



Reconectando Pessoas,
Ciências, Artes e
Tecnologia

Anais do

XI Congresso de Engenharias da UFSJ

Part of ISSN 2237-0358

Conteúdo disponível em: doi.org/10.29327/1317088.11-1



APLICAÇÃO DO MÉTODO DE ANÁLISE DOS MODOS E EFEITOS DAS FALHAS NO PROCESSO DE SOLDAGEM ULTRASSÔNICA EM UMA PEÇA TERMOPLÁSTICA

Roberta Cristine Moreira Rosa ⁽¹⁾ (robertacmrosa@hotmail.com)

Eduardo Miguel da Silva ⁽¹⁾ (eduardosilva@ufs.br)

⁽¹⁾ Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ) - Departamento de Engenharia Mecânica – Minas gerais, Brasil

RESUMO: O presente estudo de caso realiza a aplicação da metodologia FMEA no processo de soldagem ultrassônica em uma peça plástica. Foi desenvolvido com o objetivo de diagnosticar possíveis modos e efeitos de falha no processo de fabricação do produto, tendo em vista a detecção prévia de falhas no processo de soldagem durante as fases iniciais do projeto. Para tanto, foi necessário aplicar a metodologia FMEA no processo de soldagem ultrassônica dos componentes que compõe a jarra do liquidificador, classificar cada modo e efeito de falha conforme a severidade, ocorrência e detecção em busca de seu número de prioridade de risco (RPN), apresentar uma escala de prioridades para implantação de medidas de controle, e por fim elaborar um plano de ação para estabelecer soluções do problema relativo a causa principal aplicáveis a cada modo de falha conforme seus prazos e responsáveis. Realizou-se, assim, uma pesquisa sobre o processo de soldagem pelo método de ultrassom em termoplásticos e o desenvolvimento e aplicação da ferramenta FMEA, cujos dados foram interpretados por meio da abordagem qualitativa. Diante disso, ao identificar modos e efeitos de falha, ficou claro que medidas simples podem melhorar a qualidade, confiabilidade e segurança dos processos, reduzindo riscos e custos.

PALAVRAS-CHAVE: FMEA, Soldagem ultrassônica, Peças termoplásticas.



Os autores são os únicos detentores dos direitos autorais.

São João del-Rei, Minas Gerais, Brasil

25-29 de setembro de 2023

[B.L. Resende](#), [C.M. Vale](#) & [R.J. Silva](#) (Organização & Edição)

1. INTRODUÇÃO

No mercado atual, as empresas buscam por processos cada vez mais seguros, visto que à alta competitividade e as necessidades dos clientes estão mais exigentes. Logo, é preciso que as instituições invistam em melhorias constantes em seus processos de produção com o objetivo de atender as demandas do mercado consumidor (COUTINHO, 2021).

Ao longo dos anos, o avanço dos estudos de diversos tipos de materiais possibilitou a substituição de peças de metal ou vidro por insumos plásticos na indústria de eletrodomésticos. Pois, os termoplásticos apresentam resistência à corrosão, baixo peso, facilidade para a limpeza, além de oferecer possibilidades para a criação de designs diferenciados e apresentar custos mais atraentes (PLASTFRIO, 2021). Desse modo, conforme Mundo do Plástico (2017), devido as diversas configurações de produtos faz-se necessário o uso de métodos para união desses materiais plásticos, sendo assim, para essa finalidade é indicado a soldagem ultrassônica pois dispõe de um processo econômico e eficiente para a união de peças em série feitas de termoplásticos.

A aplicação de soldagem em componentes é uma das principais técnicas utilizadas nos processos de fabricação industrial. Dessa maneira, para um desempenho satisfatório da operação da máquina ou mecanismo, é apropriado a excelência de sua execução, pois as falhas operacionais refletem em altos custos relativos aos retrabalhos (NEUPLAST, 2019).

A identificação prévia das possíveis falhas nos processos e seus respectivos efeitos, permite a identificação e solução de suas causas básicas resultando em um sistema de melhoria contínua que visa aperfeiçoar o fluxo de produção com o propósito de entregar aos clientes produtos seguros e confiáveis. A metodologia FMEA (*Failure Mode and Effect Analysis*) é uma importante ferramenta empregada em processos e produtos de diversos ramos industriais cujo objetivo é identificar possíveis falhas e analisar seus efeitos para rastrear e diagnosticar suas causas básicas (PARANHOS *et al.*, 2016).

Portanto, o presente trabalho visa demonstrar a aplicação da metodologia FMEA ao processo de soldagem ultrassônica em uma peça plástica com o intuito de identificar os modos e efeitos de falhas em seu processo de fabricação, a fim de buscar soluções e elaborar um plano de ação eficiente. Dessa maneira, a ferramenta aplicada tem como objetivo garantir que o processo esteja em conformidade com o escopo do projeto.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Soldagem ultrassônica

O ultrassom é um ramo da acústica cuja a geração e uso de ondas acústicas inaudíveis é um campo amplo. Apesar do limite superior audível de frequência em humanos varie com a idade e outros fatores, normalmente é em torno de 20 kHz (GALLEGO-JUAREZ e GRAFF, 2014).

O estudo do ultrassom em aplicações de alta intensidade de potência é conhecido como ultrassônico de potência. É campo que tem como objetivo examinar o ultrassom para alterar permanentemente as propriedades físicas, químicas ou biológicas dos materiais ou sistemas aos quais podem ser aplicados. As aplicações de alta potência possuem frequências de operação que variam entre 20 e 100 kHz, embora algumas possam ser tão baixas quanto 10 kHz e tão altas quanto 500 kHz, (GALLEGO-JUAREZ e GRAFF, 2014).

A soldagem ultrassônica é um processo ultrarrápido de união de termoplásticos, compósitos termoplásticos e metais, e funciona com o princípio de aplicação da vibração de alta frequência e baixa amplitude na interface das superfícies a serem soldadas. Esse método se enquadra na categoria de soldagem por fricção, visto que a aplicação de uma força de solda ao mesmo instante das vibrações ultrassônicas resultam no atrito entre as superfícies (BHUDOLIA *et al.*, 2020).

Segundo Bhudolia *et al.* (2020), a soldagem por ultrassom possui diversas vantagens em relação a outras metodologias de colagem por fusão, de modo que a alta resistência da solda pode ser obtida, enquanto a soldagem é concluída em poucos segundos, sem qualquer influência do material, conforme exigido em outros métodos de soldas.

2.1.1. Fundamentos do processo

A técnica de soldagem por ultrassom é empregue na união de materiais de mesma natureza tais como, metal-metal e termoplásticos com termoplásticos. Além de materiais dissimilares como metal com termoplásticos e juntas de termoplásticos para termorrígidos (BHUDOLIA *et al.*, 2020). A ferramenta de soldagem acopla a uma das peças a serem soldadas e segue em direção a outra parte que permanece imóvel, logo em seguida ambas são simultaneamente pressionadas e unidas (PEREIRA JÚNIOR, 2013).

A soldagem ultrassônica possui dois métodos: soldagem ultrassônica de plástico e soldagem ultrassônica de metal. Conforme Pereira Júnior (2013), a soldagem por ultrassom de plásticos é

originada a partir da elevação térmica na região da solda, pois estas são produzidas através da absorção das vibrações mecânicas em alta frequência, ao mesmo instante que ocorre a reflexão das vibrações na área solda e da fricção das superfícies a serem soldadas. As vibrações produzidas pela ferramenta, nesse método, são introduzidas verticalmente. Enquanto a soldagem por ultrassom de metais ocorre devido a aplicação de pressão associada as vibrações mecânicas na direção horizontal. A ferramenta esfrega, uma sobre outra, as peças a serem soldadas sob pressão e não martela o material, como no método de ultrassom em plásticos, com a finalidade para elevar sua temperatura e plastificar-se. Dessa forma, a Figura 1 representa o processo de soldagem ultrassônica em plástico e metal.

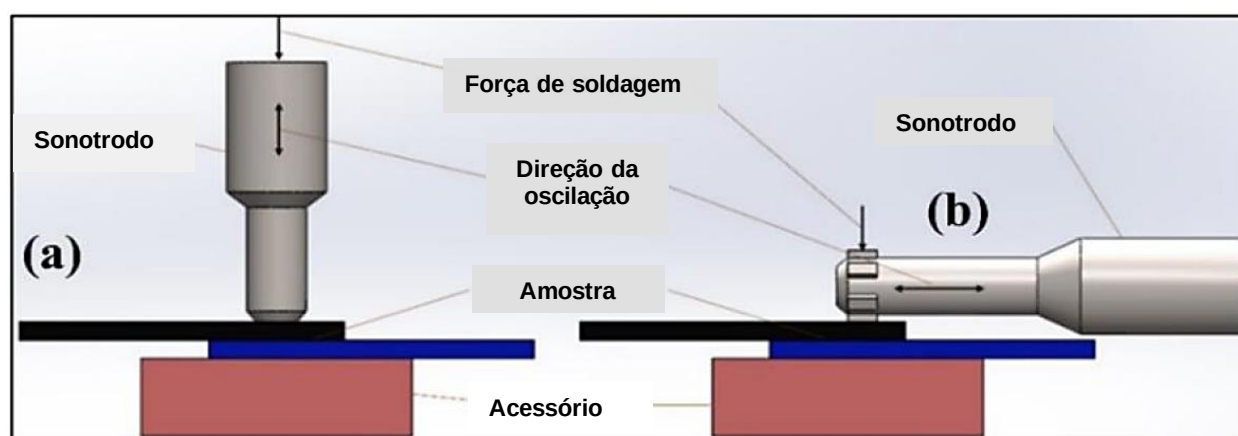


FIGURA 1. Tipos de soldagem ultrassônica: (a) soldagem ultrassônica de plástico, (b) soldagem ultrassônica de metal.

2.1.2. Soldagem ultrassônica em plásticos

Na soldagem ultrassônica de termoplásticos e compósitos termoplásticos, as vibrações mecânicas possuem alta frequência e baixa amplitude para que resultem no aquecimento interfacial, responsável pela união por fusão de componentes (GALLEGO-JUAREZ e GRAFF, 2014). Segundo Troughton (2008), a técnica de soldagem por ultrassom é a mais rápida conhecida, com tempos de soldagem ocorrerem, aproximadamente, entre 0,1 e 1,0 segundos. Essas vibrações mecânicas aplicadas em termoplásticos podem ser aproveitadas em processos de soldagem, rebiteamento, inserção de buchas metálicas, corte e costura de tecidos sintéticos (CUSTÓDIO e LIMA, 2002).

Quando duas peças estão pressionadas, normalmente, elas não entram em completo contato na interface devido à rugosidade. Porém, segundo Troughton (2008), quando esta peça é submetida a vibrações ultrassônicas, ondas estacionárias senoidais são geradas no material. Sendo uma parcela dessa energia dissipada por atrito intermolecular, gerando um acúmulo de calor no material a granel, e a outra parcela transmitida para a interface da junta, onde o atrito causa aquecimento local.

A vibração dinâmica quando é sobreposta à pressão, resulta na dissipação de parte da vibração mecânica na forma de calor, pois as asperezas entre peças sofrem deformação cíclica. Sendo assim, essa vibração quando é aplicada funde as asperezas e superfícies das peças, devido à pressão produzir um contato íntimo entre superfícies, ao mesmo tempo que ocorre uma fusão intermolecular e emaranhamento das macromoléculas poliméricas. Por fim, a vibração é interrompida e sob pressão o material fundido é solidificado (GALLEGO-JUAREZ e GRAFF, 2014). A Figura 2 representa o sistema de soldagem ultrassônica de plásticos.

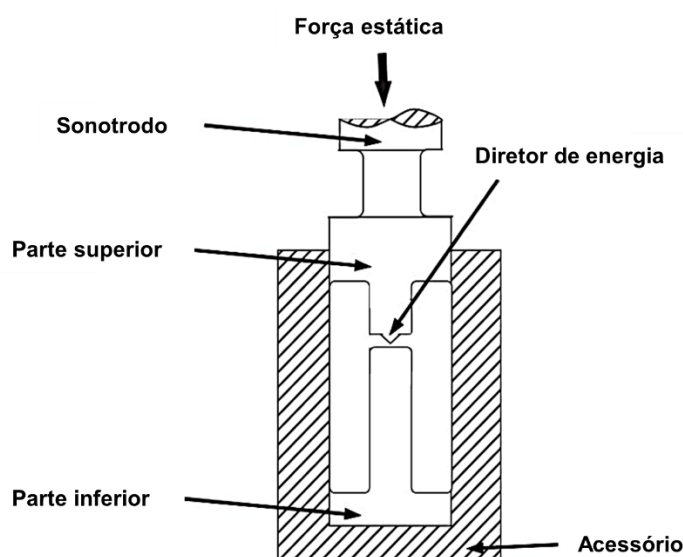


FIGURA 2. Sistema de soldagem ultrassônica de plásticos.

De acordo com Troughton (2008), a transmissão ideal da energia ultrassônica e o modo do processo de fusão dependem da geometria e características de absorção ultrassônica do material. Além disso, para que a energia perdida por absorção seja mínima é sugerido que a fonte das vibrações esteja bem próxima à articulação, ou seja, uma mínima distância entre o diretor de energia e a interface a ser soldada.

2.1.3. Parâmetros de soldagem

Durante o processo de soldagem por ultrassom alguns parâmetros de processamento são importantes para a aplicação desse método. Conforme Troughton (2008), devem-se considerar o tempo em que as vibrações são aplicadas, ou seja, o tempo de solda; a força ou pressão de solda; o tempo permitido para resfriamento e solidificação após a vibração ter cessado que é nomeado tempo de espera; a força de retenção; a força de gatilho que é a força aplicada à peça antes que as vibrações ultrassônicas sejam iniciadas e por último, o nível de potência e amplitude de vibração. Para uma soldagem eficiente, a buzina deve ser posicionada corretamente em contato com a parte superior, pois essa não pode entrar em contato com a peça após o início das vibrações.

2.2. Modo e efeito da falha - FMEA

Um FMEA (*Failure Mode and Effect Analysis*), ou análise de modo e efeito de falha, é uma técnica sistemática e metodológica para identificar e prevenir problemas de produtos e processos antes que eles ocorram. Esse método tem como objetivo prevenir defeitos, aumentar a segurança e garantir a satisfação do cliente. Embora a realização de um FMEA em produtos e processos existentes possa fornecer benefícios substanciais, é ideal que sejam conduzidos nos estágios de projeto do produto ou desenvolvimento do processo (MCDERMOTT, MIKULAK e BEAUREGARD, 2009).

Os primeiros FMEAs foram desenvolvidos na indústria aeroespacial na década de 1960 e tinham como foco questões de segurança. Em pouco tempo, a ferramenta tornou-se fundamental para melhorar a segurança, prevenindo a ocorrência de acidentes e incidentes, especialmente nas indústrias de processos químicos. Em busca de aperfeiçoar o processo da análise de possíveis falhas, a ferramenta padroniza a abordagem e estabelece uma linguagem comum que pode ser aplicado por funcionários técnicos e não técnicos de todos os níveis dentro de uma empresa. Sendo assim, devido sua eficiência e fácil aplicabilidade, a indústria automotiva adaptou a técnica FMEA para uso como ferramenta de melhoria da qualidade (MCDERMOTT, MIKULAK e BEAUREGARD, 2009).

Em essência, para Stamatis (2003), a metodologia utilizada no FMEA é capaz de examinar os diferentes modos pelas quais uma falha pode ocorrer. E assim, a cada falha identificada é realizada uma análise e estimativa de seu potencial efeito no sistema total, projeto, processo ou serviço por meio de sua gravidade, ocorrência (frequência) e de sua detecção. A ferramenta identificará as

ações corretivas necessárias, evitando que as falhas cheguem ao cliente, a fim de assegurar uma maior durabilidade, qualidade e confiabilidade possível em um produto ou serviço.

As falhas não se limitam a problemas com o produto, elas também podem ocorrer quando o usuário comete um erro, esses tipos de falhas também devem ser incluídos no FMEA. Pois o objetivo é garantir que o produto funcione corretamente, independentemente de como o usuário os opera (MCDERMOTT, MIKULAK e BEAUREGARD, 2009).

De acordo com McDermott, Mikulak e Beauregard (2009), ao contrário de muitas ferramentas da qualidade, a técnica de FMEAs não exige estatísticas complicadas e podem resultar em economias significativas para uma empresa e, ao mesmo tempo, reduzir a responsabilidade onerosa potencial de um processo ou produto que não atende seus requisitos. Sendo assim, a Tabela 1 aponta os diversos pontos positivos para a aplicação da metodologia FMEA.

TABELA 1 . Os pontos positivos para o uso do FMEA.

Aplicabilidade e adaptabilidade	→	O FMEA pode ser aplicável a qualquer organização e negócio, bem como qualquer processo.
Realização do processo completo de Gestão do Risco	→	É o único método capaz de viabilizar essa gestão de modo integral.
Método analítico e estruturado	→	Capaz de “fatiar” uma grande questão, como é um negócio, até um nível de fácil tratamento, numa sequência lógica e de simples aplicação.
Independente da efetiva existência do processo e de recursos técnicos e materiais	→	É baseado apenas na existência de uma equipe multidisciplinar experiente.
Possibilita a avaliação, cálculo e priorização do risco	→	A gestão do risco é inerente ao FMEA e representa o núcleo central de seu funcionamento.
Permite monitorar o tratamento dos riscos, registro das ações e melhoria	→	O FMEA controla o processo de Melhoria no nível de risco do processo e da organização.
Aplicável à avaliação de riscos positivos ou oportunidades	→	O método FMEA pode ser utilizado para gerenciar as oportunidades.

O fator mais importante para a implantação da metodologia com sucesso é o momento em que ela é executada, pois a FMEA deve ser uma ação antes do evento e não após o fato. Já que a ferramenta deve ser realizada antes de um modo de falha de projeto ou processo ter sido

identificado no produto. Durante o período de desenvolvimento de um produto, é ideal que alterações de processo ou projeto sejam modificadas ou implementadas no início dessa etapa, visto que é mais fácil a alteração e com menores custos. Sendo assim, após as definições das etapas da estrutura do projeto é desejável ser desenvolvido e iniciado o FMEA, pois aliviará as crises provocadas por alterações tardias (MOURA, 2000).

A análise de avaliação do FMEA pode ter dois modelos de ação: os dados históricos e a estatística inferencial. Através dos dados históricos é possível ter registrado dados semelhantes para produtos e/ou serviços, dados de garantia, reclamações de clientes e qualquer outra informação adequada disponível, para definir falhas. Já em relação a estatística inferencial, aplicações da modelagem matemática, simulações, engenharia simultânea e confiabilidade podem ser usada para identificar e definir as falhas (STAMATIS, 2003).

Qualquer FMEA conduzido de maneira adequada e apropriada proporcionará informações úteis ao profissional que podem reduzir a carga de risco no sistema, projeto, processo e serviço. Pois através de um método lógico e progressivo de análise de falhas potenciais é possível permitir que a tarefa seja executada de forma eficaz. E para esse propósito, segundo Stamatis (2003), um bom FMEA deve conter:

- Modos de falha conhecidos e potenciais
- As causas e efeitos de cada modo de falha
- Priorizar os modos de falha identificados de acordo com o risco número de prioridade (RPN), por meio da frequência de ocorrência, gravidade e detecção
- Fornecer o acompanhamento de problemas e ação corretiva

Portanto, a qualidade dos produtos e serviços deve ser prioridade para a execução de um projeto para alcançar a satisfação do cliente. E isso ocorre por meio das melhorias aplicadas a fim de ou reduzir falhas, erros, custos e assim por diante que resultem em má qualidade do produto fornecido (STAMATIS, 2003).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Caracterização do Estudo

O presente estudo de caso foi realizado em uma empresa de eletrodomésticos, sendo um caso ocorrido durante o processo para a fabricação de um novo produto. Portanto, este estudo foi

aplicado ao processo de fabricação da jarra do liquidificador, no qual é injetado em duas partes e unidos pelo método de soldagem ultrassônica.

Durante o projeto do novo liquidificador foi definido o uso da soldagem ultrassônica para unir peças que compõem a jarra do aparelho. Pois, devido sua geometria, torna-se complexo a injeção de uma única peça, desse modo, a jarra foi desmembrada em duas partes, ou seja, copo e tampa da alça do copo. Portanto, foi realizado um FMEA do processo da soldagem ultrassônica nas peças que constituem a jarra do liquidificador, a fim de prevenir defeitos, aumentar a segurança e garantir a satisfação do cliente.

3.2. Procedimentos Experimentais

O projeto da jarra do novo liquidificador teve como característica principal a facilidade do processo de fabricação, já que não necessita de moldes complexos para a injeção do material plástico, composto por resina SAN no copo e ABS na tampa da alça do copo, ou métodos de soldagem ineficientes que podem apresentar contaminantes na região de solda, enfraquecendo a união das peças plásticas.

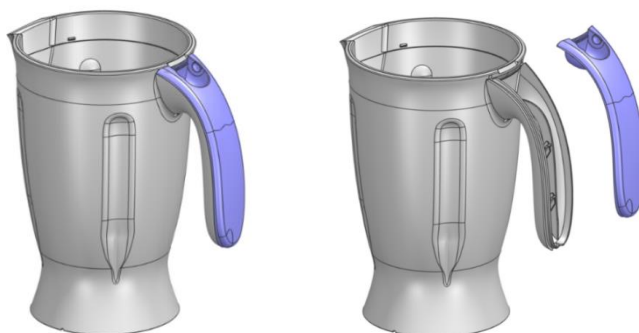


FIGURA 3. Desenho 3D do projeto do liquidificador.

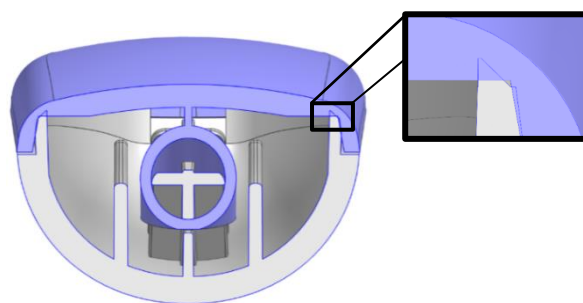


FIGURA 4. Desenho 3D do local em que o diretor de energia é introduzido/soldado na peça.

Desse modo, o mecanismo escolhido para o procedimento de união de duas peças plásticas foi a máquina de soldagem ultrassônica do modelo US 200A fornecida pela USPS, sendo um equipamento simples dentro de sua categoria, porém ideal para soldar peças de grande porte e termoplásticos. As especificações da ferramenta de solda estão apresentadas na Tabela 2.

TABELA 2. Especificações da máquina de solda do modelo US 200A.

Alimentação	Frequência de trabalho	Potência real	Alimentação Pneumática	Curso do aturador
220 V	19,1 kHz 20 kHz	2000 W	6,0 kgf/cm²	80 mm

Tempo de soldagem	Tempo de resfriamento	Retardo de disparo	Altura útil	Dimensão aproximada	Peso
0,1 ~ 5,0s	0,1 ~ 1,5s	0,1 ~ 1,5s	450 mm	760 x 600 x 1800 mm	150 kg

Devido a geometria da alça da jarra, a máquina teve de ser adaptada junto ao fornecedor para que fosse capaz de realizar a soldagem em um único processo, sendo assim foi introduzido ao equipamento dois sonotrodos que trabalham simultaneamente conforme a Figura 5.



FIGURA 5. Máquina de soldagem ultrassônica.

Para o lançamento de um novo produto é de extrema importância a prevenção das possíveis falhas que podem vir a ocorrer durante o processo de planejamento e fabricação. Um projeto possui várias fases durante seu ciclo de vida, e ao longo da etapa de planejamento é definido o modo do

processo de produção, ou seja, os diferentes aspectos da cadeia de fabricação do processo, desde as matérias-primas aos componentes, à fabricação e montagem, até a expedição. Logo, por possuir processos longos, pode ser complexo trabalhar em toda sua totalidade, e assim é oportuno dividir as várias etapas em sub processos, visto que é considerado uma boa estratégia a fim de garantir a realização de uma análise completa e profunda.

O presente estudo de caso foi aplicado ao processo de fabricação da jarra do liquidificador, no qual é injetado em duas partes e unidos pelo método de soldagem ultrassônica. As etapas para produção do produto são compostas por silo (material), injetora, soldagem e estoque, distribuídas conforme o fluxo representado na Figura 6.

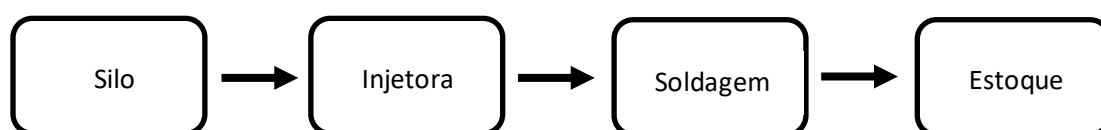


FIGURA 6. Fluxograma do processo de fabricação da jarra do liquidificador.

Para a produção do FMEA de processo, o responsável pelo desenvolvimento da metodologia definiu uma equipe constituída pelo líder do projeto, projetistas, engenheiros de processos e qualidade, além dos soldadores. Todos os participantes em algum momento de sua vida profissional na empresa já participaram de FMEAs semelhantes, sendo assim, possuem experiência e dados para a realização eficiente da aplicação dessa ferramenta.

A primeira etapa do FMEA foi uma reunião para o brainstorming. O responsável pelo FMEA elaborou e compartilhou a sua equipe o escopo com os objetivos do FMEA para que compreendessem o que seria analisado por todos. A partir disso, foram discutidos os possíveis modos de falha dessa soldagem, e assim todas as sugestões levantadas foram anotadas para uma avaliação mais profunda nas etapas seguintes. Em sequência, foram debatidos os efeitos potenciais referente a cada modo de falha apresentado anteriormente.

As informações coletadas foram suporte para o processo de elaboração de um plano de ação, em que medidas de controle foram estabelecidas e aplicáveis a cada modo de falha identificados e seus referentes prazos e responsáveis por aplicar tais medidas. Por fim, todos os modos de falhas e efeitos potenciais, e seus respectivos planos de ação foram devidamente registrados na planilha de FMEA do processo de soldagem da jarra do liquidificador.

Com base nas informações sobre os modos e efeito de falha, é preciso referenciar-se em uma escala de prioridade para implementação das ações a serem tomadas no gerenciamento do processo. Para tanto, foram apresentadas as tabelas de referência da empresa atribuindo as classificações de severidade, ocorrência e detecção, visto que após as análises, essas serão primordiais para a definição do RPN.

A pontuação distribuída entre os itens de severidade, ocorrência e detecção seguem uma escala 1 a 10 pontos. Conforme a tabela 3, para a severidade das falhas, a distribuição dos pontos baseou-se de forma qualitativa na experiência de vários processos da empresa.

TABELA 3. Severidade das consequências.

Severidade - FMEA de processo		
Gravidade estimada do efeito para o processo de fabricação		
Nível	Critério de avaliação	Explicação detalhada
10	Não cumprimento dos requisitos de segurança	Pode colocar em risco o operador ou usuário
8	Grande interrupção	100% do produto pode ter que ser descartado. Desligamento da linha ou parada do embarque ou Perda ou degradação da função primária do produto
5	Interrupção moderada	Todo ou parte do ciclo de produção pode ter que ser retrabalhado off-line e aceito ou Perda ou degradação da função secundária do produto
3	Interrupção menor	Todo ou parte do ciclo de produção pode ter que ser retrabalhado na estação antes de ser processado ou A falha causará apenas uma leve insatisfação ou aborrecimento do usuário
1	Sem efeito	Nenhum efeito perceptível

Em relação à distribuição da probabilidade de ocorrência, foi utilizado como base o histórico da taxa da produção de produtos semelhantes. A tabela 4 foi utilizada para definir a pontuação de cada modo de falha identificado.

TABELA 4. Probabilidade de Ocorrência.

Ocorrência - FMEA de processo			
Probabilidade estimada de ocorrência por vida útil do produto, com base nos controles atuais de prevenção; Resultados dos procedimentos de verificação (revisão, análise, simulação, teste) ou rendimento, reclamações de clientes, taxa de falha ou de um processo comparável destinado a prevenir uma falha			
Nível	Critério de avaliação	Explicação detalhada	Taxas de falha prováveis*
10	Muito alto	Nova tecnologia/novo design sem história.	$\geq 10\%$ (1 em 10)
8	Alta	A falha é provável com novo projeto, nova aplicação ou alteração no ciclo de trabalho/condições de operação. Nenhuma regra de design, suportando resultados experimentais ou de modelagem de design disponíveis.	2% (1 em 50)
5	Moderada	Falhas ocasionais associadas a projetos semelhantes ou na modelagem e teste de projetos.	0.05% (1 em 2,000)
3	Baixo	Somente falhas isoladas associadas a projetos quase idênticos ou na modelagem e teste de projetos.	$\leq 0.01\%$ (1 em 10,000)
1	Muito baixo	A falha é eliminada através do controle preventivo.	A falha é eliminada através do controle preventivo.

* As taxas de falha prováveis são específicas do negócio e do produto, seu orçamento de confiabilidade relacionado deve ser levado em consideração.

A probabilidade de detecção consiste na capacidade em detectar os modos de falha que podem estar contidos no processo. Portanto, a tabela 5 é apresentada a classificação empregue nos processos de detecção de falhas.

Após a compreensão das tabelas citadas, foi analisado e classificado o modo e efeito de falha conforme a severidade, ocorrência e detecção. Portanto, ao multiplicar esses fatores, calculou-se o número de prioridade de risco (RPN) para iniciar a avaliação com base nas definições de risco. Dessa forma, através do gráfico de Pareto estabeleceu-se uma escala de prioridades para a implementação das medidas de controle.

TABELA 5. Probabilidade de Detecção.

Detecção - FMEA de processo			
Probabilidade estimada de detecção, com base nos controles atuais de detecção; Procedimentos de verificação (revisão, análise, simulação, teste), neste ou em um processo comparável, usado para detectar a causa e/ou modo de falha potencial e evitar falhas antes que o cliente final ou o processo de fabricação sejam afetados			
Nível	Critério de avaliação	Explicação detalhada	Oportunidade de detecção
10	Quase impossível	Nenhum controle do processo atual; não pode detectar ou não é analisado	Nenhuma oportunidade de detecção
8	Remoto	Pós-processamento de detecção do modo de falha pelo operador através de meios visuais/táteis/audíveis	Pós-processamento de detecção de problemas
5	Moderada	A detecção do modo de falha ou erro (causa) na estação pelo operador por meio de medição variável ou por controles automatizados na estação detectará a peça discrepante e notificará o operador (luz, campainha, etc.). Medição realizada na configuração e verificação da primeira peça (somente para causas de configuração)	Detecção de problemas na origem
3	Alta	Detecção do modo de falha na estação por controles automatizados que detectam peças discrepantes e bloqueiam automaticamente as peças na estação para evitar processamento adicional	Detecção de problemas na origem
1	Quase certo	Prevenção de erro (causa) como resultado do projeto de fixação, projeto da máquina ou projeto da peça. Peças discrepantes não podem ser feitas porque o item foi à prova de erros pelo processo/design do produto	Detecção não aplicável; Prevenção de erros

De acordo com o pré-requisito definido, todos os modos e efeitos de falha que apresentem severidade igual a 10, obrigatoriamente, devem ter a máxima atenção devido seu risco crítico, sendo necessário a aplicação do plano de ação, independentemente do valor empregue na ocorrência e detecção. Além disso, possui como número de corte para o RPN o valor 150, visto que é considerado

de alto risco, seguido por valores acima de 75 classificado como risco moderado e para valores abaixo de 75 apontado como menor risco.

Por fim, as informações apresentadas no gráfico de Pareto direcionaram a elaboração de um plano de ação no qual foram capazes de estabelecer medidas de controle aplicáveis a cada modo de falha conforme seus prazos e responsáveis. Sendo assim, é empregue a planilha 5W1H como método de análise e solução do problema relativo a causa principal deste modo de falha para o mapeamento de processos, padronização e estabelecimento de planos de ação.

4. RESULTADOS E CONCLUSÕES

Em seguida aos dados obtidos de modo e efeito de falha no brainstorming e a aplicação das classificações de severidade, ocorrência e detecção, foram definidos os outros tópicos que compõe a ferramenta FMEA, ou seja, as causas, controles atuais, ações recomendadas, responsável e prazo. Dessa forma, a tabela demonstrará os resultados adquiridos com a aplicação do método FMEA ao processo de soldagem ultrassônica na jarra do liquidificador.

Verifica-se na Tabela 6 que o modo de falha potencial da cortina de segurança/bi-manual apresenta o não cumprimento dos requisitos de segurança expondo o soldador a uma situação de risco, sendo classificado no critério severidade em um valor igual a 10. Desse modo, a cortina de segurança/bi-manual é considerada um risco crítico e prioriza a tomada de decisão referente a um plano de ação em relação aos outros modos de falha apresentado.

Em relação aos modos de falha referente aos ajustes incorretos dos parâmetros da máquina de soldagem, ou seja, a pressão de solda, amplitude e tempo de soldagem, esses apresentaram a perda do produto e a degradação de sua função primária, já que o diretor de energia perde a sua única função, sendo assim, a severidade foi considerada alta. Em sequência, a probabilidade de ocorrência é considerada baixa, visto que existe uma avaliação das primeiras peças produzidas por meio de inspetores da qualidade antes da liberação de aplicação da soldagem no lote definido. E por último, para a classificação da detecção, em relação ao tempo excessivo de solda e soldagem excessiva do material devido sua alta amplitude, essas foram definidas como altas pois é detectada na inspeção visual após a operação pelo operador. Já o modo de falha de pressão de solda alta e para pressão de solda e amplitude baixas, essas possuem detecção moderada, pois devem ser inseridas e conferidas no setup da máquina.

TABELA 6. Análise do modo e efeito de falha do processo de soldagem ultrassônica na jarra do liquidificador.

Função do Processo	Item	Função	Requisitos	Modo de Falha Potencial	Efeito(s) Potencial(is) da Falha	SEVE-RI-D	Causa(s) e Mecanismo(s) Potencial(is) da Falha	OCORR-EN	Controles Atuais do Projeto	DET-EC-ÇA	Z	Ações Recomendadas	Responsável	Prazo
Dispositivo - Realizar a soldagem do produto	1	Interrupção de energia/Ar comprimido		Dispositivo interromper seu funcionamento		8	Falta de manutenção preventiva	3	Planejamento e controle de manutenção	3	72	Incluir nas auditorias internas a verificação do cumprimento do plano de manutenção	Departamento de qualidade e regulatório	Semana 2250
	2	Falha na cortina de segurança/bi-manual		O dispositivo funciona enquanto o operador manuseia a peça		10	1. Falta de manutenção preventiva 2. Operador burlar o acionamento da cortina de segurança/bi-manual 3. Seleção inadequada dos componentes	3	1. Cronograma de manutenção preventiva 2. Treinamento em segurança de operação e instrução de trabalho 3. Cadernos de encargos de projeto do dispositivo de solda	5	150	1. Incluir nas auditorias internas a verificação do cumprimento do plano de manutenção 2. Realizar programa de reciclagem periódicos no treinamento de segurança 3. Aplicar boas práticas e lições aprendidas	1. Departamento de qualidade e regulatório 2. Líder da produção encarregado pelo treinamento 3. Engenharia de processo	Semana 2249
Soldar adequadamente	3	Pressão de solda muito alta		Redução a resistência no local da solda/rompimento da peça		8	Ajuste incorreto da pressão de solda	3	Check list de setup da máquina	5	120	Preparar um relatório de inspeção inicial para todo lote	Departamento de qualidade	Semana 2250
	4	Pressão de solda e amplitude muito baixas		Fusão incompleta da solda/rompimento da peça		8	Ajuste incorreto da pressão de solda e amplitude	3	Check list de setup da máquina	5	120	Preparar um relatório de inspeção inicial para todo lote	Departamento de qualidade	Semana 2250
	5	Tempo excessivo de solda		Formação de trinca		8	Ajuste incorreto do tempo de soldagem	3	Inspeção visual na operação	3	72	Aplicar boas práticas e lições aprendidas	Engenharia de processo	Semana 2250
	6	Soldagem excessiva do material		Rebarba da peça na zona de solda		8	Ajuste incorreto da amplitude (muito alta)	3	Inspeção visual na operação	3	72	Aplicar boas práticas e lições aprendidas	Engenharia de processo	Semana 2250
Posicionar adequadamente os componentes da máquina	7	Desalinhamento do berço		Soldagem no local incorreto		8	Ajuste incorreto da posição do berço	3	Inspeção visual na operação	5	120	Preparar um relatório de inspeção inicial para todo lote	Departamento de qualidade	Semana 2251
	8	Desalinhamento do sonotrodo/peça/berço		Dano estético		3	Ajuste incorreto da posição do sonotrodo/peça/berço	3	Inspeção visual na operação/Protetor do sonotrodo	5	45	Preparar um relatório de inspeção inicial para todo lote	Departamento de qualidade	Semana 2251
	9	Desalinhamento dos sonotrodos		Soldagem parcial no local de solda/Abertura entre a alça e a tampa da alça		8	Ajuste incorreto do sonotro	3	Check list de setup da máquina	5	120	Preparar um relatório de inspeção inicial para todo lote	Departamento de qualidade	Semana 2251

Nos casos daqueles que tem a função do processo com sua posição incorreta dos componentes, apresentaram para o desalinhamento do berço e o desalinhamento dos sonotrodos sua severidade considerada alta conforme a perda do produto e a degradação de sua função primária. Enquanto o desalinhamento do sonotrodo/peça/berço foi classificado a severidade como baixo devido a uma leve insatisfação ou aborrecimento do usuário. Para o caso da classificação da probabilidade de ocorrência esta é classificada como baixa, pois é captado nas primeiras peças produzidas por meio de inspetores da qualidade. Por fim, em relação a classificação da detecção, essas são consideradas como moderadas observadas pelo soldador na inspeção visual e devem ser inseridas e conferidas no setup da máquina.

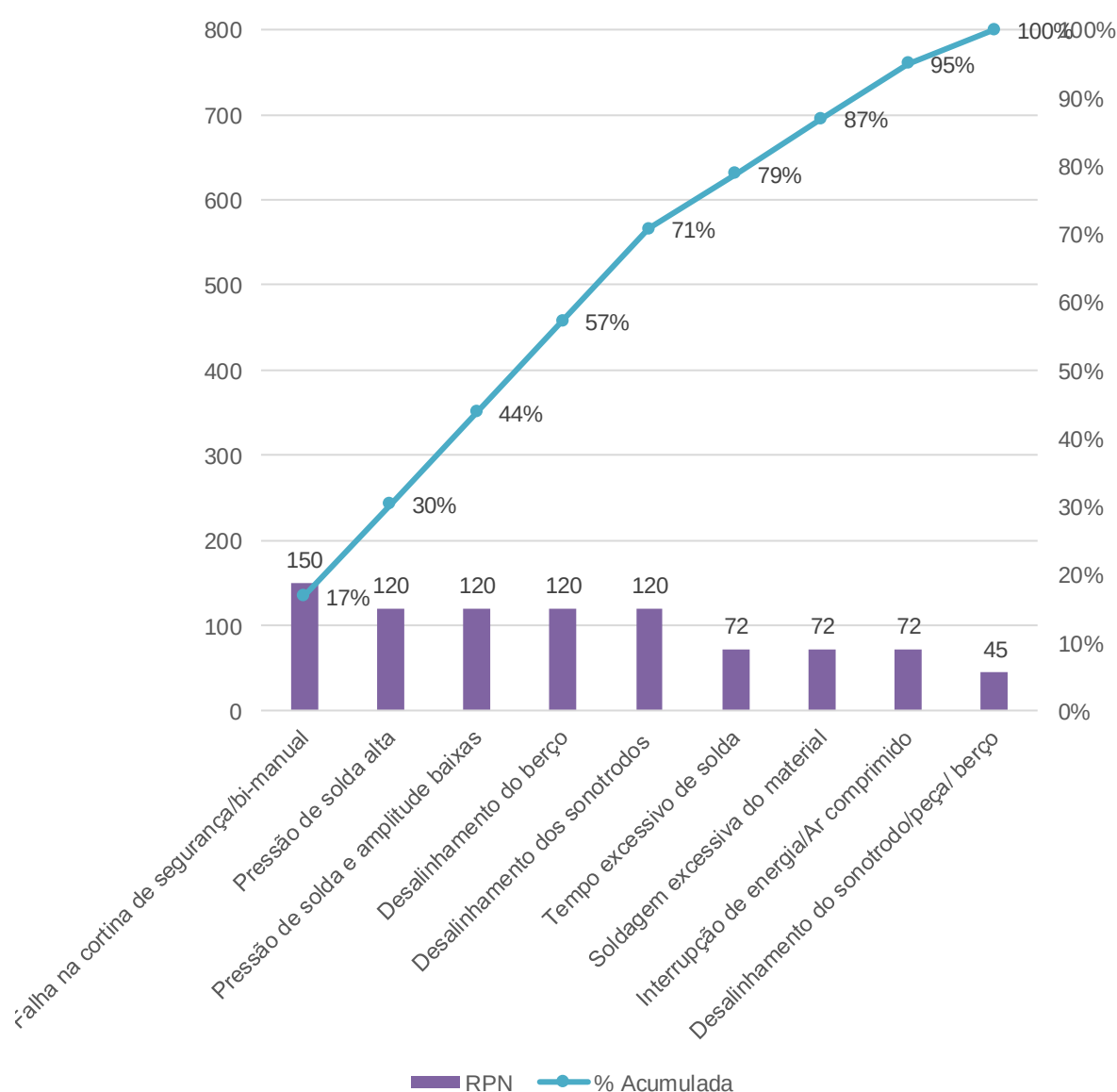


FIGURA 7. Gráfico de Pareto para o RPN dos modos e efeitos de falha.

O modo potencial de falha da interrupção de energia/ar comprimido é considerada a severidade alta devido o não funcionamento da máquina. Em relação a ocorrência é definida como baixa, pois são consideradas falhas isoladas, e aplicadas em altas para a probabilidade de detecção, visto que o sistema de segurança da máquina alertará a falta de energia.

Portanto, através das definições apresentadas acima foi possível realizar o cálculo do RPN e classificar as prioridades para as tomadas de ações necessária. É importante destacar que nos casos de modos de falha com o mesmo RPN, devem-se ter como prioridade aqueles que apresentam valores elevados na seguinte sequência: severidade, detecção e ocorrência. Sendo assim, a Figura 7 apresenta o gráfico de Pareto em relação a cada modo de falha e seu respectivo número de prioridade de risco.

Por fim, a Tabela 7 é apresentado o quadro com o plano de ação 5W1H com as proposições de solução, a fim de definir e orientar as ações tomadas em cada modo de falha identificado.

A medida em que cada plano de ação for aplicado aos modos de falha, um novo RPN deverá ser calculado. A empresa definiu que o critério severidade deve ser permanecido, pois o grau do risco não varia, porém, ações serão aplicadas a fim de reduzir as classificações de detecção e ocorrência para tornar número de prioridade de risco irrelevante.

TABELA 7. Plano de ação 5W1H.

PLANO DE AÇÃO 5W1H					
Departamento:			Responsável:		
O que?	Quem?	Quando?	Onde?	Porque?	Como?
Falha na cortina de segurança/bi-manual	Soldadores	Setup da máquina	Máquina	Impedir acidentes	Observar qualquer sinal de alerta da máquina
Pressão de solda alta	Soldadores	Setup da máquina	Máquina	Impedir a redução da resistência no local da solda	Conferir os parâmetros da máquina antes do início do processo
Pressão de solda e amplitude baixas	Soldadores	Setup da máquina	Máquina	Impedir a fusão incompleta no local de solda	Conferir os parâmetros da máquina antes do início do processo

(continuação)

Desalinhamento do berço	Soldadores	Preparação da máquina	Máquina	Impedir a soldagem no local incorreto	Ajustar os componentes da máquina na posição correta
Desalinhamento dos sonotrodos	Soldadores	Preparação da máquina	Máquina	Impedir a soldagem parcial ou incorreta	Ajustar os componentes da máquina na posição correta
Tempo excessivo de solda	Soldadores	Setup da máquina	Máquina	Impedir a formação de trincas	Conferir os parâmetros da máquina antes do início do processo
Soldagem excessiva do material	Soldadores	Setup da máquina	Máquina	Impedir formação de rebarba na peça	Conferir os parâmetros da máquina antes do início do processo
Interrupção de energia/Ar comprimido	Soldadores	Setup da máquina	Máquina	Impedir interrupções da máquina	Observar qualquer sinal de alerta da máquina
Desalinhamento do sonotrodo/peça/berço	Soldadores	Preparação da máquina	Máquina	Impedir danos estéticos na tampa da alça	Ajustar os componentes da máquina na posição correta

Esse trabalho intitulado como aplicação dos métodos de análise dos modos e efeitos das falhas no processo de soldagem ultrassônica de uma peça termoplástica nos permite concluir que:

- A ferramenta FMEA é uma metodologia adaptável, aplicável em diferentes áreas e apresenta resultados satisfatórios quando executado corretamente, pois permite que as devidas alterações no projeto ou processo sejam executadas com antecedência e torne o processo seguro e eficiente.
- Apesar de identificados possíveis modos de falha com valores elevados em relação a severidade e alto número de prioridade de risco, notou-se que medidas de ações simples podem gerar resultados seguros e assertivos.

- O FMEA é considerado um documento vivo, pois novos modos de falha e seus efeitos podem ser identificado, mesmo após a implementação do estudo avaliado. Isto permite que ferramenta seja um importante método para aplicação da melhoria contínua, proporcionando a identificação de novas oportunidades por meio do acompanhamento.
- Ao longo do tempo, a aplicação do FMEA resulta em análises mais robustas, pois resultam de um estudo contínuo com o ponto de partida de projetos semelhante e favorece uma base sólida de conhecimento, resultando em produtos mais eficientes e confiáveis.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ) e ao orientador, prof. Dr. Eduardo Miguel da Silva.

6. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo das informações contidas neste artigo.

7. REFERÊNCIAS

Afinal, o que é soldagem plástica por ultrassom? Neuplast, 2019. Disponível em: <https://www.neuplast.com.br/blog/afinal-o-que-e-soldagem-plastica-por-ultrassom/>. Acesso em: 05 dez. 2022.

COUTINHO, Thiago. O que é Melhoria Contínua?: Entenda sua importância e conheça as ferramentas!. Voitto, 2021. Disponível em: <https://www.voitto.com.br/blog/artigo/melhoria-continua>. Acesso em: 06 dez. 2022.

GALLEGO-JUÁREZ, Juan A.; GRAFF, Karl F.. Power Ultrasonics: Applications of High-intensity Ultrasound. Woodhead, 2014.

MCDERMOTT, R.E.; MIKULAK, R.J.; BEAUREGARD, M.R. The Basics of FMEA, 2nd Edition. New York: Productivity Press. 2009.

MODENESI, Paulo J.; MARQUES, Paulo Villani. Soldagem I: Introdução aos processos de soldagem. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2000.

PARANHOS, M.D.M. et al. Aplicação da análise de modo e efeitos de falha para o gerenciamento de riscos de um projeto. Catalão: Sistemas & Gestão, 2016.

Quais as vantagens de substituir o Metal pelo Plástico na indústria?. Plastfrio, 2020. Disponível em: <https://plastfrio.com.br/2021/04/20/quais-as-vantagens-de-substituir-o-metal-pelo-plastico-na-industria/>. Acesso em: 06 dez. 2022.

RAZA, Syed Farhan. Ultrasonic welding of thermoplastics. Sheffield: University of Sheffield, 2015. Solda por ultrassom é ideal para indústria com elevado ritmo de produção. Mundo do plástico, Plástico Brasil, 2017. Disponível em: <https://mundodoplastico.plasticobrasil.com.br/oportunidades/solda-por-ultrassom-e-ideal-para-industria-com-elevado-ritmo-de-producao>. Acesso em: 05 dez. 2022.

STAMATIS, D. H.. Failure Mode and Effect Analysis: FMEA from Theory to Execution. ASQ Quality Press, 2003.

TROUGHTON, Michael. Handbook of plastics joining: A practical guide. Norwich: William Andrew Inc., 2008.

APPLICATION OF FAILURE MODE AND EFFECT ANALYSIS METHODS IN THE ULTRASONIC WELDING PROCESS OF A THERMOPLASTIC PART

Roberta Cristine Moreira Rosa ⁽¹⁾ (robertacmrosa@hotmail.com)

Eduardo Miguel da Silva ⁽¹⁾ (eduardosilva@ufsj.edu.br)

⁽¹⁾ Federal University São João Del Rei (UFSJ) - Department of Mechanical Engineering – Minas Gerais, Brazil

ABSTRACT: This case study applies the failure mode and effect analysis (FMEA) methodology in the ultrasonic welding process in a plastic part. The aim of the study was to diagnose FMEA in the product manufacturing process, considering the prior detection of failures in the welding process during the early phases of the project. Therefore, it was necessary to apply the methodology in the ultrasonic welding process of the components that make up the blender jar, classify each mode and failure effect according to severity, occurrence, and detection in search of its risk priority number (RPN), present a scale of priorities for the implementation of control measures, and finally develop an action plan to establish solutions to the problem relating to the main cause applicable to each failure mode according to its deadlines and responsible. Thus, a research was carried out on the welding process by the ultrasound method in thermoplastics and the development and application of the FMEA tool, whose data were interpreted through the qualitative approach. As a result, it was found that despite identifying the possible modes and effects of failure, it became clear that simple measures can improve the quality, reliability and safety of processes, reducing risks and costs.

KEYWORDS: FMEA, Ultrasonic welding, Thermoplastic parts.