

**UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ**

**Caio Marques Luiz dos Santos  
Caroline Stefanie Akamatsu**

**APLICAÇÃO DE ENGENHARIA ROBUSTA NA  
PARAMETRIZAÇÃO DO PROCESSO DE SOLDAGEM DO  
PARASOL**

**Taubaté - SP  
2017**

**Caio Marques Luiz dos Santos  
Caroline Stefanie Akamatsu**

**APLICAÇÃO DE ENGENHARIA ROBUSTA NA  
PARAMETRIZAÇÃO DO PROCESSO DE SOLDAGEM DO  
PARASOL**

Trabalho de Graduação apresentado à  
Coordenação do Curso Superior de  
Engenharia de Produção Mecânica da  
universidade de Taubaté para a obtenção do  
diploma de Engenheiro em Produção  
Mecânica.

Orientador: Prof. Me. Julio Malva Filho

Co-orientador: Prof. Me. Ivair Alves dos  
Santos

**Taubaté - SP  
2017**

**Ficha Catalográfica elaborada pelo SIBi – Sistema Integrado  
de Bibliotecas / UNITAU - Biblioteca das Engenharias**

S237a

Santos, Caio Marques Luiz dos  
Aplicação de engenharia robusta na parametrização do  
processo de soldagem do parasol. / Caio Marques Luiz dos  
Santos, Caroline Stefanie Akamatsu. - 2017.

37f. : il; 30 cm.

Monografia (Graduação em Engenharia de Produção  
Mecânica) – Universidade de Taubaté. Departamento de  
Engenharia Mecânica e Elétrica, 2017

Orientador: Prof. Me. Julio Malva Filho

Coorientador: Prof. Me Ivair Alves dos Santos,  
Departamento de Engenharia Mecânica e Elétrica.

1. Método Taguchi. 2. Engenharia robusta. 3. Projeto  
experimental (DOE). 4. Alta frequência. 5. Método de  
soldagem. I. Título.

**CAIO MAQUES LUIZ DOS SANTOS  
CAROLINE STEFANIE AKAMATSU**

**APLICAÇÃO DE ENGENHARIA ROBUSTA NA PARAMETRIZAÇÃO DO  
PROCESSO DE SOLDAGEM DO PARASOL**

Trabalho de Graduação apresentado à  
Coordenação do Curso Superior de  
Engenharia de Produção Mecânica da  
universidade de Taubaté para a obtenção  
do diploma de Engenheiro em Produção  
Mecânica.

Data: 08/12/2017

Resultado: \_\_\_\_\_

**BANCA EXAMINADORA**

Prof. Me. Júlio Malva Filho

Universidade de Taubaté

Assinatura: \_\_\_\_\_

Prof. Me. Fabio H. Fonseca Santejani

Universidade de Taubaté

Assinatura: \_\_\_\_\_

Dedicamos este trabalho aos nossos familiares por todo apoio e incentivo durante todos os momentos, e a Deus por ter nos guiado ao caminho acadêmico onde nos desenvolvemos e aperfeiçamos como pessoas.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradecemos primeiramente aos nossos pais, que proporcionaram toda base para que chegássemos até aqui e sempre souberam nos conduzir ao melhor caminho.

Nossas considerações aos orientadores do presente trabalho, pois contribuíram de forma absoluta e solícita para a realização do mesmo.

Aos professores, generalizamos nossos cumprimentos a todos que sempre estiveram dispostos a nos oferecer o melhor conhecimento, visando eficácia na aprendizagem para nossa formação profissional.

Aos colegas de classe que sempre nos acompanharam e tivemos a oportunidade de conviver e dividir conhecimentos e dúvidas.

Por fim nossos agradecimentos aos nossos avós, pois sem eles esta história não aconteceria.

*“Não se esforce para ser alguém de sucesso, mas para ser alguém de valor”.  
(Albert Einstein)*

## RESUMO

O processo de soldagem do PVC que consiste no PARASOL é realizado automaticamente por uma máquina de solda de alta frequência, a energia dissipada neste processo esquenta o plástico até sua fusão e a pressão que a máquina exerce sobre o eletrodo e o plástico faz com que ocorra a solda do mesmo. Um estudo de campo realizado no processo de fabricação apontou que há variações consideráveis no posto de trabalho no momento da solda, causando queda da Qualidade e gerando custos de retrabalho. O objetivo dessa pesquisa é desenvolver um parâmetro ótimo utilizando a aplicação de Engenharia Robusta, *DOE* (Planejamento Experimental) e do Método de Taguchi, obtendo conjuntos de variáveis de processo e fixando níveis para os fatores controláveis, de tal forma que o parasol estudado tenha qualidade em todo o seu processo, inclusive no de soldagem, e seja pouco sensível às variações que ocorrem no dia-a-dia. Apesar do Método de Taguchi não ser tão conhecido e aplicado no Brasil, sua difusão tem grande importância e aplicabilidade nas questões que envolvem produção X qualidade X custos, visto que o custo do produto tem grande peso nas etapas iniciais de seu ciclo de desenvolvimento, ou seja, mudanças e alterações nas fases iniciais do produto tem menor impacto do que em fase de produção ou até mesmo quando o produto já se encontra no mercado.

**Palavras-chaves:** Método de Taguchi; Engenharia Robusta; Parametrização; Soldagem; Planejamento Experimental (DOE); Alta Frequência.

## ABSTRACT

The PVC welding process consisting of PARASOL is performed automatically by a high frequency welding machine, the energy dissipated in this process heats the plastic until it is melted and the pressure exerted by the machine on the electrode and the plastic causes it to occur the weld of it. A field study carried out in the manufacturing process pointed out that there are considerable variations in the work station at the time of welding, causing a decrease in Quality and generating reworking costs. The objective of this research is to develop an optimal parameter using the Robust Engineering application, DOE (Experimental Planning) and Taguchi Method, obtaining sets of process variables and setting levels for the controllable factors, such that the studied parasol has quality in all its process, including in the welding process, and is not very sensitive to the variations that occur in the day-to-day. Although the Taguchi Method is not so well known and applied in Brazil, its diffusion has great importance and applicability in the issues that involve production X quality X costs, since the cost of the product has great weight in the initial stages of its development cycle, or changes and changes in the initial phases of the product has less impact than in the production phase or even when the product is already in the market.

**Keywords:** Taguchi method; Robust Engineering; Parameterization; Welding; Design of Experiment (DOE); High frequency.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Modelo Máquina de solda por Alta Frequência. ....	15
Figura 2 - Gerador da Máquina de Solda por Alta Frequência .....	16
Figura 3 - Sintonizador de alta frequência.....	17
Figura 4 - Imagem prensa de máquina de solda Alta frequência .....	18
Figura 5 - Berço de solda com eletrodo embutido, montados na prensa .....	19
Figura 6 - Modelo geral de um processo ou sistema.....	20
Figura 7 - Processo de transformação nas formas ideal e real. ....	25
Figura 8 - Diagrama de Causa e Efeito (variáveis do processo de soldagem do PVC) .....	26
Figura 9 – Combinação de parâmetros em relação aos limites superiores e inferiores .....	32
Figura 10 - Comparação de resultados entre os experimentos por períodos:.....	33

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Fatores, valores especificados e dados registrados (Laudo realizado na máquina EMIQ) .....	27
Tabela 2: Fatores ruído identificados no processo .....	27
Tabela 3: Tipos de Arranjos Ortogonais.....	29
Tabela 4: Parâmetros para experimentos gerado através do software Minitab V17 – Função Taguchi.....	29
Tabela 5: Experimentos e Resultados:.....	30

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	11
1.1	Considerações Iniciais .....	11
1.1	Objetivo .....	11
1.2	Justificativa.....	12
1.3	Proposta Metodológica.....	12
2	REVISÃO DA LITERATURA .....	14
2.1	Soldagem de Polímeros por Alta Frequência.....	14
2.1.1	Composição de uma máquina de solda por alta frequência .....	15
2.1.1.1	Gerador .....	15
2.1.1.2	Sintonizador .....	16
2.1.1.3	Prensa .....	17
2.1.1.4	Eletrodo .....	18
2.2	Planejamento Experimental - DOE ( <i>Design of Experiments</i> ) .....	19
2.2.1	Métodos de Taguchi .....	21
2.2.2	Engenharia Robusta.....	22
3	METODOLOGIA.....	24
3.1	Aplicação Engenharia Robusta .....	25
3.1.1	Fatores de Controle e de Ruído.....	26
3.1.2	Arranjos Ortogonais.....	28
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	32
5	CONCLUSÕES .....	34
	REFERÊNCIAS .....	36



# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Considerações Iniciais

Com a evolução da tecnologia a necessidade de otimizar processos e recursos se faz necessária, visto que, grandes concorrências no setor diminui a margem de lucro da empresa, sendo assim um fator primordial atender aos requisitos de qualidade e produção a baixos custos. O setor automotivo é considerado um ramo que sofre mudanças repentinas no mercado e para se destacar a engenharia tem uma grande preocupação com a qualidade dos produtos oferecidos e programa ferramentas e métodos que contribuem para que a variação do produto final seja minimizada.

O desenvolvimento de produtos é o conjunto de atividade que se inicia com a percepção de uma oportunidade de mercado e termina com a produção, venda e entrega de um produto que satisfaça uma necessidade previamente definida (Ulrich; Eppinger, 1995).

Há muitos fatores que podem acarretar problemas de qualidade, fatores esses que devem ser controlados e gerar um produto 'robusto'. Produto 'robusto' é definido como um produto que atende aos requisitos específicos e de desempenho, sem que tenham influências de fatores que não podem ser controlados, atingindo assim aos níveis de Qualidade exigidos e esperados pelo cliente.

### 1.1 Objetivo

Objetivo desse trabalho é estudar a linha de produção do Parasol e obter melhoria na qualidade da solda do PVC que compõe o revestimento externo do Parasol através do levantamento de atividades, volume produzido, análise de todo o

processo, suas variáveis e parâmetros. Será analisada em caráter específico a máquina de solda de polímeros que utiliza a técnica de alta frequência, tendo como característica uma variação no seu processo de forma crônica o que dificulta na padronização da produção.

## **1.2 Justificativa**

A justificativa deste documento está na necessidade de aplicar diferentes métodos de melhoria de qualidade em processos produtivos, visando o menor prejuízo material e satisfatório tanto para empresas quanto para a sociedade.

A parametrização eficaz pode trazer ganhos significativos para processos produtivos de forma a diminuir a sensibilidade em relação aos fatores externos otimizando tempo, mão de obra e matéria prima. É possível obter essa eficácia aplicando Engenharia Robusta e outras técnicas desde as fases iniciais do projeto ou, se necessário, durante a vida série do produto, porém os custos vão ficando cada mais vez mais alto ao que se distancia das fases iniciais. Portanto justifica-se que através dos resultados positivos o atingimento esta relacionado desde a manufatura até os clientes finais.

## **1.3 Proposta Metodológica**

Será realizado um estudo de caso, que tem por objetivo adquirir conhecimentos suficientes para elaboração de um plano focado nos fatores e parâmetros críticos identificados e analisados.

A produção do Parasol ocorre em um processo onde há injeção de polipropileno no formato específico da concha, adição do *shaft*, adição de graxa, corte automático do PVC que reveste o parasol, recorte do PVC (moldura do

espelho interno), soldagem do perímetro do PVC, retirada de rebarba do PVC soldado, adição da moldura do espelho, CS1 (inspeção) e aplicação de Etiqueta/ Revisão e Embalagem.

Sendo o processo de soldagem do PVC um ponto crítico da produção, onde se determina o nível da Qualidade final do produto.

O projeto de pesquisa se faz necessário para que a parametrização do processo seja de conhecimento dos operadores e entre em vigor para reduzir a variabilidade.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 Soldagem de Polímeros por Alta Frequência

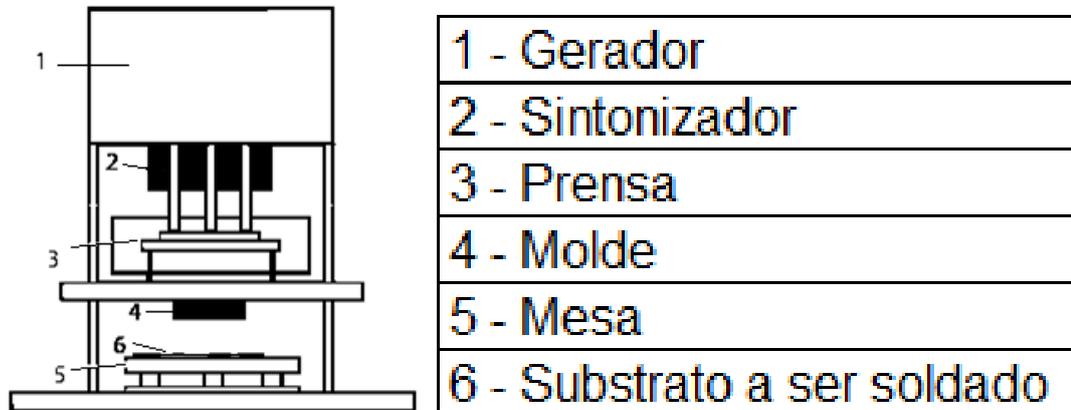
A fim de soldar dois ou mais filmes plásticos, é preciso aquecer a solda conjunta até a temperatura de fusão do plástico enquanto o pressiona. É necessário manter a pressão até que o conjunto esteja suficientemente frio. Para isto pode-se utilizar a tecnologia de solda eletrônica por alta frequência, também conhecida pela sigla HF (*High Frequency*) ou RF (*Radio Frequency*), que se baseia no princípio físico chamado de 'perdas dielétricas', pelo qual uma substância não condutora (materiais isolantes como plástico, borracha, PVC, *nylon*, etc.) dissipa energia quando submetida à ação de um campo elétrico alternado (FLAWS, 1996).

Isso ocorre porque as moléculas do material colocado sob influência do campo elétrico se polarizam. É um fato conhecido que um elemento bipolar colocado sob ação de um campo elétrico se alinhará com o campo molecular de tal forma que o polo positivo defronta-se com a extremidade negativa da outra molécula, e vice-versa, orientando-se na mesma direção de si mesmo (positivo -negativo - positivo...) (FLAWS, 1996).

Alguns plásticos, como o PVC possuem moléculas polares e por isso são utilizados no processo de solda dielétrica, também chamado de "solda eletrônica". A energia dissipada no plástico (PVC), conhecida como "perdas dielétricas", faz com que ele, que está em contato com o eletrodo, aqueça até a fusão do mesmo, efetuando assim a solda (união molecular) pela força que a prensa da máquina exerce sobre o material. Essa energia é fornecida por um oscilador, que recebe da fonte de alimentação, como corrente contínua, e convertida em alternada de alta frequência, esta é enviada até a prensa por um circuito que regula a potência empregada (Mercer & Slate, 2008).

### 2.1.1 Composição de uma máquina de solda por alta frequência

Figura 1: Modelo Máquina de solda por Alta Frequência.



Fonte: Jerônimo, 2009.

Uma linha montada para operações de selagem/solda por alta frequência, como mostrado na Figura 2, geralmente consiste de um gerador, regulador de potência, uma prensa seladora para aplicar pressão na região a ser ligada e moldes seladores para calor, dispostos na prensa para determinar o formato da área a ser selada. Faixas de potência de operação de 1 a 100 kW estão disponíveis, sendo que a faixa usual é entre 3 a 25 kW (FLAWS, 1996).

#### 2.1.1.1 Gerador

O gerador (conforme exemplo da Figura 2) tem a função de transformar os 60 Hz da rede elétrica em energia de alta frequência para as mais usuais aplicações com dois filmes plásticos (0,3 a 0,5 mm de espessura), a potência necessária é de cerca de 0,5W/mm<sup>2</sup> (North & Ramarathnam, 1993).

Para a soldagem de alta qualidade (infláveis), aconselha-se para o dimensionamento de potência do gerador de 1W/mm<sup>2</sup> ou 1000mm<sup>2</sup>/kW. Em contrapartida, para filmes plásticos espessos pode-se usar apenas 0,33W/mm<sup>2</sup>, ou

seja,  $3000\text{mm}^2/\text{kW}$ . Como uma regra de ouro utiliza-se  $0,5\text{W}/\text{mm}^2$ . Portanto, a fim de calcular a potência necessária para a solda, é preciso calcular o valor máximo da solda por unidade de área, multiplicando seu comprimento (mm) e sua largura (mm). (North & Ramarathnam, 1993).

**Figura 2 - Gerador da Máquina de Solda por Alta Frequência**



**Fonte: Próprio Autor**

### **2.1.1.2 Sintonizador**

O sintonizador (conforme exemplo da Figura 3) regula a transferência de energia de alta frequência para o material a ser soldado, transferindo a potência necessária para a ocorrência de solda dentro da especificação (JERONIMO, 2009.)

**Figura 3 - Sintonizador de alta frequência**



Fonte: Próprio Autor

### 2.1.1.3 Prensa

Quando solda-se por alta frequência, o material plástico compreendido entre o eletrodo (molde) e a mesa é submetido a um aquecimento uniforme devido às perdas dielétricas que se desenvolve com a passagem da corrente de alta frequência. Para completar a soldagem, é necessário que o material plástico esteja submetido a uma pressão, para isto tem-se uma prensa (conforme exemplo da Figura 4), que deve ser rígida e robusta. A principal característica da prensa é que necessita de uma força para fechar (FLAWS, 1996).

**Figura 4 - Imagem prensa de máquina de solda Alta frequência**

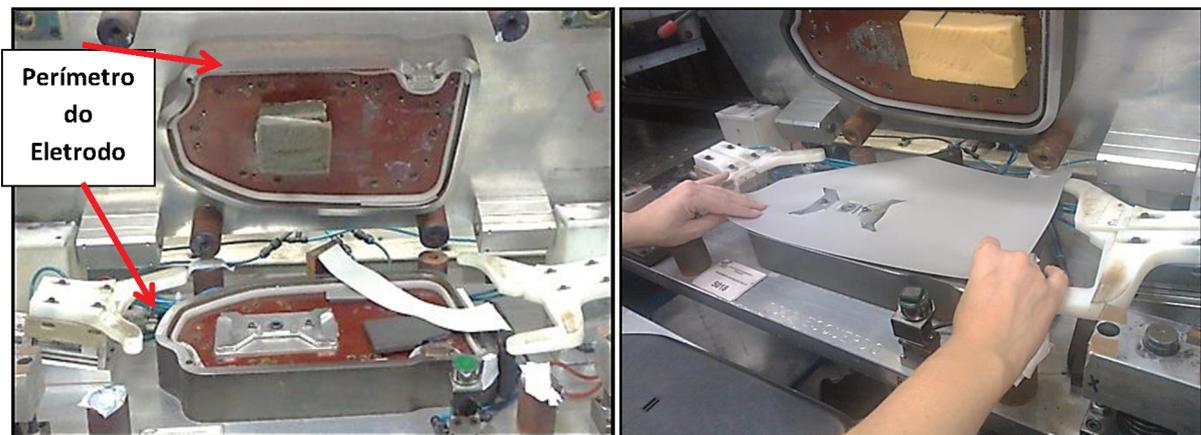


**Fonte: Próprio Autor**

#### **2.1.1.4 Eletrodo**

O eletrodo (presente no perímetro externo do berço da concha, conforme indicado por setas na Figura 5) é o elemento que molda a solda sobre o filme plástico. A maioria dos eletrodos é de simples fabricação, tais como latão de perfis padronizados, com ou sem faca, fixados sobre uma placa de alumínio. O perfil irá transferir a sua superfície desenho à superfície de plástico. De um lado do perfil, pode-se fixar uma faca para cortar a peça soldada facilitando a operação de remoção da peça soldada. O eletrodo pode incluir uma profundidade limite para controlar mecanicamente sua penetração no interior do plástico. Os moldes podem, além da solda, realizar um processo denominado grafagem, processo este que atribui marcas, texturas, ao substrato pré-definido (Gruenspecht & Hopper, 2006).

Figura 5 - Berço de solda com eletrodo embutido, montados na prensa



Fonte: Próprio Autor

## 2.2 Planejamento Experimental - DOE (*Design of Experiments*)

Caracterizar um processo significa definir a relação entre os parâmetros do processo (variáveis de entrada) e as saídas mensuráveis do processo (variáveis de saída). A abordagem mais eficiente para se caracterizar um processo e identificar quais parâmetros que o influenciam é através da aplicação do planejamento de experimentos (DOE - *Design of Experiments*). Um DOE fornece informações sobre o efeito de cada parâmetro do processo ou das interações entre os parâmetros nos resultados obtidos no processo (Weese, 1998).

As técnicas de planejamento e análise de experimentos são utilizadas para melhorar as características de qualidade dos produtos e processos de produção. Com o objetivo de aumentar a qualidade, a produtividade o desempenho do produto e os custos das operações, as empresas realizam experimentos a fim de encontrar os parâmetros ótimos que regulam seus processos de fabricação (Montgomery, 2014).

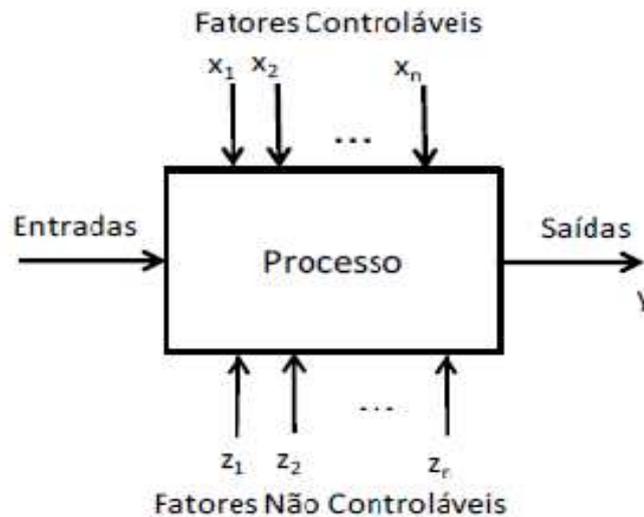
Um experimento planejado é um teste, ou série de testes, no qual são feitas mudanças propositalmente nas variáveis de entrada de um processo, de modo a

podemos observar e identificar mudanças correspondentes na resposta de saída (Montgomery, 2014).

Assim, métodos de planejamento experimental podem ser usados tanto no desenvolvimento do processo quanto na solução de problemas do processo, para melhorar o seu desempenho ou obter um processo que seja robusto ou não-sensível a fontes externas de variabilidade (Montgomery, 2014).

Montgomery (2014), dá um esboço do procedimento recomendado conforme a Figura 6:

**Figura 6 - Modelo geral de um processo ou sistema**



**Fonte: Montgomery (2014)**

DOE é um termo geral que engloba análise de variância (ANOVA), estudos de superfície de resposta e experimentos fatoriais. Em geral, o DOE propõe descobrir o efeito de um parâmetro controlado de um processo em uma das suas saídas, podendo dizer, assim, que 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 que possa ser observada e identificada mudanças correspondentes na resposta (HOJO, 2004)

### 2.2.1 Métodos de Taguchi

O objetivo principal do método de Taguchi é o de melhorar as características de um processo ou de um produto através da identificação e ajuste dos seus fatores controláveis, que irão minimizar a variação do produto final em relação ao seu objetivo. Ao ajustar os fatores no seu nível ótimo, os produtos podem ser fabricados de maneira a que se tornem mais robustos (Rodrigues, 2016)

A ideia central de Taguchi aborda todo o ciclo de produção de um produto ou tecnologia, cujo critério chave para redução de perdas esta na redução da variância estatística em relação aos seus requisitos ou objetivos já fixados (TAGUCHI; CHOWDHURY & TAGUCHI. 1999).

A metodologia é definida por dois parâmetros importantes:

- redução na variabilidade, ou seja, emprego da engenharia da qualidade no produto ou processo, buscando a melhoria contínua e menor desperdício para empresa;

- aplicação do planejamento estratégico, de formas adequadas, objetivando o desenvolvimento de novas pesquisas, visando à otimização do processo e à redução de experimentos em situações reais, repercutindo diretamente em redução de custos com experimentação.

Segundo Roy (2010), com o objetivo de tornar o DOE mais simples e atrativos á indústria, Taguchi propôs:

a) Estratégia do Projeto Robusto: para fazer produtos e processo insensíveis aos fatores não-controláveis no planejamento de experimentos;

b) Função perda: fórmula matemática proposta por Taguchi para quantificar de forma monetária as economias oriundas da aplicação do DOE, e consequente redução da variação;

c) Padronização do DOE: utilização de Tabelas especiais, chamadas de arranjos ortogonais, que representam o menor experimento fatorial fracionado possível;

d) Análise de Sinal-Ruído (S/R): a relação sinal-ruído como uma métrica da robustez de um produto ou processo, permitindo analisar a relação entre a característica desejada e os indesejadas;

Para que se atinja bom desempenho em um sistema de engenharia, é necessário que os fatores de ruído sejam devidamente previstos e contornados, melhorando o desempenho da função ideal do sistema e, conseqüentemente, tornando-o robusto. O método de Taguchi propõe que a minimização da influencia exercida pelos fatores de ruído se de pelo correto ajuste dos fatores de controle (FOWLKES; CREVELING, 1995)

A tendência atual é criar produtos robustos, ou seja, insensíveis aos fatores de ruído, para alcançar a qualidade total (ARVIDSSON *et al.*, 2005).

Visto de uma forma ampla, o método de Taguchi é uma filosofia para o desenvolvimento de processos, produtos e garantia da qualidade além de diminuição de custos operacionais (FIOD, 1997).

### **2.2.2 Engenharia Robusta**

As perdas que surgem não se limitam em refugos de produção ou desperdícios diversos ao longo de um processo. Elas podem estar enraizadas no início do desenvolvimento do produto e expandir-se por retrabalhos e revisões de projeto ao longo de outras fases. Dessa forma, ganham importância e estratégias que levem ao desenvolvimento e fabricação de produtos uniformes e que, ao mesmo tempo, possam atender os requisitos do cliente e reduzir custos (ROSS, 1991).

Por Engenharia Robusta entende-se um conjunto de técnicas de engenharia para melhoria da eficiência no processo de pesquisa e desenvolvimento, cujo objetivo é obter produtos de alta qualidade, rapidamente e com baixo custo (Phadke, 1989)

Segundo Phadke (1989), a Engenharia Robusta pode ser entendida como uma abordagem da qualidade voltada para o desenvolvimento de um produto ou de um processo. Ele estabelece que qualidade é a resposta ideal de um produto esperada pelo cliente, todas as vezes que este é utilizado, sob diversas condições de operação ao longo de sua vida útil

Ross (1991) afirma que o principal objetivo da Engenharia Robusta é melhorar as características do produto e do seu processo de forma que os fatores que contribuem para a variação do produto final sejam minimizados de forma eficaz. Esses fatores são classificados em dois tipos: os fatores de controle e os fatores de ruído.

Para atingir o objetivo de um projeto Robusto tenta-se minimizar os efeitos das causas que causam a variabilidade, sem necessidade de interferir ou controlar essas causas, mas sim, alterando e/ou definindo outros parâmetros do projeto.

### 3 METODOLOGIA

O presente trabalho foi realizado em uma empresa de fabricação plástica e montagem de autopeças. Para a avaliação da peça em estudo foram realizadas visitas já na fase de vida série (período de produção e venda para o mercado). A peça em questão é um componente plástico de proteção à luz solar (Parasol), em que passa por demais processos após injeção, como a solda do PVC (material de revestimento, gerando o acabamento) e montagem de componentes.

O processo de união do PVC é realizado através de uma máquina de solda de alta frequência, que deve atender as especificações de qualidade e que exige resistência da solda à tração de no mínimo 50N. Assim a variação neste processo deve ser mínima para não gerar uso excessivo de materiais, altos custos de produção e atender as necessidades do cliente.

O componente selecionado encontrava-se no meio da fase de vida série. Inicialmente foram programados os ensaios em períodos que não atrapalhassem as demandas de produção. Dessa forma, 8 datas em períodos diferentes foram necessárias para retirada das amostras e os ensaios.

Segundo as especificações do projeto a peça possuía os seguintes requisitos: resistência da solda de 50N, isenção de contaminações e rebarbas, tolerâncias dimensionais  $\pm 0,2$  mm. Nos ensaios iniciais a quantidade de peças refugadas (scrap) por não conformidade foram de 7%, enquanto o aceitável seria de apenas 3%. Vale ressaltar que no momento da injeção plástica das conchas, é necessário o dimensionamento correto e perfeito acabamento das extremidades do contorno da peça, para que não haja rebarbas que possam dificultar a soldagem ou perfurar o revestimento de PVC após o tempo de espera de contração da peça (25h).

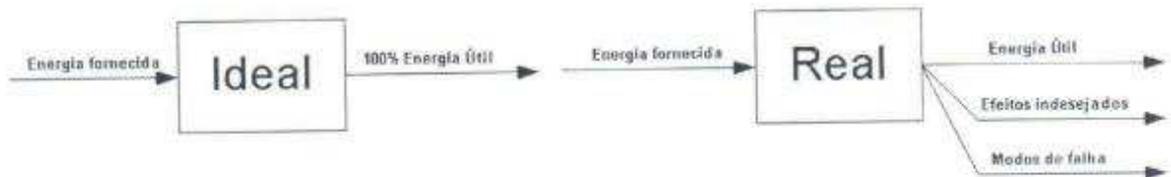
As avarias apresentadas ao longo do período de teste podem ser relacionadas aos parâmetros controlados da máquina de solda ou aos ajustes dos componentes da máquina.

### 3.1 Aplicação Engenharia Robusta

Aplicação da Engenharia Robusta: a principal função do processo é a produção dentro das condições de qualidade, buscando o maior número de peças conforme as especificações do projeto. Planejar processos de modo que o produto manufaturado fique tão próximo quanto possível das especificações-alvo desejadas, mesmo que algumas variáveis do processo (como temperatura), fatores ambientais (como umidade) ou características da matéria-prima não possam ser controlados com precisão (Montgomery, 2014)

Um dos objetivos da Engenharia de Produção é a identificação da função principal, modo de falha e efeitos indesejados é definir o processo de transformação, primeiramente na forma ideal, onde a energia de entrada é totalmente convertida em energia útil na saída da transformação, e em seguida, na forma real, onde a energia de entrada é convertida em energia útil, somada as perdas relacionadas aos efeitos indesejados e aos modos de falha, conforme Figura 7:

**Figura 7 - Processo de transformação nas formas ideal e real.**



**Fonte: Fowlkes e Creveling, 1995.**

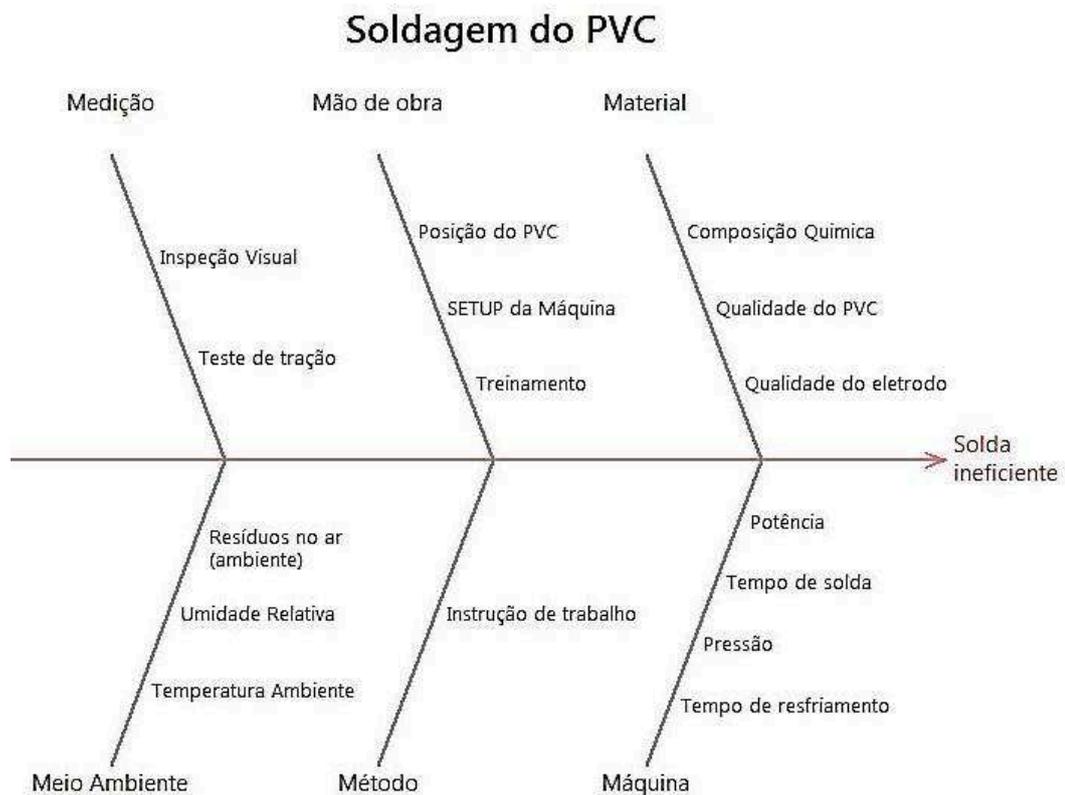
Para análise das condições apresentadas nos ensaios, foram realizados testes de resistência à tração por um dispositivo de alta precisão EMIQ.

### 3.1.1 Fatores de Controle e de Ruído

Fatores de controle são classificados como aqueles que podem ser especificados e/ou alteradas suas características. Dentre as variáveis pode-se citar, por exemplo, o material, tempo de ciclo ou temperatura do processo. As variáveis não controláveis são classificadas como ruído, por exemplo, temperatura ambiente, umidade relativa, etc. (EALEY, 1994).

Através de um Diagrama de Causa-Efeito, conforme Figura 8, foram definidas as variáveis que teriam grandes influências na solda ineficiente do PARASOL.

**Figura 8 - Diagrama de Causa e Efeito (variáveis do processo de soldagem do PVC)**



Fonte: Próprio Autor

Podemos definir então os fatores de controle do processo conforme Tabela 1:

**Tabela 1: Fatores, valores especificados e dados registrados (Laudo realizado na máquina EMIQ)**

<b>Fatores</b>	<b>LI</b>	<b>LS</b>
<b>Pressão</b>	60bar	90bar
<b>Potência</b>	7W/mm <sup>2</sup>	8W/mm <sup>2</sup>
<b>Tempo sob Pressão</b>	1s	1,5s
<b>Tempo de Resfriamento</b>	1s	1,2s

Fonte: Próprio Autor

O tempo de retardo se faz necessário para o aquecimento dos eletrodos, a potência é especificada pela ficha técnica e controlada através de uma chave seletora e depois se inicia a etapa de ajuste fino onde a potência é regulada conforme as condições existentes.

O tempo de solda é especificado de acordo com a necessidade de tempo que o material leva para ser soldado e a pressão exercida é pré-estabelecida em ficha técnica, porém, deve ser regulada de acordo com as condições existentes. Sendo assim, o ajuste ideal dos parâmetros deve colaborar com uma solda uniforme e sem avarias.

E os fatores Ruídos mostrados conforme Tabela 2, onde não podemos controlar, especificar e/ou alterar, podendo assim influenciar no desempenho do processo.

**Tabela 2: Fatores ruído identificados no processo**

<b>FATORES DE RUÍDO - NÃO CONTROLÁVEIS</b>
Temperatura Ambiente
Umidade relativa do ar
Presença de partículas de impurezas no ambiente

Fonte: Próprio Autor

Para que se atinja bom desempenho em um sistema de engenharia, é necessário que os fatores de ruído sejam devidamente previstos e contornados, melhorando o desempenho da função ideal do sistema e, conseqüentemente, tornando-o robusto. O método de Taguchi propõe que a minimização da influência exercida pelos fatores de ruído se dê pelo correto ajuste dos fatores de controle (FOWLKES, CREVELING, 1995).

### **3.1.2 Arranjos Ortogonais**

Os arranjos ortogonais foram desenvolvidos como uma ferramenta que ajuda na determinação de um número mínimo de experimentos para um determinado número de fatores, colaborando assim para evitar altos custos em experimentos que envolvem muitos fatores. O planejamento fatorial proporciona que em cada ciclo completo de experimento serão investigadas as combinações possíveis dos níveis e dos fatores.

Segundo Roy (2010), os AO de Taguchi são identificados pela letra 'L' seguida de um número que indica a quantidades de experimentos.

A Tabela 3 indica o número de níveis possíveis para cada fator e o número máximo de fatores.

**Tabela 3: Tipos de Arranjos Ortogonais**

Arranjo Ortogonal	Número de Ensaios	Número de Níveis	Número Máximo de Fatores
L4	4	2	3
L8	8	2	7
L9	9	3	4
L12	12	2	11
L16	16	2	15
L18	18	3	8
L27	27	3	13
L32	32	2	31

**Fonte: Ross (1991) – adaptado pelo autor**

Com os fatores de ruído e de controle já definidos, foi escolhido o arranjo ortogonal do tipo L8, conforme Tabela 3, e para conseguirmos rastreá-las no processo produtivo foram identificadas de acordo com cada combinação. Como já mencionado, as peças foram analisadas em um período de 1hr, onde foram produzidas 125 unidades para análise de controle estatístico.

Foi utilizado o software Minitab v17 para inserir os dados (módulo de Taguchi) e obter conforme Tabela 4 os parâmetros de controle para experimentos.

**Tabela 4: Parâmetros para experimentos gerado através do software Minitab V17 – Função Taguchi**

PRESSÃO	POTÊNCIA	TEMPO SOB PRESSÃO	TEMPO DE RESFRIAMENTO
60bar	7	1s	1s
60bar	7	1,5s	1,2s
60bar	8	1s	1,2s
60bar	8	1,5s	1s
90bar	7	1s	1,2s
90bar	7	1,5s	1s
90bar	8	1s	1s
90bar	8	1,5s	1,2s

**Fonte: Próprio Autor**

São considerados dois tipos mais comuns de análise, sendo eles, o efeito médio e análise de variância (ANOVA), ambos são complementares.

Observa-se através da Figura 9 que os pontos mais baixos do gráfico identificam quais variáveis representam a robustez do processo. Fazendo uma análise temos as seguintes informações:

- Pressão: sugere-se que a pressão a ser utilizada é a de 60bar, já que apresenta um resultado menor em relação à de 90bar.
- Potência: observou-se que a potência deve ser menor (7) para manter a eficiência da solda.
- Tempo de solda: o tempo sob pressão se faz necessário a 1,0s, visto que o perímetro de solda do PARASOL é mais uniforme e eficiente.
- Tempo de Resfriamento: a eficiência das outras variáveis faz com que o tempo de resfriamento tenha um desempenho eficiente em 1,2s de modo que a solda seja finalizada no tempo exato.
- Testes confirmatórios foram realizados seguindo os parâmetros sugeridos:  
(Pressão: 60bar, Potência: 7W/mm<sup>2</sup>, Tempo sob Pressão: 1,0s e Tempo de Resfriamento: 1,2s.)

**Tabela 5: Experimentos e Resultados:**

EXPERIMENTOS	PRESSÃO	POTÊNCIA	TEMPO SOB PRESSÃO	TEMPO DE RESFRIAMENTO	PEÇAS REFUGADAS
1	60bar	7W/mm <sup>2</sup>	1s	1s	84
2	60bar	7W/mm <sup>2</sup>	1,5s	1,2s	86
3	60bar	8W/mm <sup>2</sup>	1s	1,2s	87
4	60bar	8W/mm <sup>2</sup>	1,5s	1s	1056
5	90bar	7W/mm <sup>2</sup>	1s	1,2s	90
6	90bar	7W/mm <sup>2</sup>	1,5s	1s	107
7	90bar	8W/mm <sup>2</sup>	1s	1s	1056
8	90bar	8W/mm <sup>2</sup>	1,5s	1,2s	1056
Parâmetro sugerido	60bar	7W/mm <sup>2</sup>	1s	1,2s	27

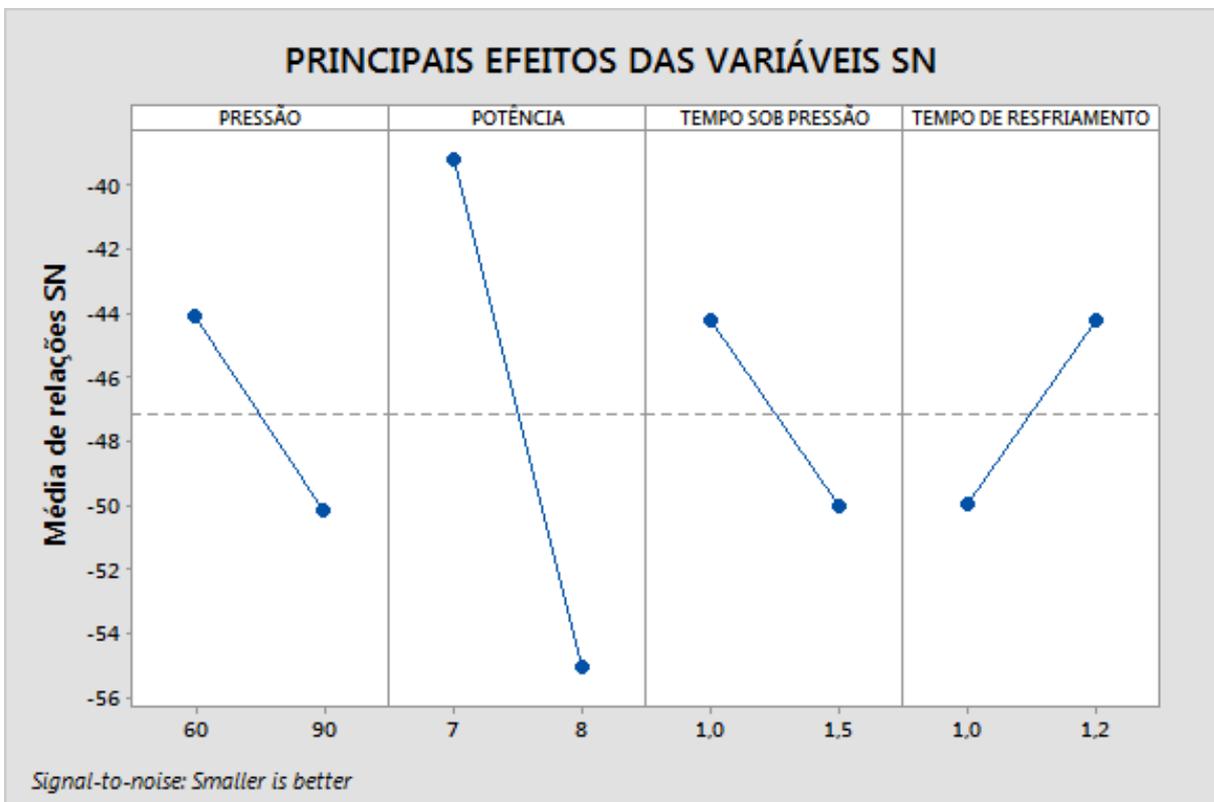
**Fonte: Próprio Autor**

A Tabela 5 apresenta os resultados, em quantidade de peças refugadas, por combinação de parâmetros. Por fim a combinação sugerida no gráfico menor-melhor foi aplicada e comprovou eficácia com o baixo número de refugos em relação aos demais.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após análise dos experimentos realizados, foi possível identificar a melhor combinação de parâmetros, conforme mostra a Figura 9, onde o menor valor corresponde a melhor relação sinal ruído:

**Figura 9 – Combinação de parâmetros em relação aos limites superiores e inferiores**



Fonte: Próprio Autor

Estes valores geraram as amostras mais precisas e estáveis dentro do estudo, embora os testes 3 e 4, conforme mostra a Figura 10, tenham apresentado resultados eficientes, os valores de resistência à tração são muito altos e menos estáveis, o que implica diretamente no aumento do tempo de ciclo e logo no custo de produção. Lembrando que a especificação mínima de resistência à tração deve ser de 50N.

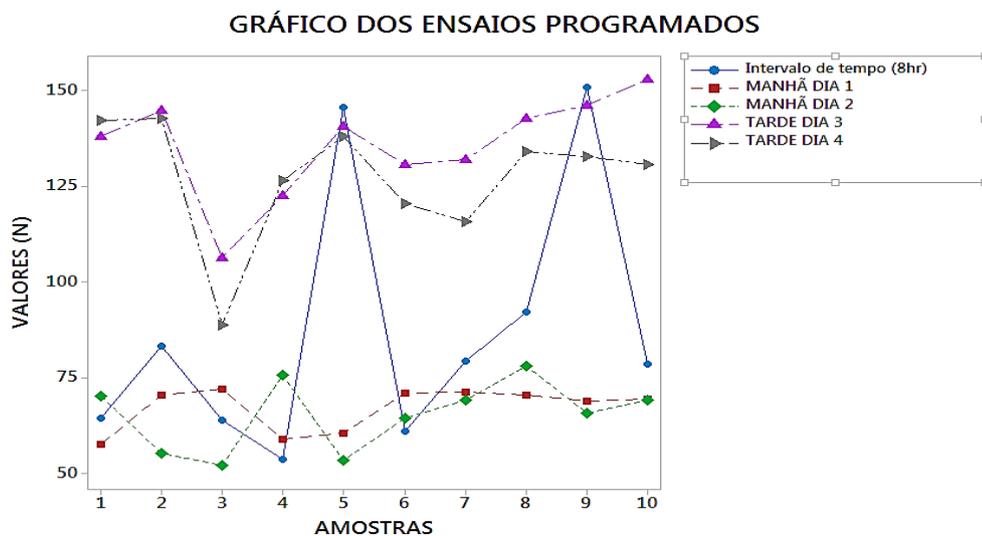
A combinação ideal apresentou redução de peças com não conformidade de 5,4% para 2,6%, seguindo o objetivo inicial de obter maior estabilidade no processo

através da aplicação do método de Taguchi e DOE (*Design of experiments*). Após definida a melhor combinação de parâmetros, foi avaliado o gráfico que apresenta os fatores controláveis de maior influência na qualidade e estabilidade do processo, também os mais sensíveis na melhoria da solda, sendo eles Potência e Pressão. Com isso foi sugerida a calibração periódica dos instrumentos de medição dos mesmos, devido ao alto volume de produção diária.

A realização de experimentos em diferentes horários do turno durante 5 dias foi imprescindível para evidenciar o principal fator, sinal/ruído (não controlável), responsável por alta taxa de variação no processo, sendo a temperatura ambiente. Ao analisar os resultados das amostras produzidas, sob os mesmos parâmetros, mas em horários diferentes, foi notável a influência da temperatura na instabilidade do processo, que pela manhã apresenta menor intensidade e ao longo do dia ganha calor gradativo. Conforme apresenta o gráfico da Figura 10.

O que comprova tal influência é a comparação das amostras produzidas em curto espaço de tempo em relação às amostras produzidas em longos espaços de tempo, no caso durante um turno inteiro de produção, onde a variação da temperatura alcançou amplitude de 8,3º Celsius.

**Figura 10 - Comparação de resultados entre os experimentos por períodos:**



Fonte: Próprio Autor

## 5 CONCLUSÕES

Conclui-se através deste estudo a importância da Engenharia Robusta no processo produtivo e o seu impacto direto na qualidade. O objetivo do trabalho foi obter melhoria na qualidade de uma peça de proteção e segurança ao cliente, produzida através de injeção plástica (polipropileno) e revestida de PVC (vinil), por meio da estabilidade do processo de soldagem do vinil.

Para realizar o mesmo foi aplicado o planejamento de experimentos, com base nos métodos propostos por Taguchi para encontrar a melhor combinação de parâmetros do processo, soldagem por alta frequência. Assim como o método de Genichi Taguchi, o DOE (*design of experiments*) baseado na publicação de Montgomery 2014, também apresentou relevante eficácia no planejamento de experimentos, dentre outros autores citados ao decorrer do trabalho que também influenciaram na aplicação e interpretação das ferramentas propostas.

A relação entre os conhecimentos dos autores tornou o estudo mais eficiente, de tal forma que o número reduzido de experimentos pôde apresentar ao processo uma combinação eficaz que chamamos de parâmetros ótimos, sendo eles, pressão em 60bar, potência em  $7W/mm^2$ , tempo de solda em 1,0 segundo e tempo de resfriamento em 1,2 segundos. Os ganhos com a aplicação de tal metodologia foram de grande impacto na quantidade de peças refugadas (scrap), além de atingir qualidade necessária que comprova estabilidade no processo.

Através da análise de variância afirma-se que no processo, os parâmetros de pressão e potência são os maiores responsáveis e apresentaram principal influência na melhoria da solda, sendo também os sinais de entrada mais sensíveis à variação. Portanto sugerimos manutenção periódica preventiva para garantir a medição correta e manter o processo estável.

Analisa-se os resultados, conclui-se que a variação da qualidade das amostras está principalmente ligada a exposição do processo à temperatura ambiente. Enquanto os testes realizados em curto espaço de tempo apresentaram resultados próximos e estáveis, (pequena variação de temperatura), os testes realizados em espaço ampliado de tempo apresentaram resultados dispersos e instáveis, (grande variação de temperatura), o que comprova a sensibilidade do

processo quando exposto ao fator temperatura ambiente. Com isso conclui-se que a etapa de revestimento do Parasol deve ser confinada a um ambiente de temperatura controlada (entre 17º e 19º Celsius), já que os melhores resultados foram provenientes dos experimentos realizados nas primeiras horas da manhã onde a variação de temperatura esteve dentro dos valores propostos.

## REFERÊNCIAS

ARVIDSSON, M. et al. **An operationalization of robust design methodology**. 1 Introduction 2 Background. *International Journal*, n. 2003, 2005.

FIOD, N. **M. Taguchi e a Melhoria da Qualidade: Uma Releitura Crítica**. Editora da UFSC. Florianópolis, 1997.

FLAWS, M. **Welding handbook: Materials and application**. American Welding Society, 1996.

GRUENSPECHT, M. HOPPER, T. **Rf welding device**. *US Patent*. 2006.

HOJO, Taisuke. **Quality Management Systems - Process Validation Guidance**. 2. ed. Global Harmonization Task Force, 2004. Disponível em: <<http://www.imdrf.org/docs/ghtf/final/sg3/technical-docs/ghtf-sg3-n99-10-2004-qms-process-guidance-04010.pdf>>. Acesso em: 07/05/2017

JERONIMO, J. L. **Modelagem de máquinas de solda por indução eletromagnética em RF**. Campinas, SP, 2009.

MERCER, J.; SLATE, S. **The role of graphite in a quality edm finish**. *MoldMaking Technology*.2008.

MONTGOMERY, D. C. **Introdução ao controle estatístico da qualidade**. 4ª ed. LTC, 2014.

NORTH, T. H.; RAMARATHNAM, G. **Welding of plastics**. ASM Handbook. Vol. 6, Welding, Brazing, and Soldering, 1993.

PHADKE, M.S **Quality engineering using robust design**. New Jersey, Prentice Hall Inc., 1989.

RODRIGUES, M. V. **A experiência de Taguchi**. 2016. Disponível em: <<http://www.marcusvinciusrodrigues.com.br/LinkClick.aspx?fileticket=9nPr5GRzm1s%3D&tabid=92&portalid=0&mid=480&language=pt-BR&forcedownload=true>>. Acesso em: 20/11/2017

ROSS, P.J. **Aplicação das técnicas de Taguchi na engenharia da qualidade**. São Paulo: Makron Books do Brasil, 1991.

ROY, R K. A primer on the Taguchi Method, 2<sup>nd</sup> Edition. New York: Van Nostrand Reinhold, 2010.

TAGUCHI, G.; CHOWDHURY, S.; TAGUCHI, S. **Robust engineering: Learn How to Boost Quality While Reducing Costs & Time to Market**. McGraw-Hill, 1999.

ULRICH, K.T.; EPPNGER, S. D. **Product design and development**. New York: McGraw Hill, 1995.

WEESE, D. L. **Conducting Process Validations with Confidence**. Medical Device & Diagnostic Industry Magazine, vol. 20, n. 1, p.107-112, 1998.

-