implantação de melhorias (I) e controle das atividades implantadas (C).

1. Realização de *Brainstorming* e elaboração de diagrama de causa e efeito – fase “D”;
2. Elaboração do Mapa de Raciocínio – fase “D”;
3. Elaboração do Mapa de Processo – fase “D”;
4. Ajuste da combinação de parâmetros desejada DOE I – fase “D”;
5. Execução da sequência de disparos para cada combinação de parâmetros de controle DOE I – fase “M”;
6. Ensaio de tração DOE I – fase “M”;
7. Análise dos resultados DOE I – fase “A”;
8. Novo ajuste da combinação de parâmetros desejada - Descartados os parâmetros que não foram significativos após análise do DOE I – fase “D”;
9. Execução da sequência de disparos para cada combinação de parâmetros de controle DOE II - Nova coleta de amostras – fase “M”;
10. Ensaio de tração DOE II – fase “M”;
11. Análise dos resultados DOE II - Identificados quais parâmetros são estatisticamente significativos – fase “A”;
12. Definido a configuração ideal de processo – fase “D”;
13. Execução da sequência de disparos para a condição ideal de operação – fase “M”;
14. Ensaio de tração da condição ideal de operação – fase “M”;

15. Análise e validação dos dados para a condição ideal de operação – fase “A” e fase “I”;
16. Resultado no indicador de refugo – fase “C”.

3.1. *BRAINSTORMING* E DIAGRAMA DE CAUSA E EFEITO

Na fase “definir” do DMAIC, utilizou-se do conhecimento das pessoas atuantes no processo (operadores, técnicos, analistas e chefes de produção) para elaboração do *Brainstorming*, executado através da participação dos envolvidos em reuniões que deram início ao projeto. As principais hipóteses levantados no *Brainstorming* foram utilizados para elaboração do diagrama de causa e efeito.

3.2. MAPA DE RACIOCÍNIO

Segundo Werkema (2017), o Mapa de Raciocínio (Anexo A) é uma documentação contínua da configuração de raciocínio durante a execução de um projeto Seis Sigma. Nesta etapa, ainda na fase “definir” do DMAIC, foi reunido em sala de reunião gestores da seção, técnicos, preparadores e operadores responsáveis pelo processo, que com o amplo conhecimento adquirido pela vivência diária no posto de trabalho, contribuiram na elaboração do mapa de raciocínio através dos seguintes pontos: auxiliando na elaboração das perguntas chave, instruindo à pesquisa no manual do equipamento e disponibilizando mão de obra capacitada para auxiliar na coleta de dados.

3.3. MAPA DE PROCESSO

Continuando na fase “definir” do DMAIC, um dos métodos utilizados para elaboração do mapa de processo é a filmagem do posto de trabalho, identificando as etapas, sub-etapas, entradas e saídas do processo produtivo e posteriormente estabelecê-lo e formato de fluxograma.

3.4. AJUSTE DA COMBINAÇÃO DE PARÂMETROS DESEJADA DOE I

Conforme Tabela 1, ainda na fase “definir” do DMAIC, após análise do mapa de processo, atrelado à definição de que as principais variáveis do processo são a corrente de soldagem, o tempo de soldagem, a pressão de soldagem e o eletrodo (INFOSOLDA, 2017) foi definido que os parâmetros potência de solda, 1ª compressão, 2ª compressão e tempo de solda podem ser os mais significativos para a ocorrência dos defeitos de soldagem da carcaça, e portanto, serão manipulados em seus níveis mínimo (-1) e máximo (1). Os níveis foram previamente definidos, após constatação em cartas de controle operacional que estes são os valores extremos já utilizados no processo produtivo.

Tabela 1 – Descrição geral (DOE I)

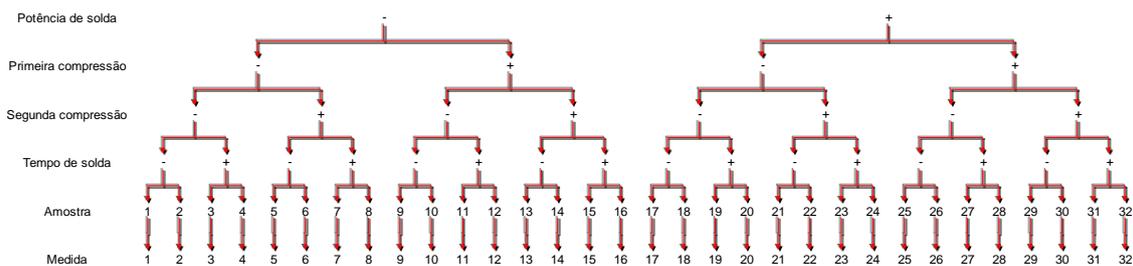
Fator	Nível mínimo (-1)	Nível máximo (1)
A – Potência de solda	55%	80%
B - 1ª Compressão	50%	80%
C - 2ª Compressão	70%	90%
D - Tempo de Solda	17%	25%

Fonte: o autor (2016)

3.5. EXECUÇÃO DA SEQUÊNCIA DE DISPAROS PARA CADA COMBINAÇÃO DE PARÂMETROS DE CONTROLE DOE I

A estratégia de amostragem I (Figura 7) gerada através do *excel* serve de orientação sobre como deve estar definido o parâmetro durante a coleta da amostra (condição mínima (-1) e/ou máxima (1)) e é, em poucas palavras, uma representação visual da execução do DOE I.

Figura 7 – Estratégia de amostragem (DOE I)



Fonte: o autor (2016)

3.6. AJUSTE DA COMBINAÇÃO DE PARÂMETROS DESEJADA DOE II

Tendo em vista os resultados obtidos no DOE I, se fez necessário retornar a fase “definir” do DMAIC, a fim de que houvesse novo planejamento para coleta de amostras (DOE II).

Conforme Tabela 2, foram acrescentados três novos parâmetros (C, D e E), previamente identificados por suas criticidades no mapa de processo. Para definição do nível mínimo (-1) dos eletrodos, utilizou-se eletrodos com alto volume de operação (4 semanas de utilização), em contra partida, no nível máximo (1), os testes foram realizados com eletrodos nunca utilizados. Quanto aos níveis de alinhamento do eletrodo superior, o nível mínimo (-1) foi definido através de desalinhamento operacional forçado, sendo possível verificar visualmente que apenas dois dos quatros eletrodos possuíam contato uniforme nos componentes (falha encontrada com frequência pelo departamento controle da qualidade), já o nível máximo (1) seguiu o caminho contrário, todos os quatros eletrodos foram cuidadosamente alinhados com os componentes. Mantiveram-se presente os parâmetros 1ª compressão (B) e potência de solda (A) estudados no DOE I, visto que estes parâmetros apresentaram grande relevância no estudo.

Tabela 2 – Descrição geral (DOE II)

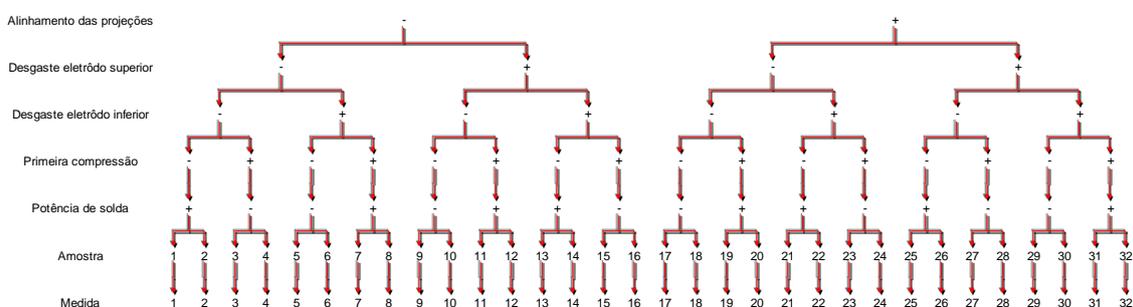
Parâmetro	Nível mínimo (-1)	Nível máximo (1)
C - Alinhamento do eletrodo superior	Desalinhado	Alinhado
D - Desgaste do eletrodo superior	Usado	Novo
E - Desgaste do eletrodo Inferior	Usado	Novo
B - 1ª Compressão	50%	80%
A - Potência da Solda	55%	80%

Fonte: o autor (2016)

3.7. EXECUÇÃO DA SEQUÊNCIA DE DISPAROS PARA CADA COMBINAÇÃO DE PARÂMETROS DE CONTROLE DOE II

Respeitando as etapas do DMAIC, novamente na fase “definir”, tem-se a estratégia de amostragem II (Figura 8), também gerada através do *excel*, servindo de orientação sobre como deve estar definido o parâmetro no instante que a amostra for coletada (condição mínima (-1) e/ou máxima (1)) e é, em poucas palavras, uma representação visual da execução do DOE II.

Figura 8 – Estratégia de amostragem (DOE II)



Fonte: o autor (2016)

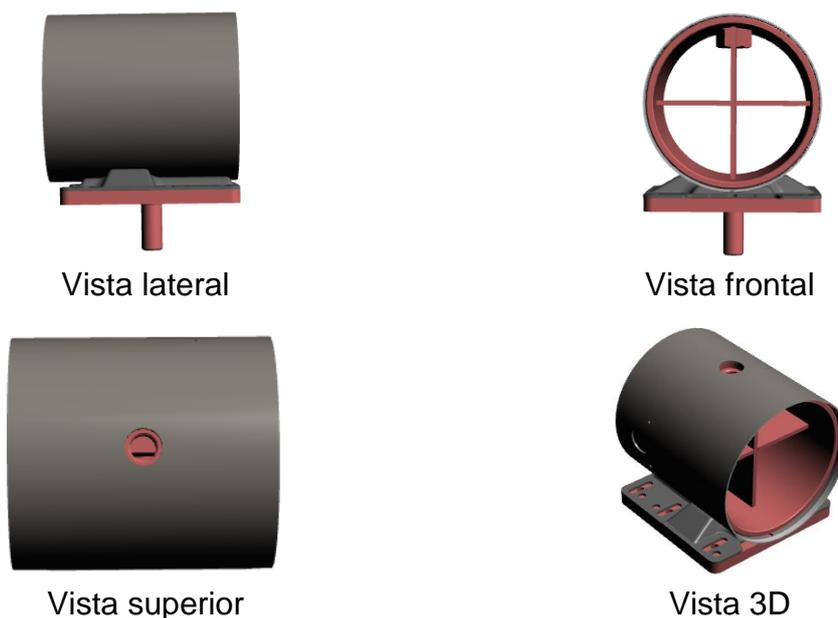
3.8. ENSAIO DE TRAÇÃO

Ainda na fase “medir” do DMAIC, optou-se por realizar o ensaio na máquina de tração Wolpert (modelo TUZ VM 12), no laboratório de pesquisa e desenvolvimento na sede da Empresa de Motores em Jaraguá do Sul – SC.

O acoplamento superior possui fixação direta no tubo da carcaça e o acoplamento inferior possui fixação apenas na base da carcaça, estando as fixações independentes. A base inferior se manteve estática e o braço superior avançava com velocidade de 10mm/min até o ruptura dos componentes da carcaça, operando segundo norma interna WPS-3475

Nas Figura 9 e 10 é possível observar o método de acoplamento da carcaça no dispositivo para realização do ensaio de tração.

Figura 9 – Vista geral dispositivo com carcaça



Fonte: o autor (2016)

Figura 10 – Carcaça e dispositivos acoplados à máquina



Fonte: o autor (2016)

3.9. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Para uma análise profunda do DOE I, DOE II e Validação, utilizar-se-á o software “JUMP” (JMP) (Figura 11), amplamente utilizado em aplicações como Seis Sigma, controle de qualidade de engenharia, dentre outros.

Na fase “analisar” do DMAIC, através do software JMP foi possível realizar as análises práticas, gráficas e quantitativa do experimento, identificando desta forma quais parâmetros do DOE I e DOE II são estatisticamente significativos para o problema estudado.

A análise prática se faz necessária para identificar se o experimento foi capaz de gerar variação e se há causa especial. Causa especial é caracterizada por

um ponto destoante dos demais, identificando que algo de anormal possa ter ocorrido durante os ensaios.

A análise gráfica tem como objetivo identificar visualmente a interação e variabilidade dos parâmetros em suas condições mínimas e máximas de operação, através dos gráficos *variability chart*.

A análise quantitativa permite calcular o efeito de cada parâmetro estudado, conforme equação 2.

A fórmula geral é dada por:

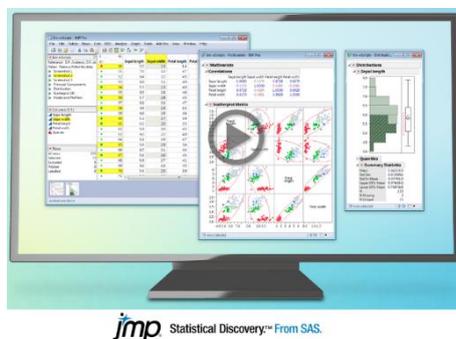
$$\mathcal{E} = \mathbb{M} - \mathbb{m} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

\mathbb{M} é média dos parâmetros na condição máxima (1);

\mathbb{m} é média dos parâmetros na condição mínima (-1).

Figura 11 – Software “JMP”



Fonte: <http://www.jmp.com> (Acesso em: 21/09/2016)

3.10. VALIDAÇÃO DOS DADOS

Para validação dos dados, na etapa “definir” do DMAIC, montou-se uma estratégia (Tabela 3) fixando os parâmetros potência de solda e 1ª compressão, no software da máquina, e garantiu o alinhamento do eletrodo superior, inspecionando com calibrador de folga. Estes foram os parâmetros escolhidos, visto que apresentam maior influência na força média de tração

segundo análise estatística no JMP das corridas experimentais (DOE I e DOE II).

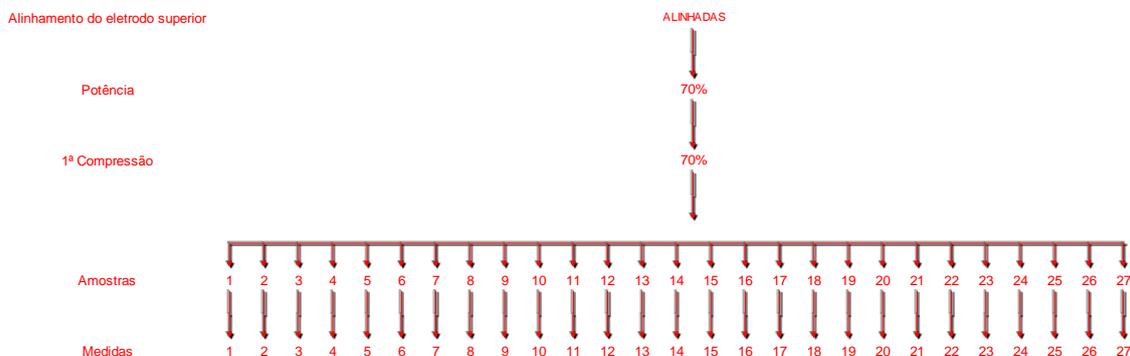
Tabela 3 – Descrição geral (validação)

Parâmetro	Nível fixado
C - Alinhamento do eletrodo superior	Alinhado
A - Potência da Solda	80%
B - 1ª Compressão	50%

Fonte: o autor (2016)

A estratégia de amostragem da validação (Figura 12), foi gerada através do *excel* para orientar na coleta das amostras no processo de fabricação. De qualquer maneira não houve complicações, uma vez que com os parâmetros definidos e fixados, bastou-se completar o ciclo continuamente coletando desde amostra 1 até a amostra 27.

Figura 12 – Estratégia de amostragem (Validação)



Fonte: o autor (2016)

3.11. RESULTADO NO INDICADOR DE REFUGO

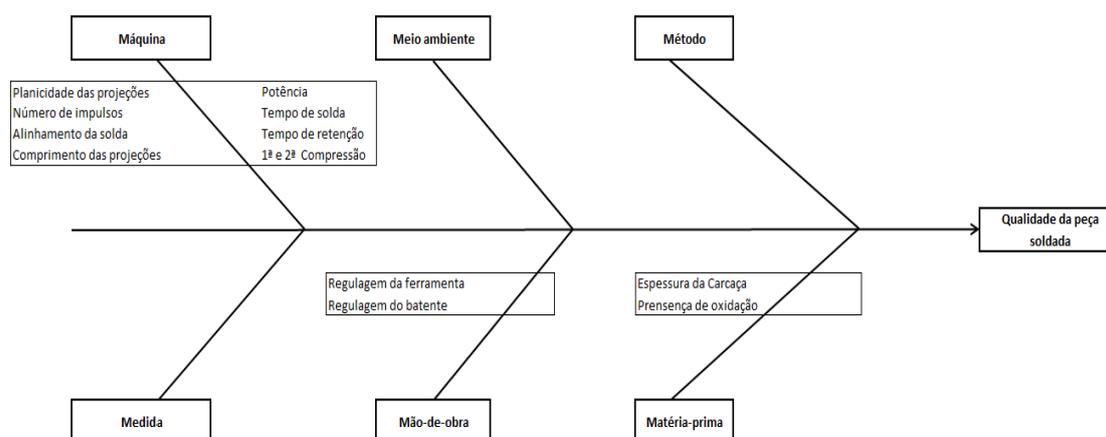
Nesta etapa será controlado o resultado das atividades implantadas, analisando o comportamento mensal de refugo de carcaças através dos indicadores de qualidade interno da seção.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. DIAGRAMA DE CAUSA E FEITO

As hipóteses levantadas no *Brainstorming* foram condensadas e utilizadas para elaboração do diagrama de causa e efeito, representado abaixo pela Figura 13.

Figura 13 – Diagrama de causa e efeito

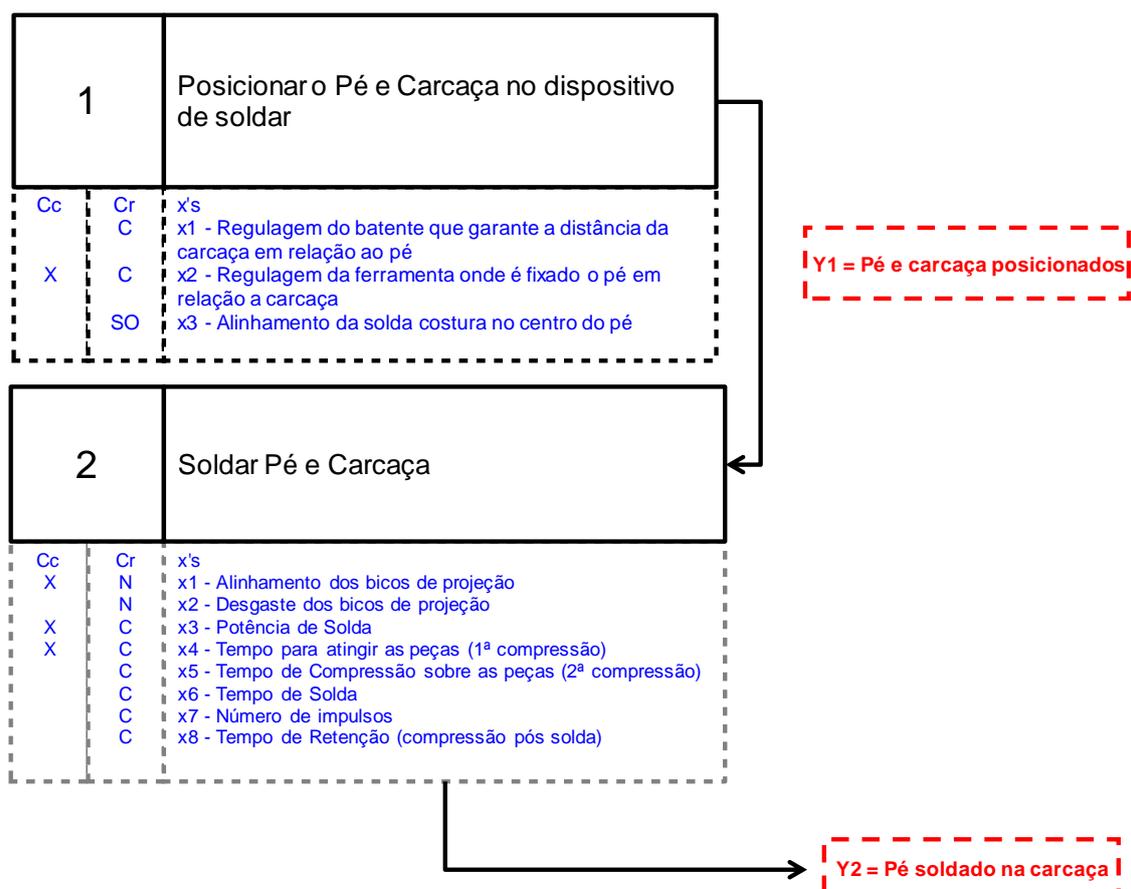


Fonte: o autor (2016)

4.2. MAPA DE PROCESSO

O mapa de processo foi elaborado através da filmagem do ciclo de produção no posto de trabalho e posteriormente estabelecido no formato da Figura 14 para melhor visualização da sequência de produção das carcaças soldadas, foram levantados os seguintes dados do processo: as entradas (X1, X2, ..., X8 – fatores de manipulação do operador), as saídas (Y1 e Y2 – resultado do conjunto de fatores realizados), as especificações de cada etapa (resultado do conjunto de fatores) e também o fluxo de cada processo (sequência de execução das etapas), além da definição do grau de criticidade (Cc) e método de controle operacional (Cr).

Figura 14 - Mapa de processo



Fonte: o autor (2016)

4.3. ANÁLISE DOE I

Respeitando a estratégia de amostragem I elaborada na fase “definir” do DMAIC, tem-se a Tabela 4 com as condições mínimas (-1) e máximas (1) dos parâmetros do DOE I, e o resultado da força de tração das amostras ensaiadas. Para iniciar a análise no JMP, se faz necessário organizar os dados desta maneira para inseri-los ao *software*.

Tabela 4 – Descrição da Estratégia de amostragem (DOE I)

Resposta					
Potência de Solda (A)	1ª Compressão (B)	2ª Compressão (C)	Tempo de Solda (D)	Amostra	Força de Tração (N)
-1	-1	-1	-1	1	29307
-1	-1	-1	-1	2	26631
-1	-1	-1	1	3	26105
-1	-1	-1	1	4	28386
-1	-1	1	-1	5	25885
-1	-1	1	-1	6	27684
-1	-1	1	1	7	28057
-1	-1	1	1	8	25644
-1	1	-1	-1	9	29746
-1	1	-1	-1	10	28869
-1	1	-1	1	11	23033
-1	1	-1	1	12	23209
-1	1	1	-1	13	21388
-1	1	1	-1	14	23165
-1	1	1	1	15	24854
-1	1	1	1	16	26346
1	-1	-1	-1	17	31172
1	-1	-1	-1	18	30821
1	-1	-1	1	19	31245
1	-1	-1	1	20	31413
1	-1	1	-1	21	27114
1	-1	1	-1	22	33563
1	-1	1	1	23	26785
1	-1	1	1	24	34727
1	1	-1	-1	25	30009
1	1	-1	-1	26	32027
1	1	-1	1	27	29965
1	1	-1	1	28	27377
1	1	1	-1	29	33651
1	1	1	-1	30	32576
1	1	1	1	31	38656
1	1	1	1	32	34792

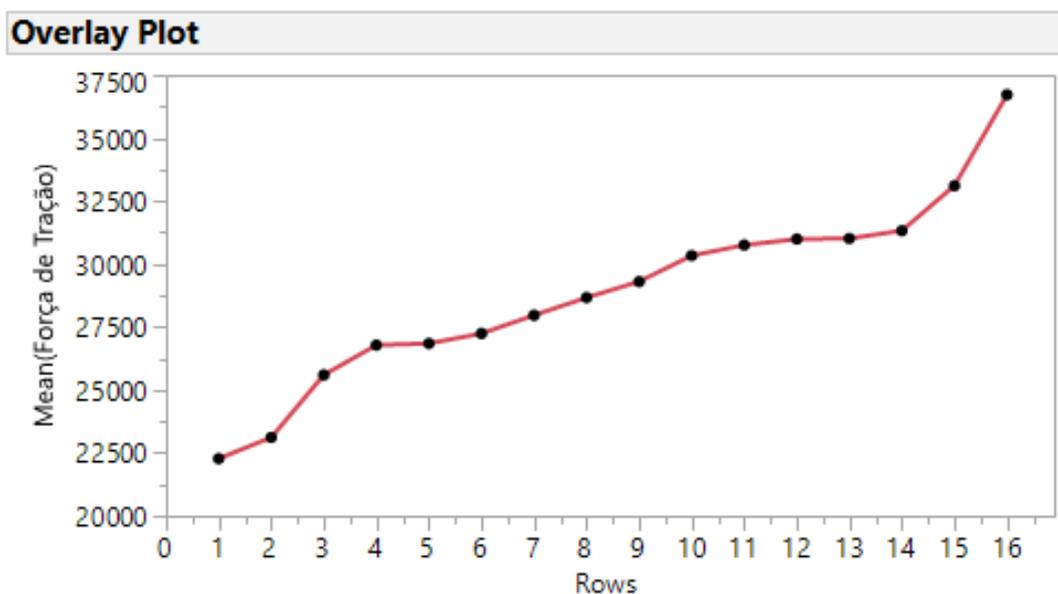
Fonte: o autor (2016)

As próximas etapas do estudo estão contempladas à fase “analisar” do DMAIC, utilizada nas análises prática, quantitativa e gráfica.

4.3.1. Análise prática (DOE I)

É possível observar no Gráfico 1 através da distribuição dos pontos médios de força de tração que não há causa especial (caracterizada por um ponto completamente destoante dos demais) e há uma variação considerável da força de tração nas amostras do processo em análise, o que permite observar que os parâmetros e níveis selecionados são relevantes para o estudo realizado, visto que foram capazes de gerar variação superior a 12000 N de força de tração entre a amostra de menor força e a de maior força, ou seja, o experimento conseguiu demonstrar que os parâmetros selecionados são influentes e válidos para o estudo.

Gráfico 1 – Variação da força de tração (DOE I)



Fonte: o autor (2016)

4.3.2. Análise quantitativa (DOE I)

O Gráfico 2, utilizado para calcular o efeito de cada parâmetro do experimento, dado pela equação 2, permite-se identificar os parâmetros de maior relevância para gerar variação de força média de tração em carcaças soldadas.

Ao analisar o Gráfico 2, observa-se que o parâmetro potência da solda (A) tem maior influência no que diz respeito a modificar a força média de tração, visto que estatisticamente foi o único parâmetro a ultrapassar os limites de controle estabelecidos pelo *software* estatístico, sendo assim, o parâmetro de maior importância para análise do processo. Durante a análise gráfica é possível observar o quanto de variação e força média de tração o parâmetro potência de solda (A) gera nos níveis mínimos (-1) e máximos (1).

Gráfico 2 – Influência dos parâmetros selecionados no processo em análise (DOE I)

Sorted Parameter Estimates					
Term	Estimate	Relative Std Error	Pseudo t-Ratio		Pseudo p-Value
A	2737	0,25	5,96		0,0019*
C*D	1021,375	0,25	2,23		0,0766
A*C	940,5625	0,25	2,05		0,0957
A*B	915,6875	0,25	2,00		0,1026
B*C*D	912,0625	0,25	1,99		0,1036
A*B*C	897	0,25	1,95		0,1081
B*C	525,4375	0,25	1,14		0,3041
A*D	345,875	0,25	0,75		0,4850
A*C*D	-266,0625	0,25	-0,58		0,5872
A*B*C*D	-178	0,25	-0,39		0,7141
C	174,125	0,25	0,38		0,7200
A*B*D	169,9375	0,25	0,37		0,7263
B	-152,375	0,25	-0,33		0,7534
B*D	-105,75	0,25	-0,23		0,8269
D	-94,1875	0,25	-0,21		0,8455

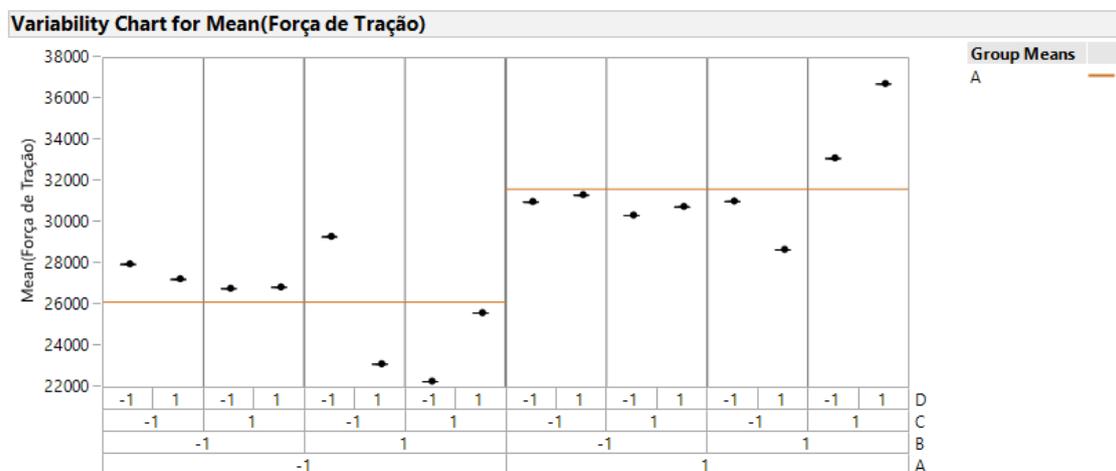
Fonte: o autor (2016)

4.3.3. Análise gráfica (DOE I)

No Gráfico 3 pode-se observar pela estrutura da base, parâmetros em níveis mínimos (-1) e máximos (1), a distribuição dos pontos de força média de tração e a variação para cada configuração de parâmetro. Pode-se destacar que quando o parâmetro 1ª compressão (B) está em sua condição mínima (-1), há pouca variação de força de tração entre amostras, diferentemente da sua condição máxima (1) onde é possível observar maior variação de força de tração entre as amostras. O parâmetro potência de solda (A) em sua condição

máxima (1) eleva a média da força de tração das amostras ensaiadas comparada com a sua condição mínima (-1), representadas pela linha na cor laranja. Por tanto se conclui que para melhor estabilidade e maior força de tração das carcaças, o processo necessita estar configurado com os parâmetros 1ª Compressão (B) na condição mínima do experimento (-1) e o parâmetro Potência de solda (A) na sua condição máxima (1), o que representa a condição ideal de operação.

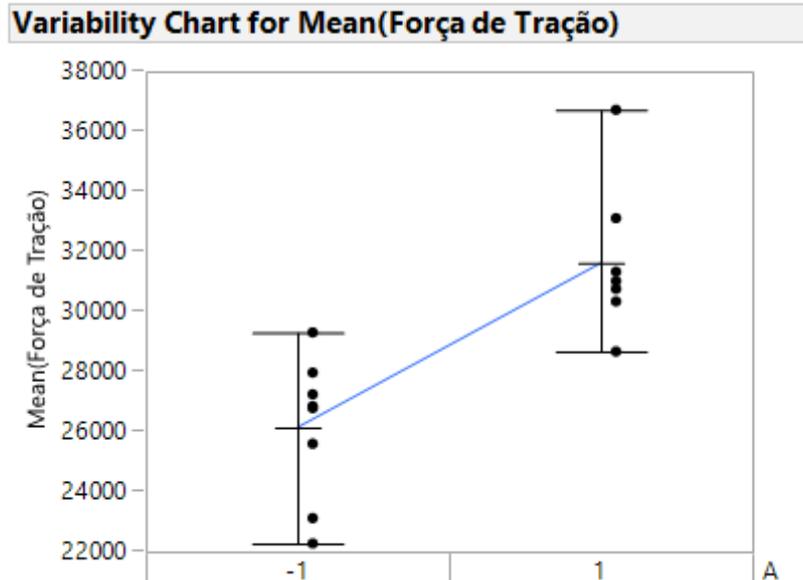
Gráfico 3 – Gráfico de variabilidade dos parâmetros selecionados (DOE I)



Fonte: o autor (2016)

Analisando individualmente o parâmetro potência de solda (A), conforme Gráfico 4, fica mais evidente a diferença média da força de tração quando utiliza-se o parâmetro em sua condição máxima (1). Para potência de solda em condição máxima (1) tem-se força média de tração igual a 31618 N e variação de 8053 N, já com a potência de solda em sua condição mínima (-1) verifica-se força média de tração igual a 26144 N e variação de 7031 N. Confirmando que, para maior força de tração e por consequência melhor resultado operacional (o que é esperado) o ideal é que o parâmetro Potência de solda (A) esteja em sua condição máxima (1).

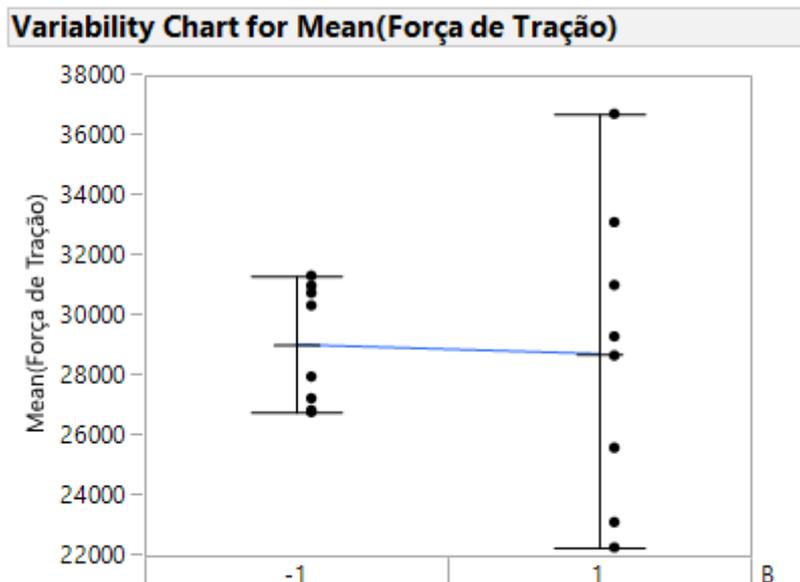
Gráfico 4 – Estudo de variabilidade do parâmetro A isoladamente (DOE I)



Fonte: o autor (2016)

Ao analisarmos o Gráfico 5, referente ao parâmetro 1ª compressão (B), é possível observar diferença média de força de tração de apenas 305 N, porém a variação de força de tração de uma amostra para a outra quando o parâmetro está em sua condição máxima (1) é de 14448 N, demonstrando assim, instabilidade em relação a sua condição mínima (-1) que apresenta variação entre amostra inferior a 5000 N. Sabendo que, quanto maior a estabilidade do processo mais assertividade se tem nas amostras ensaiadas, por tanto, o ideal é que o parâmetro 1ª compressão (B) esteja sempre configurado em sua condição mínima (-1).

Gráfico 5 – Estudo de variabilidade do parâmetro B isoladamente (DOE I)



Fonte: o autor (2016)

4.4. ANÁLISE DOE II

Respeitando a segunda estratégia de amostragem elaborada na fase “definir” do DMAIC, tem-se a Tabela 5 com as condições mínimas (-1) e máximas (1) dos parâmetros do DOE II, e o resultado da força de tração das amostras ensaiadas. Para continuar a análise no JMP, se faz necessário organizar os dados desta maneira para inseri-los ao software.

Tabela 5 – Descrição da Estratégia de amostragem (DOE II)

Resposta						
Alinhamento do eletrodo superior (C)	Desgaste do eletrodo superior (D)	Desgaste do eletrodo inferior (E)	1ª Compressão (B)	Potência de solda (A)	Amostragem (tra)	Força de Tração
-1	-1	-1	-1	1	1	21915
-1	-1	-1	-1	1	2	23077
-1	-1	-1	1	-1	3	16072
-1	-1	-1	1	-1	4	17692
-1	-1	1	-1	-1	5	14175

-1	-1	1	-1	-1	6	16080
-1	-1	1	1	1	7	31523
-1	-1	1	1	1	8	32027
-1	1	-1	-1	-1	9	17813
-1	1	-1	-1	-1	10	17001
-1	1	-1	1	1	11	30404
-1	1	-1	1	1	12	30711
-1	1	1	-1	1	13	30119
-1	1	1	-1	1	14	28127
-1	1	1	1	-1	15	23472
-1	1	1	1	-1	16	20094
1	-1	-1	-1	-1	17	23648
1	-1	-1	-1	-1	18	25052
1	-1	-1	1	1	19	30119
1	-1	-1	1	1	20	31172
1	-1	1	-1	1	21	23735
1	-1	1	-1	1	22	21783
1	-1	1	1	-1	23	21761
1	-1	1	1	-1	24	25293
1	1	-1	-1	1	25	28613
1	1	-1	-1	1	26	30558
1	1	-1	1	-1	27	23033
1	1	-1	1	-1	28	22924
1	1	1	-1	-1	29	25819
1	1	1	-1	-1	30	22924
1	1	1	1	1	31	33431
1	1	1	1	1	32	33519

Fonte: o autor (2016)

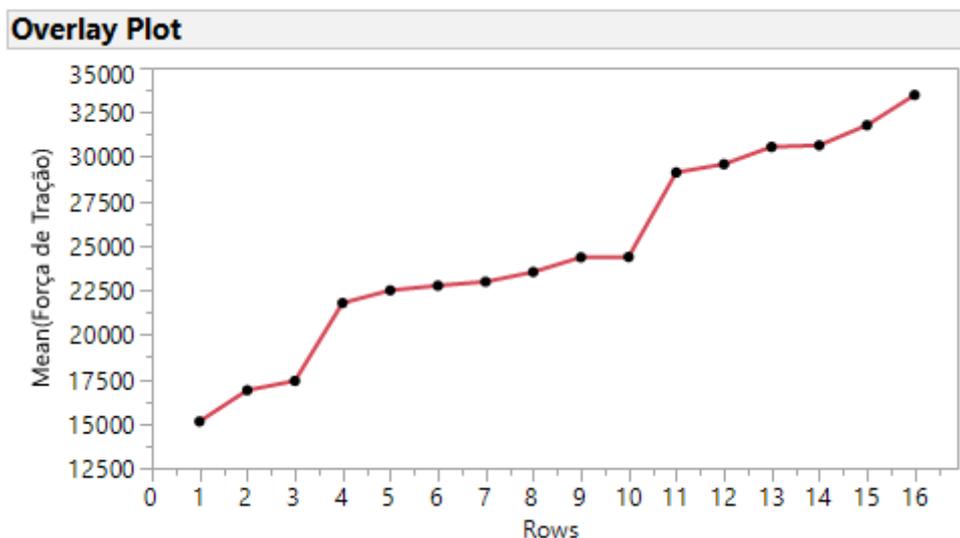
Assim como nas análises do DOE I, as fases seguintes do DOE II, fazem parte da fase “analisar” do DMAIC, onde novamente estão as análises prática, gráfica e quantitativa.

4.4.1. Análise prática (DOE II)

É possível observar no Gráfico 6 através da distribuição dos pontos médios de força de tração que, assim como no DOE I, o DOE II não apresenta causa especial e há variação considerável da força de tração nas amostras do processo em estudo, o que nos permite observar que novamente os parâmetros e níveis selecionados são relevantes para o estudo realizado. A

variação de força média de tração diagnosticada no DOE II foi superior a 18000 N entre a amostra de menor força e a de maior força, ou seja, o experimento conseguiu demonstrar que os parâmetros selecionados são influentes e validos para o estudo.

Gráfico 6 – Variação da força de tração (DOE II)



Fonte: o autor (2016)

4.4.2. Análise quantitativa (DOE II)

O Gráfico 7, utilizado para calcular o efeito de cada parâmetro do experimento, dado pela equação 2, permite-se identificar os parâmetros de maior relevância para gerar variação de força média de tração em carcaças soldadas.

Ao analisar o Gráfico 7, observa-se que o parâmetro potência de solda (A), assim como no DOE I, foi o de maior influência no que diz respeito a modificar a força média de tração, visto que estatisticamente foi o único parâmetro a ultrapassar os limites de controle estabelecidos pelo software estatístico, ratificando que este é o parâmetro de maior importância para o estudo. Durante a análise gráfica é possível observar o quanto de variação e força média de tração o parâmetro potência de solda (A) gera nos níveis mínimos (-1) e máximos (1).

Gráfico 7 – Influência dos parâmetros selecionados no processo em análise (DOE II)

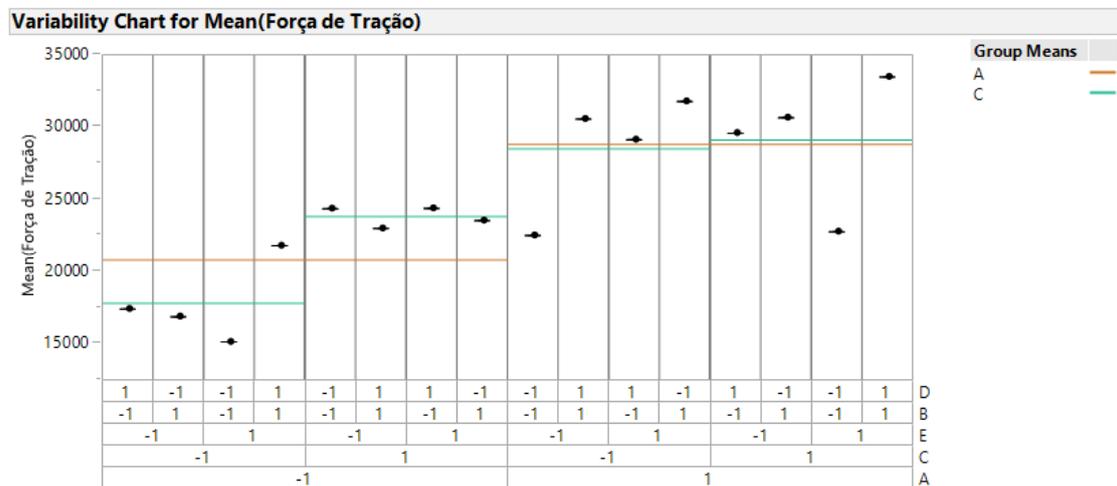
Sorted Parameter Estimates					
Term	Estimate	Relative Std Error	Pseudo t-Ratio		Pseudo p-Value
A	3999,375	0,25	3,92		0,0111*
C	1658,8125	0,25	1,63		0,1646
B	1650,25	0,25	1,62		0,1664
D	1357,4375	0,25	1,33		0,2404
C*A	-1344,625	0,25	-1,32		0,2443
B*A	1160,9375	0,25	1,14		0,3063
C*E	-868,3125	0,25	-0,85		0,4332
E*B	747,125	0,25	0,73		0,4965
D*B	-611,875	0,25	-0,60		0,5745
D*E	588,0625	0,25	0,58		0,5890
D*A	525,75	0,25	0,52		0,6280
C*B	-455,25	0,25	-0,45		0,6738
E	439,9375	0,25	0,43		0,6840
C*D	-216,3125	0,25	-0,21		0,8403
E*A	41	0,25	0,04		0,9695

Fonte: o autor (2016)

4.4.3. Análise gráfica (DOE II)

No Gráfico 8 pode-se observar a distribuição dos pontos de força média de tração e a variação para cada configuração de parâmetro. Pode-se destacar que quando o parâmetro alinhamento do eletrodo superior (C) e potência de solda (A) estão em sua condição máxima (1), há maior força média de tração. Os demais parâmetros, 1ª compressão (B), desgaste eletrodo superior (D) e desgaste eletrodo inferior (E), não foram significativos, pois não apresentaram grande influência na modificação da força média de tração. Por tanto se conclui que para melhor estabilidade e maior força de tração das carcaças, o processo necessita estar configurado com os parâmetros alinhamento do eletrodo superior (C) e o parâmetro Potência de solda (A) na sua condição máxima (1), o que representa a condição ideal de operação.

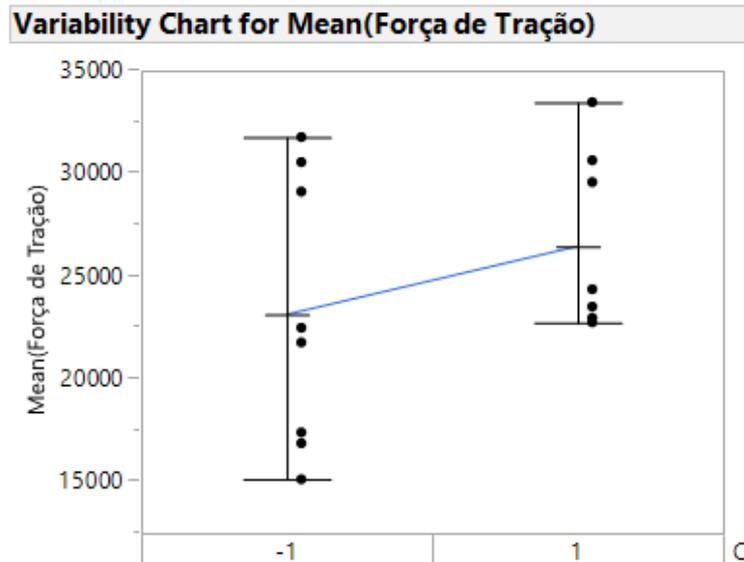
Gráfico 8 – Gráfico de variabilidade dos parâmetros selecionados (DOE II)



Fonte: o autor (2016)

Analisando individualmente o parâmetro alinhamento do eletrodo superior (C), conforme Gráfico 9, tem-se diferença média da força de tração de apenas 3318N quando utiliza-se o parâmetro em sua condição máxima (1) em relação a sua condição mínima (-1). Porém, a variação de amostras em sua condição mínima (-1), dada pela distribuição de pontos, é superior a 16000 N e em sua condição máxima (1) é de 11703 N, mostrando-se mais estável na condição máxima (1). Portanto, a condição ideal de operação com o parâmetro alinhamento do eletrodo superior (C) será em sua condição máxima (1).

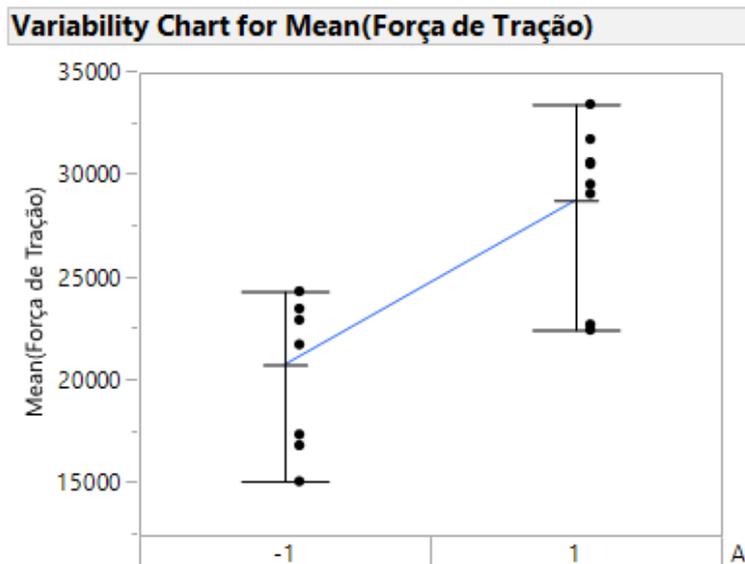
Gráfico 9 – Estudo de variabilidade do parâmetro C isoladamente (DOE II)



Fonte: o autor (2016)

Ao analisar o Gráfico 10, referente ao parâmetro potência de solda (A), é possível observar, através da distribuição dos pontos, que a variação de força de tração de uma amostra para a outra quando o parâmetro está em sua condição máxima (1) e em a sua condição mínima (-1) são próximas a 10000 N, porém a força média de tração na condição máxima (1) é próximo de 30000 N enquanto em sua condição mínima (-1) é de 20803 N, demonstrando assim que para que se tenha maior força média de tração é recomendado utilizar o parâmetro em sua condição máxima (1).

Gráfico 10 – Estudo de variabilidade do parâmetro A isoladamente (DOE II)



Fonte: o autor (2016)

4.5. VALIDAÇÃO

Conforme resultados obtidos nas análises do DOE I e DOE II foi possível definir o parâmetro potência de solda (A) como determinante para que se tenha maior força média de tração. O parâmetro alinhamento do eletrodo superior (C) deve ser levado em consideração, visto que contribui com moderada significância na força média de tração e estabilidade das amostras. O parâmetro 1ª compressão (B) contribui diretamente para que haja maior estabilidade das amostras quando definido em sua condição máxima. Portanto, tem-se a Tabela 6 com os parâmetros definidos para validação.

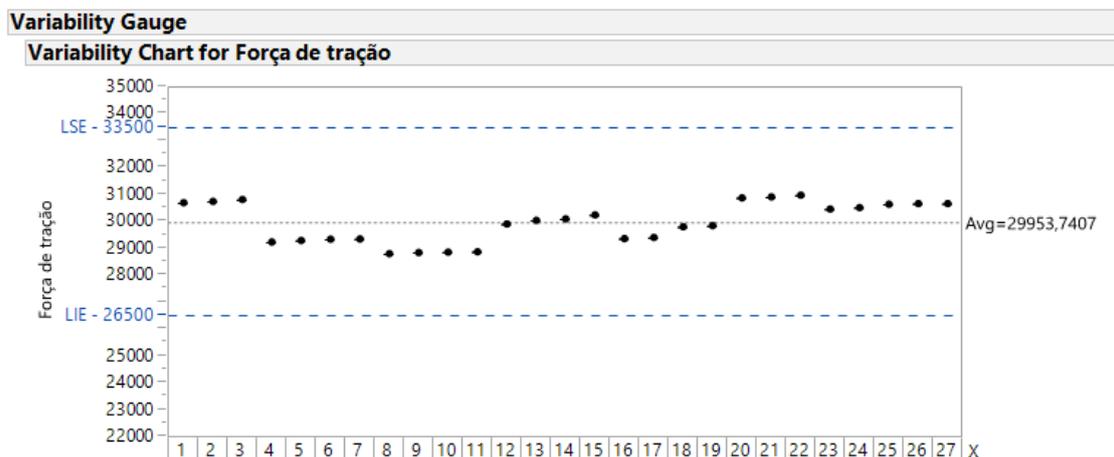
Tabela 6 – Comparação condição anterior e ajustada

Parâmetro	Condição anterior	Condição ajustada
Potência de solda	50% a 80%	80%
Alinhamento do eletrodo superior	Sem controle	Alinhado
1ª compressão	50% a 80%	50%

Fonte: o autor (2016)

Conforme Gráfico 11 as amostras apresentaram valor de tração entre os limites de especificação, com variação máxima de 1170 N e força média de tração de 29953 N, portanto, tem-se um processo estável e capaz.

Gráfico 11 – Variação da força de tração (validação)

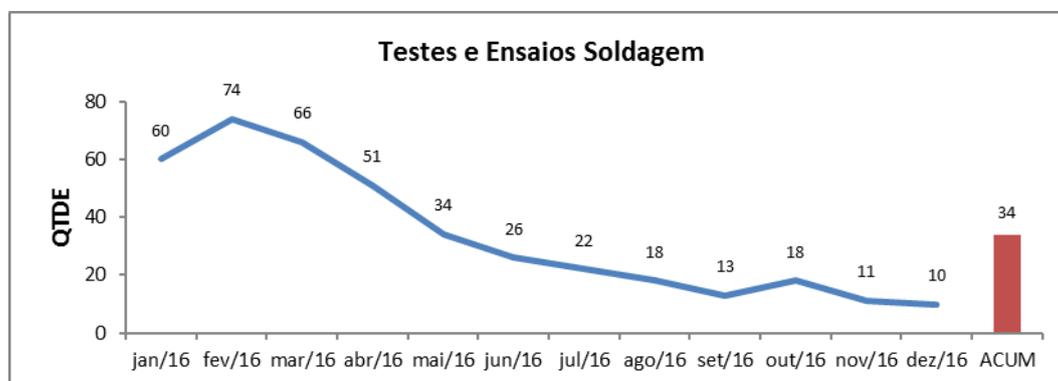


Fonte: o autor (2016)

4.6. INDICADOR DE REFUGO

Conforme Gráfico 12 é observado uma queda no índice de refugo superior a 80% do primeiro trimestre para o quarto trimestre, após definição da condição ajustada de trabalho, ocorrida em maio de 2016.

Gráfico 12 – Evolução dos defeitos testes e ensaios soldagem



Fonte: o autor (2016)

5. CONCLUSÕES

A utilização do modelo DMAIC da metodologia Seis Sigma mostrou-se eficaz para o alcance dos objetivos propostos no estudo, uma vez que foi possível estudar a influência dos parâmetros que configuram o processo de soldagem da carcaça de motores elétricos, e definir uma configuração ideal de fabricação.

Identificou-se que os principais parâmetros que afetam na resistência mecânica da solda dos componentes da carcaça foram potência de solda, alinhamento do eletrodo superior e 1ª compressão.

Baseado nas causas para a ocorrência do defeito no processo de soldagem da carcaça foi possível propor nova configuração operacional dos parâmetros de fabricação.

6. SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Como sugestão para futuros trabalhos indica-se avaliar a qualidade da solda relacionado a fadiga do material e força de tração para carcaças com seis pontos de solda.

7. REFERÊNCIAS

- ANDRIETTA, J. M., Miguel, P. A. C. **Aplicação do programa Seis Sigma no Brasil: resultados de um levantamento tipo survey exploratório-descritivo e perspectivas para pesquisas futuras**, 2006.
- ASLANLAR, S. **The effect of nucleus size on mechanical properties in electrical resistance spot welding of sheets used in automotive industry**. *Materials and Design*, v. 27, p.125-131, 2006.
- ASM. **ASM Handbook. Welding Braserenig and Soldering**, Volume 8, 1993
- AWS. **American Welding Society**. International Standard Book Number: 0-87 17 1-506-6, 1998.
- Batista, M. **Estudo comparativo da soldabilidade de chapas para indústria automotiva utilizando dois equipamentos de soldagem a ponto por resistência**. Dissertação de Mestrado da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 217p, 2011.
- BRANCO, H. L. O. **Avaliação de capas de eletrodos utilizadas na soldagem por resistência de chapas galvanizadas automotivas**. 2004. 113 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2004.
- CHANG, B.H. & ZHOU, Y. **Numerical study on the effect of electrode force in small-scale resistance spot welding**. *Journal of Materials Processing Technology*, n 139, pp. 635-641, 2003.
- COLEMAN, D.E.; MONTGOMERY, D.C. **A systematic approach to planning for a designed industrial experiment**. *Technometrics*, V.35, n.1, p.1-12, 1993
- COLOMBARI, R. **Aplicação de delineamento de experimentos para o processo de solda à projeção**. 119p. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção, Itajubá - MG, 2004.
- DARWISH, S. M.; AL-DEKHIAL, S. D. **Micro-hardness of spot welded (B. S. 1050) commercial aluminum as correlated with welding variables and strength attributes**. *Journal of Materials Processing Technology*, v.91, p.43-51, 1999.
- Faria, P. E. **Monitoramento do Ponto de Solda Através da Resistência Dinâmica da Soldagem a Ponto por Resistência Elétrica**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, UFMG, 118p, 2003.
- HENDERSON K., EVANS, J. **Successful Implementation of Six Sigma: benchmarking General Electric Company**. *Benchmarking and International Journal*, V.7 N.4, 2000.
- INFOSOLDA, **Soldagem por resistência parâmetros de soldagem**, biblioteca-digital, 2017.

MACIEL, H. **Uso do planejamento e análise de experimentos no desenvolvimento de um processo de solda por resistência elétrica de pequena escala.** 77p. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Itajubá, Minas Gerais, 2006.

MODENESI, P. **Soldabilidade de Algumas Ligas Metálicas.** 27 p. Apostila do curso de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. Universidade Federal de Minas Gerais – MG, 2011.

MONTGOMERY, D.C. **Desenho e análise de experimentos,** 1991.

Nakano, R. K. **Influência da Taxa de Deformação na Falha de Uniões por Solda a Ponto.** Dissertação de Mestrado da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 73p, 2005.

Paes, M.T. P., Guimarães, A. S. e Rebello, J. M. A., 1989, **Significância da Expulsão e do Tipo de Fratura em Soldagem por Pontos, Soldagem e Materiais.** Publicado na Revista Soldagem e Materiais, pp 51-57, 1989.

PAIVA, EJ. **Otimização de Processos de Manufatura com múltiplas respostas baseada em índices de capacidade.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2008.

PANDE, PETER S., NEUMAN, ROBERT P. E CAVANAGH, RONALD R., **Estratégia Seis Sigma: Como A GE, A Motorola e outras grandes empresas estão aguçando seu desempenho;** RIO DE JANEIRO: QUALITYMARK, 2001.

PENTEADO, K. **Otimização da Solda de Pontos por Resistência Elétrica na Liga de Alumínio 5052-H32 através do Projeto e Análise de Experimentos (DOE).** 107p. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Itajubá, Minas Gerais, 2011.

PINHEIRO, H. Estudo da correlação entre a corrente “shunt” e a geometria do ponto de solda em função **do espaçamento, em chapa de aço de baixo teor de carbono e espessura de 0,8 mm.** 112p. Dissertação de Mestrado em Gestão e Tecnologia Industrial, Faculdade de Tecnologia SENAI CIMATEC, Bahia, 2011.

PORTER, M. A. (2000) - **Nova Era da Estratégia.** HSM Management. Ed. Especial. São Paulo: mar/abr, p. 18- 28.

ROGEON, P., CARRE, P., COSTA, J., SIBILIA, G., SAINDRENAN, G. **Characterization of electrical contact conditions in spot welding assemblies.** Journal of Materials Processing Technology, n.195, p.117-124, 2008.

ROTONDARO, R. G. et al. **Seis Sigma: Estratégia Gerencial para a Melhoria de Processos, Produtos e Serviços;** Ed. Atlas, São Paulo, 2002.

SANTOS, F. B. **Estudo da eficiência do processo de soldagem de pontos por resistência elétrica utilizado na indústria automobilística.** 2006. 104 p. Dissertação (Mestrado em 84

Sistemas de Gestão) – Gestão de Negócios e Meio Ambiente, Universidade Federal Fluminense, Niterói. 2006.

SANTOS, V. F. R. **Aplicação da metodologia Seis Sigma para redução de retrabalho em juntas soldadas em um processo de soldagem FCAW: Estudo de caso.** 93 p. Dissertação Curso de Especialização em Qualidade e Seis Sigma, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2016.

VARGAS, J. E. **Estudo da Formação, Geometria e Resistência do Ponto na Soldagem pó Resistências: Uma Abordagem Estatística.** 2006. 143p. Dissertação (Mestrado em Sistemas Mecatrônicos) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília. 2006.

WERKEMA, C **Criando a cultura Lean Seis Sigma 3ª edição;** Ed. Elsevier, Rio de Janeiro, 2012.

WU, J., ZHAI, G., CHEN, Q., WANG, J., REN, G. **The interfacial structure of plated copper alloy resistance spot welded joint.** *Applied Surface Science.* n. 254, p. 7227-7231, 2008.

ANEXOS

ANEXO A – Mapa de raciocínio

Mapa de raciocínio - Entendendo os fatores que afetam a resistência mecânica na solda por projeção

