



FACULDADE HORIZONTINA

CLAUDIO LOUREIRO

**ELABORAÇÃO DE UM PROCEDIMENTO PARA QUALIFICAÇÃO DO
PROCESSO DE SOLDAGEM POR RESISTÊNCIA**

HORIZONTINA

2016

FACULDADE HORIZONTINA
Curso de Engenharia de Produção

CLAUDIO LOUREIRO

**ELABORAÇÃO DE UM PROCEDIMENTO PARA QUALIFICAÇÃO DO
PROCESSO DE SOLDAGEM POR RESISTÊNCIA**

Trabalho Final de Curso apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Produção, pelo Curso de Engenharia de Produção da Faculdade Horizontina.

ORIENTADOR: Rafael Luciano Dalcin, Mestre.

HORIZONTINA-RS

2016



**FAHOR - FACULDADE HORIZONTINA
CURSO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a monografia:

“Elaboração de um procedimento para qualificação do processo de soldagem por resistência”

Elaborada por:

Claudio Loureiro

**Aprovado em: 10/11/2016
Pela Comissão Examinadora**

**Mestre. Rafael Luciano Dalcin
Presidente da Comissão Examinadora - Orientador**

**Mestre. Luis Carlos Wachholz
FAHOR – Faculdade Horizontina**

**Mestre. Cristiano Rosa dos Santos
FAHOR – Faculdade Horizontina**

**HORIZONTINA- RS
2016**

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho especialmente a minha esposa Elenita e minha filha Eduarda, meus pais Craide e José Loureiro, minha sogra e sogro, Lenir e Evaldo Goulart que sempre estiveram junto comigo.

AGRADECIMENTO

Ao agradecer é complicado ser justo com as palavras quando estas são para falar de pessoas muito especiais, que do seu jeito, com sua humildade e simplicidade estiveram do meu lado, me apoiando, dando força e conselhos. A todas estas pessoas, agradeço de coração por estarem na minha vida e fazerem parte da minha história.

Agradecimento único a Deus e Nossa Senhora Aparecida por permitir a conquista deste sonho, resultado de lutas e vitórias, sempre me indicando o melhor caminho!

Agradecimento especial, indescritível e imensurável a minha esposa e filha! Obrigado, por tudo, por me apoiarem em todos os momentos. Este sonho também é de vocês, eu sei, e por isso esta conquista é tão minha quanto de vocês.

Aos meus amigos (as), obrigado pelas horas de compreensão, pelo ombro disponível e ouvidos apostos para me ouvir durante todos estes anos, vocês realmente são os irmãos que a vida me permitiu escolher.

Agradeço a empresa que oportunizou esta pesquisa, e as pessoas que me auxiliaram na construção deste trabalho, principalmente a equipe da engenharia de manufatura.

Juntam-se a estes os agradecimentos aos mestres que me mostraram o caminho para chegar aqui. Em especial ao meu orientador Mestre Rafael Luciano Dalcin, pela sua dedicação e conhecimento.

“A vida é uma peça de teatro que não permite ensaios. Por isso, cante, chore, dance, ria e viva intensamente, antes que a cortina se feche e a peça termine sem aplausos”.

(Charles Chaplin).

RESUMO

O uso da soldagem por resistência apresenta características e vantagens para soldagem de chapas finas, principalmente devido à alta velocidade de soldagem e pela qualidade final da união. Neste processo de solda ponto por resistência usa-se corrente elétrica e força para realizar a soldagem de chapas. Para a empresa em estudo, o uso de controle do processo de soldagem por resistência é ponto chave para garantia de seus produtos, pois permite assim, garantia na qualidade dos produtos fabricados. O projeto tem como objetivo elaborar um procedimento de qualificação de soldagem por resistência e o registro deste procedimento no Sistema de Gestão da Qualidade de uma empresa de agronegócio do Rio Grande do Sul. Para isso, é identificado e proposto melhorias na execução de testes práticos e confiáveis quanto ao processo de soldagem por resistência. A metodologia é definida como uma pesquisa-experimental pelo envolvimento e atuação do pesquisador na configuração e implantação da proposta mencionada. Um total de 63 corpos de provas foram unidos pelo processo de soldagem por resistência, sendo 21 combinações de espessuras de chapas. Em seguida, foi definido parâmetros do ciclo de solda, corrente e a pressão exercida pelos eletrodos. Após a soldagem, os corpos de prova foram submetidos ao processo de arrancamento para exposição e comprovação da resistência do material e das propriedades mecânicas, frente a sua exigência aos esforços requisitados para o produto final. Comparando os resultados alcançados, e apesar da variação das combinações de espessuras das chapas, através dos testes de arranchamento foi possível validar os parâmetros estabelecidos.

Palavras-chave: Soldagem por resistência. Qualificação do Procedimento de soldagem (QPS). Especificação do Procedimento de Soldagem (EPS).

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - ESBOÇO DO PROCESSO DE SOLDAGEM A PONTO POR RESISTÊNCIA.	14
FIGURA 2 - PRINCIPAIS TIPOS DE SOLDA POR RESISTÊNCIA ELÉTRICA: (A) PONTO; (B) COSTURA; (C) PROJEÇÃO.....	16
FIGURA 3 - CICLO DE SOLDA PONTO.	20
FIGURA 4 - FORÇA ENTRE ELETRODOS X PRÉ-PRESSÃO.	22
FIGURA 5 - TIPOS DE MÁQUINAS DE SOLDAGEM POR RESISTÊNCIA: (A) MÁQUINA ESTACIONÁRIA; (B) MÁQUINA SUSPensa OU MóVEL.	25
FIGURA 6 - PASSO A PASSO PARA ENSAIO DE ARRANCAMENTO.....	28
FIGURA 7 - COMO FAZER A MEDIÇÃO DO BOTÃO DE SOLDA.....	29
FIGURA 8 - MÁQUINA SOLDA PONTO FIXA/ESTACIONÁRIA.	31
FIGURA 9 - EQUIPAMENTO “WELDTESTER MM-A380 - MIYACHI”.....	32
FIGURA 10 - WELDTESTER X CONTROLADOR DA MÁQUINA DE SOLDAGEM.....	32
FIGURA 11 - CORPOS DE PROVA.	34
FIGURA 12 - FIXAÇÃO E TRACIONAMENTO DO CORPO DE PROVA.....	34
FIGURA 13 - CORPOS DE PROVA APÓS TESTE DE ARRANCAMENTO.	35
FIGURA 14 - MEDIÇÃO DO DIÂMETRO DO PONTO.	35
FIGURA 15 – PORCENTAGEM DE PEÇAS NÃO-CONFORMES ANTES VERSUS DEPOIS DA IMPLEMENTAÇÃO DAS NOVAS EPSS.	38
FIGURA 16 - QUANTIDADE DE PEÇAS NÃO-CONFORMES POR CONJUNTO NOS MESES DE JUNHO E JULHO COMPARANDO COM OS MESES DE AGOSTO E SETEMBRO DE 2016.....	39
FIGURA 17 – CHAPAS COM PROBLEMA DE PERFIL OU UNIÃO.....	41

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – DIÂMETRO DO BOTÃO DE SOLDA EM RELAÇÃO A ESPESSURA DA CHAPA.	28
QUADRO 2 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO AÇO SAE 1020.	30
QUADRO 3 – PROPRIEDADES MECÂNICAS DO AÇO SAE 1020.	30
QUADRO 4 – PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO PARA SOLDAGEM DAS CHAPAS.	31
QUADRO 5 – ESPESSURAS DAS CHAPAS E PARÂMETROS UTILIZADOS NA SOLDAGEM.	33
QUADRO 6 – EPS PARA QUALIFICAÇÃO DO PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM POR RESISTÊNCIA.	36

LISTA DE SIGLAS E SIMBOLOS

A - Ampere

AC/DC - Corrente Alternada/Corrente Contínua

ASME (BPVC IX) - "American Society of Mechanical Engineers"

AWS - "American Welding Society"

CNC - Controle Numérico Computadorizado

EPS - Especificação do Procedimento de Soldagem

Hz - Hertz

I - Intensidade da corrente

ISO - "International Organization for Standardization"

KVA - Kilovolt Ampére

MAG - Metal Active Gás

MIG - Metal Inert Gás

m Ω - miliOhms

Q - Quantidade de energia térmica desenvolvida

QPS - Qualificação do Procedimento de Soldagem

R - Resistência elétrica entre as chapas

RWMA - Resistance Welder Manufacturer's Association

SGQ - Sistema de Gestão da Qualidade

T - Tempo de passagem da corrente

V - Volts

ZAC - Zona Afetada pelo Calor

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 TEMA	11
1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA	11
1.3 PROBLEMA DE PESQUISA	12
1.4 JUSTIFICATIVA	12
1.5 OBJETIVO GERAL	13
1.6 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
2 REVISÃO DA LITERATURA	14
2.1 PROCESSO DE SOLDAGEM POR RESISTÊNCIA	14
2.1.1 Histórico	14
2.1.2 Tipos de soldagem por resistência.....	15
2.1.3 Processo de solda ponto por resistência.....	18
2.1.4 Parâmetros de solda ponto	21
2.1.5 Vantagens e limitações do processo de solda por resistência	23
2.1.6 Exemplos de aplicações.....	24
2.1.7 Equipamentos utilizados no processo de solda por resistência	24
2.2 QUALIFICAÇÃO DO PROCESSO DE SOLDAGEM POR RESISTÊNCIA	25
2.3 ESPECIFICAÇÃO DO PROCESSO DE SOLDAGEM POR RESISTÊNCIA.....	27
2.4 ENSAIOS DE ARRANCAMENTO	27
3 METODOLOGIA	30
3.1 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS.....	30
3.2 MÉTODOS E TÉCNICAS	31
4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	36
4.1 MODELO DE EPS UTILIZADA.....	36
4.2 VANTAGENS DA IMPLEMENTAÇÃO DA EPS	37
4.3 DISCUSSÃO SOBRE OS RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS	40
CONCLUSÃO	42
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	43

1 INTRODUÇÃO

Em um cenário de concorrência, as indústrias investem em tecnologia e melhorias em seus processos, diminuindo custos e melhorando a qualidade para clientes cada vez mais exigentes. De acordo com Batalha (2003), o processo de soldagem por resistência ocorre na fusão de um ponto entre materiais metálicos, com a utilização de calor e força sem adição de material. Quando o material é submetido ao processo de soldagem por resistência, ocorre então, uma união definitiva, não sendo possível a separação das chapas sem um fator destrutivo.

O estudo em questão trata-se de uma pesquisa experimental, na qual utiliza do método exploratório embasada em conhecimentos e fundamentados em revisão bibliográfica, sendo extremamente necessário para análise e conhecimento do processo de soldagem por resistência para a elaboração do procedimento que tem como estudo específico em chapas de aço com baixo teor de carbono e especificação do material que tenha em sua composição química entre 0,1 a 0,3% de carbono. O procedimento para realizar o teste de arrancamento do ponto nos corpos de prova segue o padrão especificado conforme norma AWS D1.1/D1.1M, 2010.

Este trabalho tem por objetivo desenvolver um novo procedimento de qualificação e registro no SGQ (sistema de Gestão da Qualidade). Para validar o experimento será realizado testes de arrancamento, para comprovar a eficácia do procedimento disponível.

1.1 TEMA

O assunto a ser estudado é a elaboração de uma Qualificação do Procedimento de Soldagem por Resistência (QPS), bem como seu registro no Sistema de Gestão da Qualidade utilizado pela empresa, para manter registro e facilitar a visualização dos procedimentos em auditorias internas e externas, ou por funcionários de outras unidades localizadas em diversos países.

1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA

Para fins de validação desta pesquisa, este trabalho irá se deter somente na realização de testes de arrancamento para validar o procedimento de qualificação da soldagem por resistência em uma empresa do interior do estado do Rio Grande do

Sul. Este estudo não levará em conta o tempo para a realização dos testes de arrancamento que será feito a cada programa utilizado na semana de trabalho.

1.3 PROBLEMA DE PESQUISA

Uma empresa produz máquinas agrícolas e necessita fazer união de chapas finas pelo processo de soldagem por resistência. O processo de soldagem por resistência faz parte de 764 conjuntos realizados dentro da empresa, por isso a necessidade de ter uma EPS/QPS bem definida e confiável para evitar retrabalhos e descontentamento do cliente ao adquirir o produto. Alguns parâmetros utilizados pela empresa não atendem os requisitos desejados, gerando não-conformidades. Então, surge a necessidade de elaborar um procedimento de qualificação do procedimento de soldagem por resistência para diminuir a quantidade de itens não-conformes.

O problema de pesquisa caracteriza-se com a seguinte pergunta: A elaboração de um procedimento para qualificação do processo de soldagem por resistência, reduzirá os defeitos de processos nos produtos fabricados?

1.4 JUSTIFICATIVA

Este trabalho, aplicado em uma empresa de agronegócio localizada no Rio Grande do Sul, justifica-se pela necessidade de elaborar um procedimento para qualificação de soldagem por resistência, melhorar um problema atual e garantir o processo de qualificação, além de mostrar e evidenciar a todos os envolvidos nos processos a importância de trabalhar com soluções rápidas para as não-conformidades detectadas no processo. Desta forma, este trabalho está contribuindo para a empresa e informando os departamentos envolvidos sobre um novo processo a ser seguido para qualificação do procedimento de soldagem por resistência, que se torna viável por ser um trabalho necessário e apoiado pelas lideranças da empresa.

O assunto mostra o quanto este trabalho é importante às atividades profissionais do pesquisador, uma vez que a qualidade dos processos internos assume destaque nos objetivos da organização, mostrando a importância do tema em todos os processos da empresa que, por meio da melhoria contínua, busca entregar uma experiência excepcional e diferenciada ao cliente final.

1.5 OBJETIVO GERAL

Em razão das necessidades da empresa por qualidade dos seus produtos, eliminação de não-conformidades, este trabalho tem por objetivo realizar uma pesquisa experimental com o intuito encontrar os parâmetros ideais de soldagem para chapas finas. Para garantir que o procedimento irá ser seguido, será elaborado um procedimento de qualificação de soldagem por resistência para diminuir a quantidade de defeitos e garantir melhor qualidade no processo de solda ponto por resistência.

1.6 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar a quantidade de defeitos gerados no processo.
- Realizar soldagem por resistência e testar vários parâmetros.
- Fazer testes de arrancamento dos corpos de prova soldados.
- Elaborar um procedimento de solda ponto por resistência.
- Diminuir a quantidade de defeitos gerados no processo de solda ponto por resistência.

Com base no exposto, este presente trabalho objetiva a análise e definição, para implementação de um procedimento de soldagem por resistência alinhado às metas da empresa.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste tópico serão abordados assuntos referentes aos processos de soldagem por resistência, segundo autores que fundamentam o assunto tratado neste trabalho.

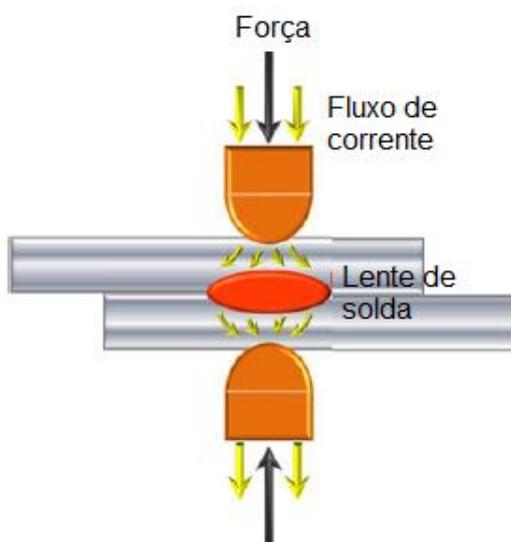
2.1 PROCESSO DE SOLDAGEM POR RESISTÊNCIA

2.1.1 Histórico

A Soldagem por resistência nasceu por volta do ano de 1877 e teve como inventor o engenheiro eletricitista Elihu Thomson nascido na Inglaterra. Com 5 anos, Elihu Thomson foi morar nos Estados Unidos, estudou, desenvolveu e patenteou o primeiro processo de soldagem elétrica. Em 1879 foi realizada a primeira demonstração prática de soldagem por resistência, sendo logo após em 1886, produzida então a primeira máquina de solda ponto (ANDERSON, 2013).

Para Nascimento e Scotti (2004), a soldagem por resistência é a união das chapas por coalescimento localizado (fusão e posterior solidificação), devido a resistência do material à passagem de corrente. Para completar o processo é necessário uma pressão, e essa deve manter as chapas pressionadas até a completa solidificação dos metais, tendo nesta área a chamada lente ou lentilha de solda, conforme mostra a Figura 1.

Figura 1 - Esboço do processo de soldagem a ponto por resistência.



Fonte: Adaptado de Nascimento e Scotti, 2004.

Já no século XX, mais especificamente no ano de 1915, foi o ano em que o processo de soldagem por resistência foi introduzido mais especificamente na indústria, com utilização em chapas de aços na indústria automobilística. Depois disto, o processo foi estudado, ganhando força e confiabilidade. Durante a segunda guerra mundial, a utilização em larga escala do processo de soldagem por resistência passou a ser utilizado em outros materiais como o alumínio na indústria aeronáutica (DAMASCO, 1995).

No ano de 1933 foi quando o processo de soldagem por resistência ganhou força e avançou consideravelmente nas mais variadas possibilidades de união de chapas. Este processo apresenta vantagem sobre outros tipos de soldagem por ter uma alta confiabilidade, ser um processo mais rápido de ser executado e por proporcionar a redução de tempo na soldagem do produto (AGACHE, 2003; VOGLER, 2003; AWS D1.1/D1.1M, 2010).

Conforme Rogeon *et al.* (2007), a área de contato entre as peças é que define o quanto de resistência terá no ponto específico onde se dará a união. Ainda nesta área pode haver defeitos de superfícies como: óleos, graxas, sujeira, rugosidade que aumentam a resistência, sendo necessário um pequeno aumento de corrente para compensar essa resistência.

A soldagem por resistência difere-se da solda por fusão pela aplicação de força mecânica para garantir a união das chapas. Neste processo, há um refinamento dos grãos da estrutura devido ao efeito da força aplicada, possuindo assim uma solda com propriedades mecânicas iguais ou superiores ao metal de base ou que deram origem (RWMA, 2003).

Atualmente, o processo de soldagem por resistência é largamente utilizado nas indústrias metal mecânica, por ser um processo de alta produtividade, confiabilidade, simplicidade de operação, não tem necessidade de material de adição e o controle relativamente fácil e não necessitando que o operador tenha alto grau de experiência (VARGAS, 2006).

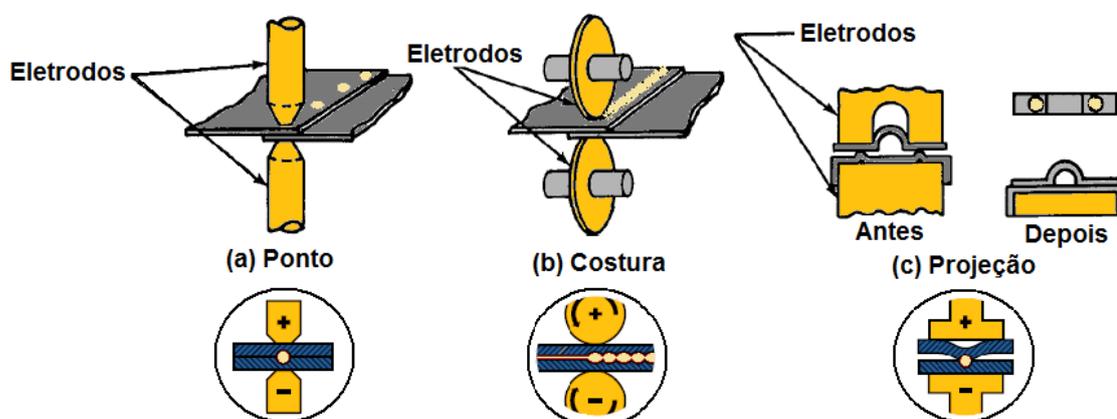
2.1.2 Tipos de soldagem por resistência

Neste tópico, é apresentado os tipos de soldagem por resistência, a fim de mostrar qual o processo é mais eficaz para união de chapas e componentes metálicos.

Para Machado (1996), a solda é realizada pela fusão localizada e produzida pela passagem de corrente elétrica entre dois eletrodos (produzidos com ligas de cobre) que pressionam as peças a serem soldadas. Este processo tem aplicação normalmente em chapas de pequena espessura. A máquina de solda ponto deve ter seus parâmetros corretamente aplicados para que não seja lançado faíscas que podem atingir o operador ou outras pessoas que circulam pela área. Outro fator a levar em conta é a geração de fumos caso a superfície possua resíduos de óleo ou poeiras prejudiciais à saúde humana.

O princípio básico do funcionamento do processo de soldagem por resistência é a passagem da corrente elétrica por meio de dois eletrodos não consumíveis combinado com pressão sobre as chapas. Essa passagem de corrente por entre os eletrodos faz com que ocorra fusão do material em um ponto específico onde os eletrodos são pressionados no material. Os principais tipos de soldagem por resistência, estão representados na Figura 2: (a) solda ponto, (b) solda costura e (c) solda projeção (MACHADO, 1996; AWS D1.1/D1.1M, 2010).

Figura 2 - Principais tipos de solda por resistência elétrica: (a) Ponto; (b) Costura; (c) Projeção.



Fonte: Adaptado de AWS D1.1/D1.1M, 2010.

Na solda ponto, o processo ocorre entre os dois eletrodos que tem formato de punção com diâmetro limitado ao projeto do produto especificado no desenho de engenharia. A solda por costura a fusão do material é contínua, não havendo interrupção, deslocam-se em uma direção realizando a fusão das chapas. No processo por projeção, as peças a serem submetidos a esse processo devem sofrer um processo de conformação antes de ser soldada. As peças devem apresentar

saliência tipo repuxo, pois é nesta área por onde a corrente é direcionada e ocorrer a fusão do metal (MACHADO, 1996; AWS D1.1/D1.1M, 2010).

Os principais processos de soldagem por resistência elétrica são classificados da seguinte maneira: soldagem por resistência a ponto, soldagem por projeção e soldagem por costura. Existem vários outros processos, mas somente foi comentado estes, pois são os mais utilizados nas indústrias do setor metal mecânico (BRACARENSE, 2000; STOCCO, 2010; AWS D1.1/D1.1M, 2010; FÜHR, 2012).

A soldagem por resistência por ponto é um processo pelo qual usa-se pressão entre duas superfícies planas que tenham contato entre si, e por estas gerar calor através do efeito Joule, onde há passagem de corrente elétrica gerando a junção das peças (STOCCO, 2010).

Brandi (1992) descreve que basicamente as máquinas de soldagem por resistência possuem três componentes fundamentais: sistema mecânico é o que realiza força nos eletrodos fixando as peças; o circuito elétrico formado por um transformador que gera a corrente elétrica e um sistema de controle de tempo que atua sobre as peças.

As chapas são pressionadas entre si com eletrodos não consumíveis, normalmente fabricados em liga de cobre, cuja área de contato do eletrodo na peça possui um perfil adequado para uma alta passagem de corrente e resistente ao desgaste com o calor gerado ao executar a soldagem. Este processo executa soldagem em chapas, onde as espessuras das chapas são relativamente finas. Ao utilizar alta temperatura para realizar o processo de soldagem por resistência, desprendem-se fumos onde contêm óleos ou graxas nas chapas, ou ainda projeta faíscas ou centelha que podem atingir o soldador ou pessoas que estão próximas a máquina (FÜHR, 2012).

Conforme mostrado na Figura 2(a), a soldagem por resistência elétrica realiza uma pressão nos eletrodos sobre as chapas fazendo uma união perfeita das mesmas antes de receber a corrente elétrica (FÜHR, 2012).

A soldagem por projeção é realizada em área concentrada, ou seja, onde há pequenas elevações na superfície de uma peça, chapa, parafusos ou porcas, onde a corrente elétrica de solda é localizada para a fundição do material, realizando a soldagem. Para esse processo é utilizado baixa corrente elétrica, um baixo tempo de solda e uma baixa pressão nos eletrodos (BRACARENSE, 2000). Conforme a Figura 2(b), as peças são preparadas, ou seja, o processo anterior realiza uma pequena

saliência na chapa, onde é direcionada a corrente elétrica, realizando a soldagem (AWS D1.1/D1.1M, 2010).

Outro processo utilizado é a soldagem por costura, um processo de união contínua de chapas finas. Este tipo de solda é empregado nas indústrias para a fabricação, onde a intenção é de armazenamento de combustível, água ou ainda catalizadores. Exemplos de peças são os tanques de combustível de máquinas agrícolas, automóveis, e alguns tipos de tubos (BRACARENSE, 2000). Na Figura 2(c) é apresentado uma imagem do procedimento de soldagem por costura. Neste processo, os eletrodos com corrente elétrica giram realizando a soldagem das chapas que passam entre os eletrodos (AWS D1.1/D1.1M, 2010).

2.1.3 Processo de solda ponto por resistência

Aures (2006) diz que soldagem por resistência é um processo que utiliza pressão e alta corrente elétrica para aquecer e fundir os materiais, realizando assim a união sem material de adição e neste processo não tem necessidade de ter um operador com grande experiência para executar a soldagem.

Para Stocco (2010), nos condutores elétricos a quantidade de calor gerado depende dos três fatores: corrente elétrica, duração da corrente e a resistência do condutor. Os fatores que afetam o calor gerado no processo, está expresso na Equação 1:

$$Q = I^2 \times R \times T \quad (1)$$

Onde:

Q = Calor gerado (joules);

I = Intensidade da corrente (amperes);

R = Resistência elétrica (Ohms);

T = Tempo de passagem da corrente (segundos).

O processo de soldagem por resistência é muito empregado nas indústrias, principalmente onde se quer alta produtividade. Neste processo é utilizado chapas sobrepostas uma a outra, onde são pressionadas pelos bicos das máquinas que receberá uma alta corrente elétrica, fundindo assim as duas chapas. É um processo que podem ser usadas várias especificações de material, sendo que alguns materiais apresentam melhor soldabilidade e outros nem tanto (AURES, 2006).

Conforme a AWS D1.1/D1.1M (2010), para realizar uma soldagem por resistência satisfatória é necessário que neste processo haja envolvimento de força desde o início até o final do ciclo por onde passa a corrente elétrica. Os eletrodos, ao pressionar uma chapa contra outra, mais a corrente elétrica que passa entre os eletrodos, geram aquecimento em um ponto, fazendo que ocorra a fusão do material, e ao esfriar, as chapas permanecem unidas.

As peças a serem soldadas são sobrepostas uma a outra, onde os eletrodos pressionam uma chapa contra outra com forças que podem ser: mecânica, pneumática ou hidráulica ou uma combinação entre elas. Em seguida, a máquina entra com uma baixa tensão e uma alta corrente que passa pelos eletrodos não consumíveis chegando ao metal base. O metal base, por sua vez, possui alta resistência à corrente elétrica, eleva a temperatura na superfície das chapas proporcional ao tempo, a resistência elétrica e a intensidade de corrente que deve ser suficiente para atingir a fusão do metal na área que está em contato com os eletrodos, e esta recebe o nome de lente de solda. Quando a corrente cessa, a máquina mantém a pressão nos eletrodos até que a solda resfria e solidifica-se. O diâmetro das lentilhas de solda varia conforme o diâmetro dos eletrodos (ASM HANDBOOKS, 1983).

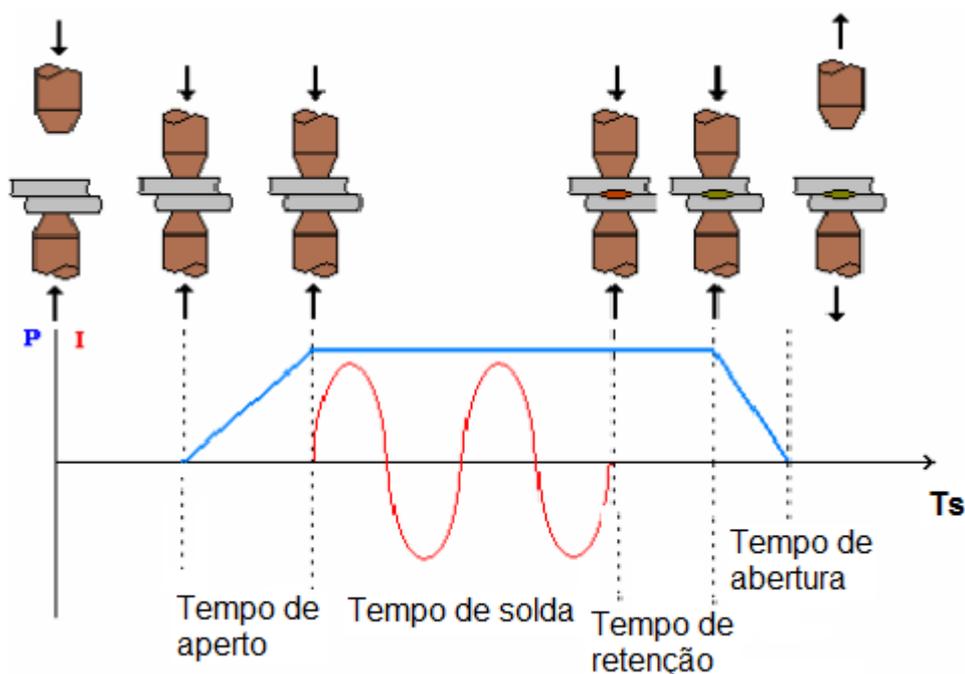
A resistência elétrica dos metais varia entre 50 m Ω até 500 m Ω (miliOhms) e corrente entre 5.000 a 100.000 A (Amperes) para termos a fusão do metal base, dependendo da condutividade térmica de cada metal. Usa-se tensões entre 1 e 20 V (Volts), raramente até 30 V, e com um tempo de aplicação menos de 0,01 segundo (chapas finas) até vários segundos para chapas mais espessas (MACHADO, 1996).

Segundo Aures *apud* Karagoulis (1994), para cada ponto de solda é utilizado um ciclo de soldagem, como mostra a Figura 3, onde é caracterizado pela frequência da rede (60Hz), sendo que cada pulso tem duração de $1/60 = 0,0167$ segundos.

O primeiro passo é colocar as chapas sobrepostas encostadas no eletrodo inferior. Ao acionar a máquina o eletrodo superior encosta, iniciando o ciclo de solda, que inicia com um tempo de aperto das chapas. Após entra o processo de solda que terá uma duração determinada pela espessura do material realizando a fundição entre os metais base. Após, entra o tempo de retenção que é o tempo que os eletrodos permanecem pressionando as chapas até certo resfriamento da área fundida e ao final ocorre a abertura dos eletrodos (BRANCO, 2004).

Para Nakano (2005), é necessário a realização de quatro etapas para ocorrer o processo de soldagem por resistência, das quais a pressão e energia utilizada dependerá do tipo de material utilizado. Tendo a limpeza da superfície como primordial e o livre acesso dos eletrodos na área onde deve ser realizado o ponto. A primeira etapa refere-se à posição adequada dos eletrodos para que haja pressão na pilha de peças (duas ou mais), isso significa que, cada eletrodo deve ficar posicionado um em cada lado da pilha. A segunda etapa é durante a aplicação da pressão, onde a corrente passa entre os eletrodos, iniciando o processo de soldagem. Na terceira etapa, é onde a corrente é cessada e a pressão continua agindo. A quarta etapa é depois que a pressão finalmente é cessada, mas a pressão continua formando o ponto de solda. Após a peça ter a união, passa a mostrar duas faces sobrepostas, onde a área, mesmo que não sofreu ação direta da solda, altera as características, conforme apresentado na Figura 3.

Figura 3 - Ciclo de solda ponto.



Fonte: Adaptado de Aures, 2006.

A variação da temperatura necessária para ocorrer a fusão depende do tipo de material utilizado. Relacionado ao tempo, é o período necessário para a corrente atuar e fazer a fusão do material. A resistência desejada vai depender desse período de tempo em que este é aplicado na geração de calor. A pressão é a força executada pelos eletrodos necessária para que ocorra a soldagem, sendo esses os

parâmetros de suma importância, pois deste equilíbrio depende o resultado final da soldagem (BRACARENSE, 2000).

2.1.4 Parâmetros de solda ponto

Os parâmetros de soldagem são os componentes que irão assegurar a aplicação dos pontos a serem executados nas peças e componentes de modo a garantir uma perfeita fusão na área de soldagem por resistência. A qualidade do ponto de solda tem influência principalmente em três fatores essenciais: tempo de solda (em ciclos), intensidade da corrente e força nos eletrodos (SANTOS F, 2006).

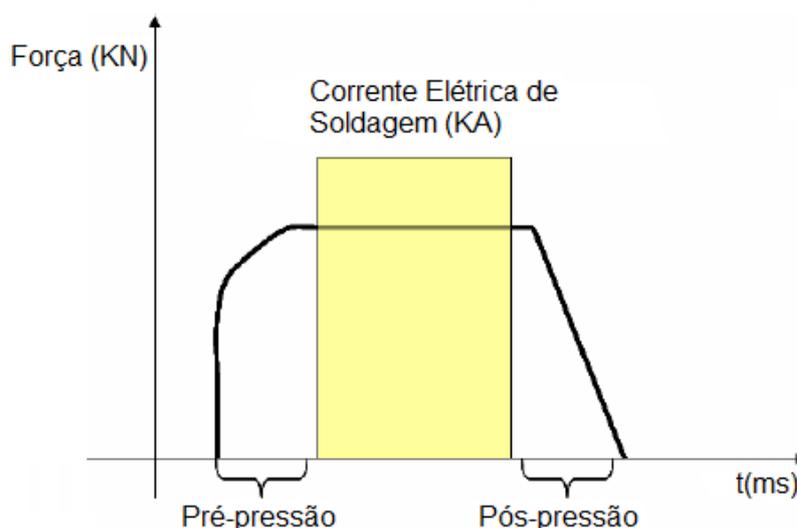
No processo de soldagem por resistência, são vários os fatores que terão influência na qualidade do ponto de solda. Estes devem estar em equilíbrio, ao ser executado o ponto, o mesmo não deve sofrer deformações, já que na região do ponto cria-se uma área de fragilização no material caso o ataque do calor for muito intenso, chamada de Zonta Afetada pelo Calor (ZAC). Para a má especificação dos parâmetros de soldagem, por exemplo a utilização de alta corrente combinado com alta pressão nos eletrodos, ocorre a expulsão de material, ou seja, lança fagulhas de material, gerando riscos a segurança do operador e pessoas que estão próximas da máquina (AWS D1.1/D1.1M, 2010).

O tempo de pré-pressão ou também conhecido como pré-fechamento dos eletrodos é aquele executado antes de entrar a corrente de solda, ou seja, o tempo que o sistema necessita para fechar as pinças e pressionar as peças antes de realizar o ponto de solda. Ao inserir um tempo curto para este parâmetro, a corrente entrará no sistema antes da total pressão dos eletrodos nas peças, ocasionando uma possível destruição das peças. Por outro lado, esse tempo não pode ser demasiadamente alto para que o processo não se torne lento demais para a fabricação das peças (SANTOS F, 2006).

Para Aures (2006), a pré-pressão ou compressão se divide em duas etapas: tempo de pré-pressão e tempo de encostamento. O tempo de encostamento é o tempo que leva os eletrodos da posição inicial/parado até encostar nas chapas. O tempo de pré-pressão é o tempo que o sistema leva desde o início do fechamento até a força de trabalho. A compressão é utilizada para que a corrente seja liberada somente depois dos eletrodos estarem pressionando as chapas, fazendo com que não tenhamos expulsão do metal fundido e uma má qualidade do ponto de solda.

O tempo de soldagem é aquele compreendido entre o início e o término da corrente elétrica de soldagem. Este tempo tem relação a espessura das chapas a serem soldadas, quanto maior a espessura, maior deve ser o tempo de solda aplicado no processo de soldagem. Outro fator que deve ser levado em conta é o tratamento superficial e o tipo ou composição química do material utilizado. Quanto maior o tempo de soldagem, maior a fusão no ponto de solda (SANTOS F, 2006). A Figura 4 mostra o tempo de entrada da pré-pressão até a entrada da corrente liberada pelo comando da máquina de soldagem por resistência (SANTOS F, 2006).

Figura 4 - Força entre eletrodos x pré-pressão.



Fonte: Adaptado de Santos F, 2006.

Pela AWS D1.1/D1.1M (2010) a corrente elétrica chega pela rede elétrica até o transformador do equipamento, e pelo circuito da máquina chega até a peça. O equipamento utiliza tanto a AC como a DC para realizar o trabalho.

Tempo de solda segundo Santos W. (2013), é o tempo da passagem da corrente elétrica pela peça a ser soldada. Normalmente esse tempo é expresso em ciclos e o tempo de solda for 20 ciclos, levando em conta que no Brasil a frequência da rede elétrica é 60 Hz (Hertz). Então temos 1/3 de segundos. Para melhorar o rendimento térmico na soldagem por resistência e diminuir as distorções na junta soldada o melhor é que se tenha o menor tempo de solda possível.

A corrente de solda é o que faz fundir a peça, quanto maior a corrente, maior será a área fundida, ou seja, maior o diâmetro tamanho do ponto de solda. Para a corrente elétrica há dois limites: o limite de respingos e o limite de aceitação. O limite

de aceitação está relacionado ao diâmetro mínimo do ponto. Se a corrente ficar abaixo do limite de aceitação, os pontos de solda não serão aceitos pela qualidade por não atingirem o diâmetro exigido do ponto. O limite de respingos é o limite superior de corrente aplicada na peça onde a mesma fundirá muito material, resultando em problemas de qualidade e segurança (SANTOS. F, 2006).

A subida de corrente é a rampa de subida, ou simplesmente, ela vai subindo gradativamente de um valor pré-determinado até chegar ao valor nominal. Isso faz com que a corrente seja liberada lentamente até atingir o valor máximo específico, melhorando o processo de soldagem por resistência. Para a descida de corrente é o processo inverso, da subida de corrente, onde essa aplicação faz a rampa de descida para que a corrente não seja interrompida bruscamente, porém, a utilização destes parâmetros deixa o processo mais lento, encarecendo o produto (SANTOS F, 2006).

O tempo de retenção é aquele em que os eletrodos permanecem aplicando força nas peças depois do último impulso de corrente. Esse tempo é utilizado em peças onde há necessidade de as chapas permanecer pressionadas para uma perfeita solidificação da área fundida. Este tempo deve ser o suficiente que ao momento de abrir os eletrodos ou cessar a pressão as chapas não empenam na região da solda, em especial em chapas de espessura mais fina (AURES, 2006).

No processo, usa-se o tempo de pausa ou intervalo quando se faz um ponteamto em série, ou seja, uma quantidade de pontos em sequência. Quando usamos este recurso da máquina de soldagem por resistência, falamos que este é o intervalo de tempo que a máquina leva entre abertura e fechamento dos eletrodos (AURES, 2006).

2.1.5 Vantagens e limitações do processo de solda por resistência

As principais vantagens da soldagem por resistência são (AURES, 2006):

- Maior resistência a vibrações mecânicas;
- Não há necessidade de acabamento final na área do ponto, pois, quando aplicado corretamente este processo não produz escória nem respingos;
- Alta velocidade e adaptabilidade na automação para produção;
- Não tem necessidade de alta habilidade para aplicação.

O processo possui algumas limitações, como por exemplo (AURES, 2006):

- Só pode-se soldar metais que tenham ou formam ligas ou quando introduz um material intermediário que pode se ligar aos metais de base;
- Dificuldade em desmontar para manutenção ou reparos;
- As máquinas de soldagem por resistência possuem custo bem mais elevado que outros equipamentos de soldagem;
- As peças soldadas têm baixos limites de resistência a tração e a fadiga por motivo do entalhe nas chapas.

2.1.6 Exemplos de aplicações

Aplicações do processo de soldagem por resistência são em chapas de aço carbono que tenham normalmente espessuras até 3,5mm, em alguns casos especiais pode ser utilizado em chapas de até 6,5mm de espessura, para espessuras maiores tem-se a necessidade de equipamentos projetados especialmente para realizar soldagem por resistência (MACHADO, 1996).

O mesmo autor, fala no processo de soldagem por resistência com projeção, onde as chapas recebem operação primária com máquinas especiais que realizam repuxo, ou melhor, fazem uma saliência onde irá concentrar a corrente elétrica para a realização da solda.

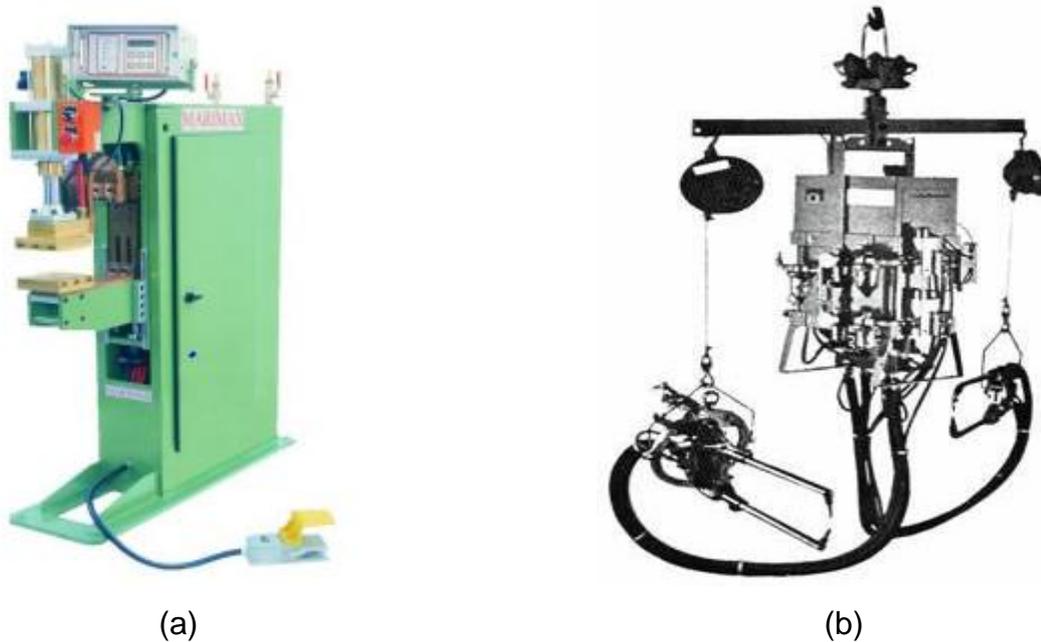
2.1.7 Equipamentos utilizados no processo de solda por resistência

As máquinas são construídas para atender pelo menos três componentes fundamentais: sistema mecânico, circuito elétrico e o sistema de controle (AURES *apud* WAINER, *et al.*, 1992; BRANCO *apud* INTERMACHINERY, 2003).

O sistema mecânico é composto de sistemas hidráulicos, pneumáticos e/ou mecânicos são responsáveis por exercer a força nos eletrodos para prender as peças. A velocidade de aproximação dos eletrodos deve ser rápida, mas controlada de forma que não danifiquem as faces dos eletrodos. As características da máquina de soldagem por resistência é a rigidez, o atrito, o movimento de massa e a qualidade tem influência complexa no processo (AURES *apud* TAN *et al.*, 2004).

As máquinas de soldagem por resistência podem ser estacionárias como mostra na Figura 5(a), ou suspensa/móvel conforme Figura 5(b), sendo a forma construtiva dos dois tipos de máquinas diferente, porém, a funcionalidade é semelhante e obedecem aos mesmos padrões de regulação (BRANCO, 2004).

Figura 5 - Tipos de máquinas de Soldagem por Resistência: (a) Máquina estacionária; (b) Máquina suspensa ou móvel.



Fonte: (a) Marimax, 2013; (b) Branco, 2004.

Com o avanço da tecnologia, na década de 80, as indústrias de equipamentos de soldagem começaram a introduzir circuitos microprocessados. Com isso, surgiu a redução do tamanho dos controladores levados pelo menor número de componentes eletrônicos utilizados e aumento da confiabilidade do equipamento, tendo como redução de falhas. Nestes foi possível incorporar mais funções, gerando qualidade mais satisfatória do ponto de solda. Estes também permitem uma comunicação em redes de comunicação industrial com outras máquinas e equipamentos, com isso promovendo uma flexibilidade do processo. Também podemos usar nestes controladores a programação “off-line” que é, realizar um programa para soldagem por resistência dentro dos escritórios, ou seja, distante da máquina utilizando um software específico para cada modelo de máquina e controlador (RWMA, 2003).

2.2 QUALIFICAÇÃO DO PROCESSO DE SOLDAGEM POR RESISTÊNCIA

Desde o início da civilização humana existe a necessidade de regras e regulamentos para controlar de uma forma ou outra a atividade do ser humano. Para

aplicações de soldagem, é necessário seguir normas e alguns procedimentos antes mesmo da fabricação para produção, isso exige testes e especificações pré-realizados e aprovados conforme normas específicas para a atividade e permite que se tenha uma uniformidade na execução da tarefa e manter um registro das condições específicas de soldagem e controle de eventuais causas e falhas (MODENESI; MARQUES; BRACARENSE, 2009).

Conforme a ASME BPVC IX (2010), para cada processo deve existir uma qualificação do procedimento de soldagem, assim a soldagem por resistência tem a sua qualificação. Havendo qualquer alteração em alguma variável essencial, nova qualificação deve ser realizada, caso for realizado uma alteração em uma variável não essencial o procedimento poderá ser apenas revisto ou alterado, não é necessário fazer uma nova EPS.

A seguir é apresentado algumas normas relacionadas a soldagem por resistência, publicadas na Associação Brasileira de Normas Técnicas.

- AWS A3.0M:2001 - Standard Welding Terms and Definitions Including Terms for Adhesive Bonding, Brazing, Soldering, Thermal Cutting, and Thermal Spraying;
- AWS C1.1M:2012 - Recommended Practices for Resistance Welding;
- AWS C1.4M:2009 - Specification for Resistance Welding of Carbon and Low-Alloy Steels;
- AWS D8.1M:2013 - Specification for Automotive Weld Quality - Resistance Spot Welding of Steel;
- AWS D8.7M:2005 - Recommended Practices for Automotive Weld Quality Resistance Spot Welding;
- ISO 14273:2000. International Organization for Standardization, Specimen dimensions and procedure for shear testing resistance spot, seam and embossed projection welds;
- ISO 16433:2006 - Resistance Welding - Procedure for Seam Welding of Uncoated and Coated Low Carbon Steels;
- ISO 4995:2008 - Hot-rolled Steel Sheet of Structural Quality.

As normas relevantes para a QPS exigem da qualificação e especificação, a necessidade de uma preparação e adequação dos procedimentos a serem adotados, garantindo assim soldas aprovadas.

2.3 ESPECIFICAÇÃO DO PROCESSO DE SOLDAGEM POR RESISTÊNCIA

A Especificação do Procedimento de Soldagem (EPS) é o documento onde está registrado todos os dados e valores que o operador ou soldador pode utilizar durante a fabricação de uma determinada solda. Para cada processo de soldagem por resistência que varia a especificação de material há necessidade de uma nova EPS. Para que a EPS possa ser usada na produção, é necessário antes de tudo ser qualificada, ou seja, preparar amostras adequadas e realizar a soldagem de acordo com a EPS, para isso, utiliza-se corpo de prova requisitado e estabelecido pela norma AWS C1.1M (2012) e o resultado deve ser aprovado ou reprovado, então, se for reprovado, faz-se alteração da EPS e submete novamente ao teste (MODENESI; MARQUES; BRACARENSE, 2009).

Cada manufatura ou empresa define o seu procedimento respeitando as normas pertinentes a qualificações de procedimentos de soldagem. Na EPS está escrito todo o procedimento de qualificação e como realizar a soldagem. Quando a EPS estiver completada, todas as descrições essenciais e não essenciais, estarão inclusos em cada EPS. Cada empresa pode ter a sua EPS em qualquer formato, escrita ou tabular, dependendo da necessidade de cada manufatura ou empresa (ASME BPVC IX, 2010).

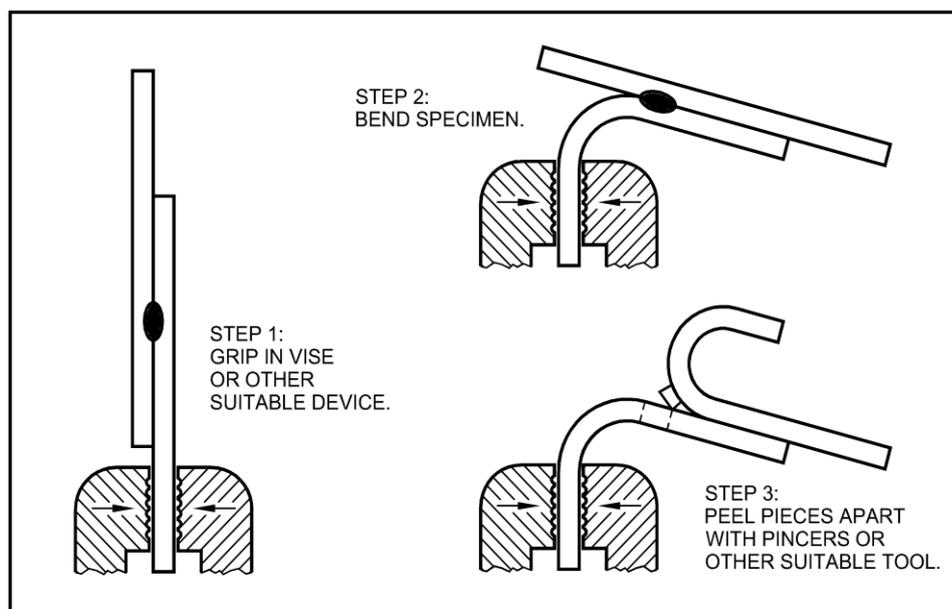
2.4 ENSAIOS DE ARRANCAMENTO

O ensaio de arrancamento é o efeito de arrancar ou separar uma chapa da outra após a realização do processo de soldagem por resistência. O ensaio é realizado prendendo a borda da chapa mais grossa em uma morsa e a outra chapa, mais fina é tracionada, sendo essa a que irá deixar na outra chapa o botão de solda AWS C1.1M (2012).

A aplicação do processo de arrancamento é normalmente aplicado em processos de soldagem por resistência, fazendo o processo por método destrutivo. Neste processo, usa-se destruir o corpo de prova para evitar a realização do processo em peças que sejam de produção AWS C1.1M (2012).

A Figura 6 ilustra passo a passo do procedimento para a realização de um ensaio de arrancamento.

Figura 6 - Passo a passo para ensaio de arrancamento.



Fonte: AWS C1.1M, 2012.

A AWS C1.1M (2012), apresenta qual é o diâmetro do botão de solda especificado para cada espessura de chapa, conforme ilustrado no Quadro 1.

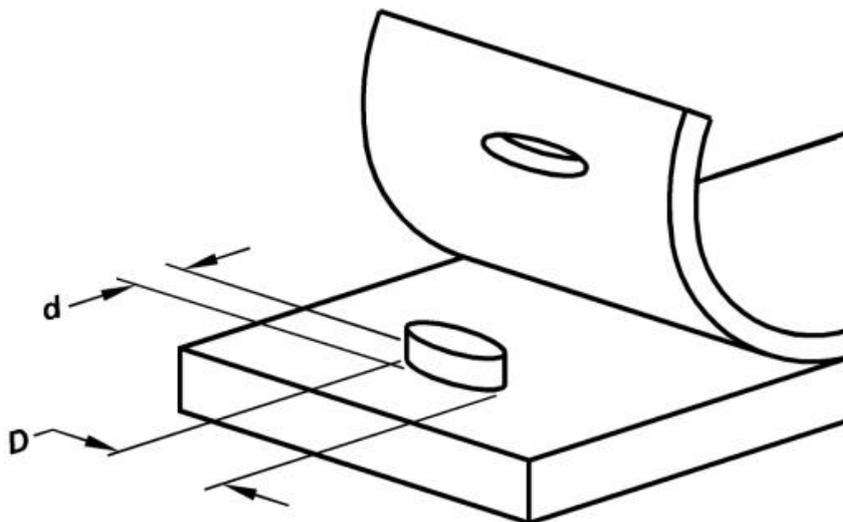
Quadro 1 – Diâmetro do botão de solda em relação a espessura da chapa.

Diâmetro da Solda = $(D + d)/2$	
Espessura da chapa mais Fina	Diâmetro da Solda Calculado
0,4	3,2
0,5	3,5
0,6	3,9
0,7	4,2
0,8	4,5
0,9	4,7
1	5
1,1	5,2
1,2	5,5
1,3	5,7
1,5	6,1
1,6	6,3
1,7	6,5
2	7,1
2,5	7,9
3	8,7

Fonte: Adaptado de AWS C1.1M (2012).

O diâmetro do botão de solda segundo a norma AWS C1.1M (2012), deve ser medido com um paquímetro ou outro equipamento de medição adequado. A Figura 7 mostra como fazer a medição do botão de solda.

Figura 7 - Como fazer a medição do botão de solda.



Fonte: AWS C1.1M, 2012.

3 METODOLOGIA

Nesta seção serão descritos os materiais e equipamentos além dos métodos e técnicas utilizadas para realização deste trabalho.

3.1 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

As amostras utilizadas para a análise foram produzidas em uma empresa multinacional de máquinas agrícolas do estado do Rio Grande do Sul, a qual disponibilizou os materiais e equipamentos necessários para a realização deste estudo. O material escolhido para produção dos corpos de prova são chapas do aço SAE 1020, com composição química ilustrada no Quadro 2.

Quadro 2 – Composição química do aço SAE 1020.

Aço	C %	Mn %	P (máx)	S (máx)
SAE 1020	0,18 a 0,23	0,30 a 0,60	0,03	0,05

Fonte: Catálogo Gerdau, 2003.

As propriedades mecânicas do aço em questão, é apresentada no Quadro 3.

Quadro 3 – Propriedades mecânicas do aço SAE 1020.

Aço	Resistência a Tração (MPa)	Limite de escoamento (MPa)	Alongamento (%)	Dureza (HB)
SAE1020	440	345	35,8	131

Fonte: Catálogo Gerdau, 2003.

Para os ensaios práticos, foram utilizados chapas que tenham dimensões de 25 mm de largura por 150 mm de comprimento e a espessura das chapas entre 0,9 mm; 1,2 mm; 1,5 mm; 1,9 mm; 2,35 mm; 2,65 mm; 3,0 mm. Os corpos de prova foram confeccionados por uma máquina tesoura guilhotina com comando numérico computadorizado (CNC) garantindo as dimensões necessárias para a realização dos testes conforme norma AWS C1.1M (2012).

Para a aplicação dos procedimentos de soldagem por resistência, foi utilizado os seguintes equipamentos e materiais:

- Máquina de soldagem por resistência;
- Chapas específicas para corpo de prova;
- Alicates de pressão para realizar o teste;
- Bancada de testes;

- Morsa para prender os corpos de prova.

A máquina utilizada para a realização dos testes é do tipo estacionária ou fixa, com especificação da potência de 150 KVA, conforme mostrado na Figura 8. A força máxima que pode ser exercida entre os eletrodos é de 680Kgf.

Figura 8 - Máquina solda ponto fixa/estacionária.



Fonte: Autor, 2016.

3.2 MÉTODOS E TÉCNICAS

De acordo com a Intermachinery (2003), os ajustes utilizados para iniciar a programação dos parâmetros de solda ponto são apresentados no Quadro 4.

Quadro 4 – Parâmetros de orientação para soldagem das chapas.

Espessura da Chapa (mm)	Força do Eletrodo (kN)	Tempo de Soldagem (s)	Corrente de Soldagem (kA)	Diâmetro Mínimo do Ponto de Solda (mm)
0,5	1,8	120	8 a 9	3,0
0,8	2,5	160	10 a 11	3,8
1,0	3,0	200	11 a 12	4,2
1,2	3,5	240	12 a 14	4,6
1,5	4,5	320	14 a 16	5,1
2,0	6,0	400	16 a 18	5,9
2,5	8,0	560	18 a 20	6,6

Fonte: Adaptado de Intermachinery, 2003.

Para iniciar o trabalho foi necessário a verificação ou calibração da máquina de soldagem por resistência, com uso do aparelho “Weldtestes MM-A380 - Miyachi” calibrado por um laboratório credenciado – MetroQuality, como mostra a Figura 9.

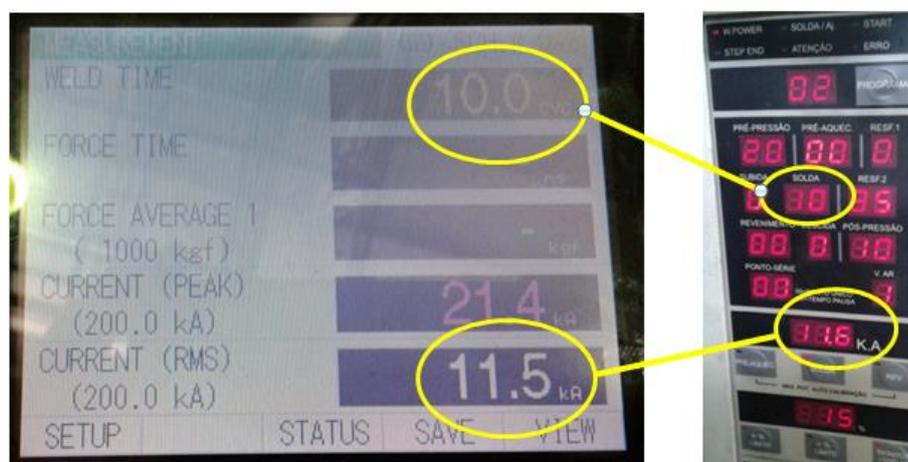
Figura 9 - Equipamento “Weldtester MM-A380 - Miyachi”.



Fonte: Autor, 2016.

A calibração da máquina é realizada fazendo-se uma comparação dos parâmetros do programa da máquina com o resultado do aparelho “Weldtester”. A Figura 10, mostra que os valores incluídos no controlador são os mesmos vistos no calibrador, ou seja, a máquina libera para os eletrodos os parâmetros setados no controlador.

Figura 10 - Weldtester x controlador da máquina de soldagem.



Fonte: Autor, 2016.

Após finalizado a calibração da máquina de soldagem por resistência, foi utilizado os parâmetros fornecidos no Quadro 5 como sendo os parâmetros de

soldagem desejados. As dimensões e quantidade mínima para cada ensaio foi definida pela norma AWS C1.1M (2012). Um total de 63 ensaios foram soldados, sendo que essas amostras foram divididas em 21 combinações diferentes de espessuras de chapas, conforme ilustrado no Quadro 5.

Quadro 5 – Espessuras das chapas e parâmetros utilizados na soldagem.

Espessura das chapas (mm)	Ciclo de solda	Corrente de solda (KVA)	Pressão do ar (kg/cm²)
0,9 x 0,9	18	8,8	5,8
0,9 x 1,5	18	9	5,8
0,9 x 1,9	18	9	5,8
0,9 x 2,35	21	10	5,8
0,9 x 2,65	21	10,6	5,8
0,9 x 3,0	23	11,3	5,8
1,5 x 1,5	20	9,5	5,8
1,5 x 1,9	20	9,5	5,8
1,5 x 2,35	20	10	5,8
1,5 x 2,65	24	10,5	5,8
1,5 x 3,0	27	11,7	5,8
1,9 x 1,9	20	10,4	5,8
1,9 x 2,35	25	11,4	5,8
1,9 x 2,65	25	11,4	5,8
1,9 x 3,0	27	11,8	5,8
2,35 x 2,35	27	12,3	5,8
2,35 x 2,65	27	12,3	5,8
2,35 x 3,0	30	13,5	5,8
2,65 x 2,65	30	13,3	5,8
2,65 x 3,0	33	13,8	5,8
3,0 x 3,0	33	13,8	5,8

Fonte: Autor, 2016.

Cada corpo de prova foi identificado com um número sequencial e com as espessuras das chapas a fim de não misturar as amostras. Após finalizar a soldagem dos corpos de prova, estes foram levados para a bancada onde possuem as ferramentas necessárias para realizar o arrancamento e comprovação do procedimento de soldagem por resistência certificando se os parâmetros setados na máquina. Na Figura 11, pode-se observar os corpos de provas com a identificação para cada combinação de diferentes espessuras, formando um conjunto de 3 peças necessárias para atender a norma AWS C1.1M (2012).

Figura 11 - Corpos de prova.



Fonte: Autor, 2016.

O teste de arrancamento foi realizado seguindo o procedimento adotado na norma AWS C1.1M (2012), conforme ilustrado na Figura 6 mostrado anteriormente.

Para facilitar o teste de arrancamento do corpo de prova, deixa-se aproximadamente 20 mm na extremidade de uma das chapas para prender o mesmo na morsa. Ao fixar o corpo de prova na morsa, deve-se ter o cuidado para que seja tracionado apenas o terceiro ponto. Na Figura 12, é ilustrado o procedimento adotado para fixar e tracionar os corpos de prova.

Figura 12 - Fixação e tracionamento do corpo de prova.



Fonte: Autor, 2016.

Para fazer o destacamento total do ponto que esta sendo tracionado é necessário um alicate tipo “bico de papagaio” que prende e realiza o teste. Todos os corpos de provas foram submetidos ao teste e aprovados. A Figura 13 mostra os corpos de prova após finalizado os testes de arrancamento.

Figura 13 - Corpos de prova após teste de arrancamento.



Fonte: Autor, 2016.

Logo após o arrancamento do ponto de solda, utiliza-se um paquímetro calibrado para garantir que a medição realizada esteja correta ao medir o diâmetro do ponto, confirmando que o mesmo esteja conforme a especificação do desenho e em paralelo a norma AWS C1.1M (2012), conforme mostrado na Figura 14.

Figura 14 - Medição do diâmetro do ponto.



Fonte: Autor, 2016.

Finalizado o processo de arrancamento e após aprovado os parâmetros de soldagem, foi elaborada uma nova EPS para registrar o procedimento utilizado no decorrer dos testes.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo será apresentado detalhadamente os resultados encontrados na realização dos experimentos.

4.1 MODELO DE EPS UTILIZADA

O Quadro 6 apresenta as informações referentes a proposta de elaboração de uma EPS utilizada em uma empresa de máquinas agrícolas do noroeste do estado do Rio Grande do Sul.

Quadro 6 – EPS para qualificação do procedimento de soldagem por resistência.

Processo de Soldagem: PONTO (resistência)			Data do Teste: 26/07/2016
Metal Base	Dados do Teste	Faixa Qualificada	Observações:
Especificação	SAE 1020	SAE 1020	
Espessura	2.65 / 3.00	2.65 / 3.00	Máquina(s): SPXX 150 KWA

PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM – PROGRAMÁVEL RQPS No. P - XXXX	
Processo: PONTO	
Tipo do Eletrodo: <input checked="" type="checkbox"/> Plano <input checked="" type="checkbox"/> Cônico <input type="checkbox"/> Especial	
Modo de Operação: <input checked="" type="checkbox"/> Único <input type="checkbox"/> Repetido <input type="checkbox"/> Costura	Resfriamento: -X-
Pré-Pressão 1: 20	Revinimento Ciclos: -X-
Pré-Pressão 2: - X -	Corrente de Revinimento: - X-
Pré Aquecimento Ciclos: - X -	Pós Pressão (Retenção): 04
Corrente Pré Aquecimento Ciclos: - X-	Pausa: - X-
Solda Ciclos: 33	Subida de Corrente: - X-
Corrente do Primeiro Ponto: - X-	Descida de Corrente: - X-
Corrente Solda (KVA): 13,8	Solenóide: -X-
Intervalo (Entre Ptos.): - X-	Contador: - X -
Impulsos (Qtde): - X-	Pressão do ar (kg/cm ²): 5,5 à 6,0

INSPEÇÃO VISUAL:

OUTROS TESTES:

Aparência: APROVADO	Tipo: ARRANCAMENTO
Mordedura: N/A	Resultado: APROVADO
Convexidade: N/A	Observação: N/A

Nome do Soldador: 4321	Matricula do Soldador: 4321
Matricula do Elaborador: 1234	Matricula do Aprovador: 1234

A EPS mostra todos os dados utilizados para a realização dos testes. Com a utilização do procedimento de soldagem por resistência descrito na EPS, comprava-se que estes parâmetros juntamente com a especificação do material atende os requisitos para ser utilizado na realização dos conjuntos soldados atendendo a qualidade do produto fabricado.

Cada configuração de espessuras de chapas, possui uma EPS específica, onde, tem-se novas informações para atender outros conjuntos produzidos.

4.2 VANTAGENS DA IMPLEMENTAÇÃO DA EPS

As vantagens da implementação das EPSs, é a garantia da qualidade quanto aos resultados alcançados nos testes de arrancamento, estes, realizados e aprovados conforme a norma AWS 1.1/1.1M (2012). O registro das EPSs, se dá para futuras verificações nas auditorias para manutenção da certificação ISO 9000. O controle do processo de soldagem por resistência é a garantia de que seus produtos seguirão sempre o mesmo procedimento e não terá desvios durante a fabricação dos conjuntos soldados.

Outro fator importante é a eliminação dos retrabalhos por não atendimento da qualidade da soldagem por resistência em alguns conjuntos mais críticos, gerando custos e tempos de produção maiores do que os tempos padrões executados. Ainda, quando há necessidade de retrabalho, a qualidade não é mais a mesma, pois sempre resulta em algum defeito posterior a correção. Outro fator relevante, é que ao recuperar peças na linha de produção final, não se consegue levar máquinas de soldagem por resistência até o produto, sendo necessário um processo alternativo para a recuperação, uma vez que a empresa não possui uma máquina de solda ponto capaz de se deslocar a outra área dentro da empresa.

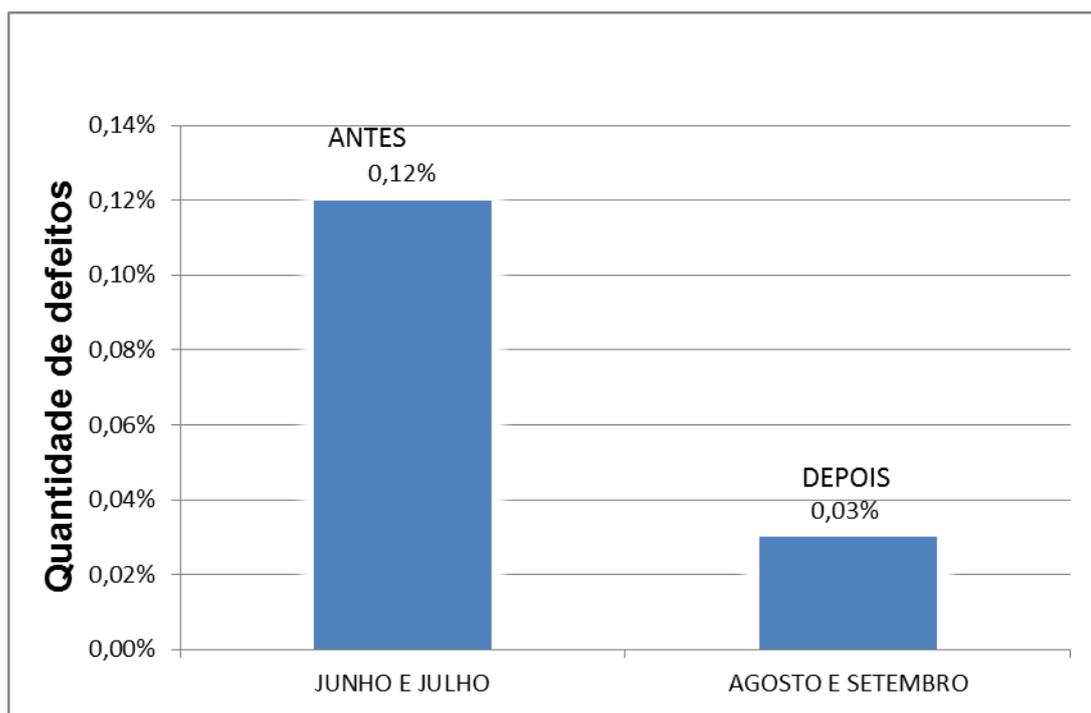
No período de 02 meses que compreendem os meses de junho e julho de 2016 foram fabricadas 34991 peças e destas 43 tiveram problemas de qualidade em processo de soldagem por resistência, totalizando 0,12% de peças defeituosas.

Para os meses de agosto e setembro de 2016 foram fabricadas 36618 peças e destas 11 com defeito na qualidade, totalizando 0,03% de peças defeituosas.

Após a implementação da nova EPS, observa-se a redução de 75,5% em defeitos gerados no processo de soldagem por resistência.

A Figura 16 mostra a porcentagem de peças não-conformes produzidas nos meses de junho e julho de 2016 versus a porcentagem de peças fabricadas após a implementação das novas EPSs, tendo como novo período de medição para análise os meses de agosto e setembro de 2016.

Figura 15 – Porcentagem de peças não-conformes antes versus depois da implementação das novas EPSs.



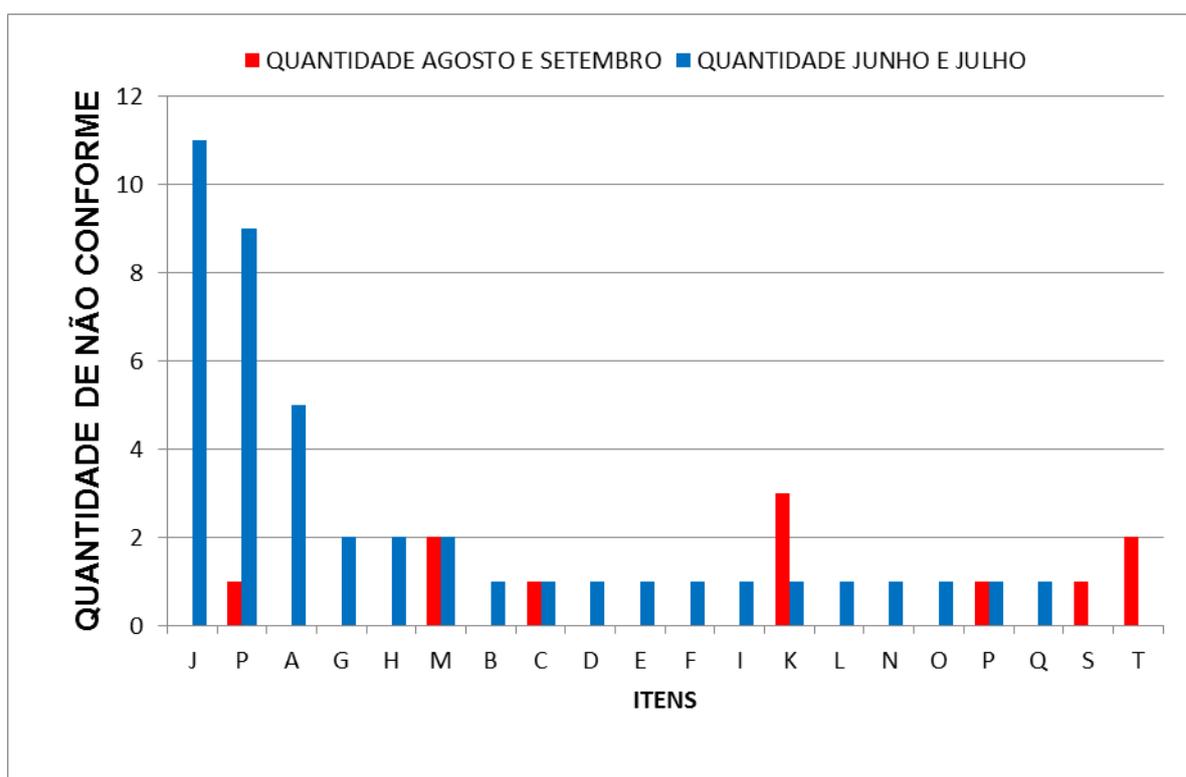
Fonte: Autor, 2016.

A elaboração da nova EPS comprova a redução de defeitos na fabricação de peças com o processo de soldagem por resistência. A Figura 15 mostra a quantidade de não-conformes por conjunto fabricado, comparando o antes e depois da implementação das novas EPSs.

Na comparação da quantidade de defeitos gerados na produção, foi utilizado amostragem por porcentagem, motivo este, que nos períodos comparados a quantidade de peças fabricadas foi diferente. O levantamento dos dados iniciais do período que compreende os meses de junho e julho de 2016 mostra que há 0,12% de peças geradas na produção com problemas no processo de soldagem por resistência. Na comparação após a utilização das novas EPSs, a porcentagem de peças não-conforme diminuiu, chegando a um resultado de 0,03% de defeitos gerados no processo estudado.

A Figura 16 mostra os resultados ao implementar novas EPSs a quantidade de defeitos reduziu consideravelmente devido aos novos parâmetros utilizados para a fabricação das peças.

Figura 16 - Quantidade de peças não-conformes por conjunto nos meses de junho e julho comparando com os meses de agosto e setembro de 2016.



Fonte: Autor, 2016.

A Figura 16 apresenta a quantidade de peças não-conforme por item, sendo as colunas em azul, os itens que possuíam defeitos gerados no processo de soldagem por resistência. Já as colunas em vermelho, são itens que mesmo depois das novas EPSs continuam com peças não-conforme. Portanto, foi identificado que os itens que continuam com defeitos é por que possuem uma junta de chapas com maior dificuldade de manter um processo anterior com maior precisão de fabricação.

No momento inicial do estudo foi observado uma quantidade de 18 itens de peças não-conforme, contra 7 peças que mostraram defeitos. A Figura 16 mostra a ocorrência de não conformidades em dois itens que não possuíam defeitos, sendo estes, identificados por problemas na operação de dobra dos componentes.

4.3 DISCUSSÃO SOBRE OS RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS

A empresa onde foi realizado o trabalho atenta para a validação da EPS e QPS somente pelo processo de arrancamento, contudo, este estudo não teve aplicações em comparação com outros métodos ou tipos de procedimento para a realização de validação dos testes de soldagem por resistência.

Comparando o resultado dos experimentos, verifica-se que a aplicação dos parâmetros utilizados no procedimento de soldagem por resistência foram eficazes para validar o experimento realizado, pois todos os corpos de prova, independentemente da espessura das chapas, atenderam os requisitos da norma AWS C1.1M (2012).

Sempre que realizar um teste ou ensaio de arrancamento para uma nova EPS, há a necessidade de novo teste com corpo de prova, e caso não seja satisfatório o teste, é necessário alterar os parâmetros do controlador até que se obtenha os corpos de provas aprovados.

Portanto, para ter uma boa qualidade na soldagem por resistência, é necessário que as chapas estejam livres de óleos, graxas, pintura e outros objetos isolantes que possam impedir a total ou parcialmente a passagem da corrente elétrica para realizar o ponto de solda.

Um fator importante na soldagem por resistência é o espaçamento entre os pontos, evitando aglomeração de pontos em algumas áreas da peça e falta de ponto em outras locais da peça.

Para conjuntos montados que recebem vibrações, o processo de soldagem por resistência oferece a estes conjuntos uma maior resistência. Para conseguir esta performance e absorver as vibrações sem romper os pontos, é necessário que se mantenha uma uniformidade no diâmetro dos pontos de solda, pois, pontos com diâmetro maiores, a resistência é menor.

A Figura 17 apresenta um problema com a união de chapas onde as mesmas não possuem um perfil com uma união perfeita. Nestas situações, foi identificado que os parâmetros de soldagem por resistência devem ser alterados para atender a qualidade dos conjuntos soldados. Dependendo da junta a ser soldada, os parâmetros devem ser elevados, ou seja, se houver a necessidade de aumentar alguns parâmetros, tanto os essenciais quanto os demais devem ser ajustados.

Figura 17 – Chapas com problema de perfil ou união.



Fonte: Autor, 2016.

A máquina de solda ponto é um dos principais elementos e que possui uma grande influência no processo de soldagem por resistência, pois é ela que vai executar todos os parâmetros e funções ao realizar a solda, por isso, é necessário que a máquina esteja em perfeitas condições, tanto de manutenção quanto de operação.

Outro recurso necessário e importante no processo de fabricação das peças é o operador, este deve receber treinamentos específicos para executar soldas de qualidade principalmente onde o processo é manual.

As falhas apresentadas nos itens após a elaboração do procedimento para qualificação do processo de soldagem por resistência, podem ter influência, por exemplo, na escolha errada do programa no momento de executar a soldagem dos conjuntos, ou ainda, relação direta com não-conformidades nas peças que vem de operações anteriores.

CONCLUSÃO

De acordo com a aplicação do procedimento de soldagem por resistência para chapas de aço com baixo teor de carbono, as seguintes conclusões podem ser evidenciadas:

O desenvolvimento deste estudo permitiu aplicação prática e confiável na realização dos testes de arrancamento no processo de soldagem por resistência com chapas de aço que tem como especificação SAE 1020. Deste modo, os resultados obtidos foram satisfatórios para as novas QPS e EPS.

Para valores de corrente e ciclo de solda onde as chapas têm uma variação de no máximo 0,5 mm de espessura, é possível usar parâmetros iguais ou muito próximos, assim sendo, para a mesma máquina é possível utilizar a EPS também para duas ou três combinações de espessuras de chapas, desde que o teste de arrancamento contempla estas características.

Os principais parâmetros no processo de soldagem por resistência têm influência direta na qualidade do ponto de solda, isto é, na condição ideal de união das chapas ao realizar a solda nos conjuntos soldados.

Os melhores parâmetros para os procedimentos de soldagem por resistência para cada EPS e QPS foram determinados. O método aplicado de arrancamento seguindo a norma AWS C1.1M (2012), mostrou-se eficiente para aprovação do procedimento.

Antes de realizar a soldagem por resistência, o profissional de soldagem deve ficar atento as variações de processos anteriores das peças que sofrerão o processo de solda ponto, que muitas vezes, estas peças possuem perfil ou dobras irregulares, necessitando alteração dos parâmetros de soldagem, principalmente em tempo de pré-pressão e força nos eletrodos, pois antes de realizar a soldagem é necessário que as chapas estejam totalmente encostadas.

A sugestão para trabalhos futuros seria o desenvolvimento de uma EPS e QPS que atendam várias máquinas com os mesmos parâmetros de soldagem por resistência, atentando para que as máquinas tenham a mesma potência.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGACHE, S.; ZHANG, H. **Selection of Schedules Based on Heat Balance in Resistance Spot Welding**. Welding Journal, Jul. 2003, p. 179-183.
- ANDERSON, O. **Process Planning of Resistance spot Welding**. 2013.
- ASM HANDBOOK. **Welding, Brazing and Soldering**. 1993.
- ASME BPVC IX: 2010. **Boiler & Pressure Vessel Code, Section IX, Welding and Brazing Qualifications, as required by the States of Colorado**. ASME, 2010.
- AURES, J. E. V. **Estudo da Formação, Geometria e Resistência do Ponto na Soldagem por Resistência: Uma abordagem Estatística**. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Tecnologia Departamento de Engenharia Mecânica. Brasília: Universidade de Brasília, 2006.
- AWS A3.0M. **Standard Welding Terms and Definitions Including Terms for Adhesive Bonding, Brazing, Soldering, Thermal Cutting, and Thermal Spraying**. 2001.
- AWS C1.1M. **Recommended Practices for Resistance Welding**. 2012.
- AWS C1.4M. **Specification for Resistance Welding of Carbon and Low-Alloy Steels**. 2009.
- AWS D1.1/D1.1M. **Structural welding Code – Steel**. 2010.
- AWS D8.1M. **Specification for Automotive Weld Quality - Resistance Spot Welding of Steel**. 2013.
- AWS D8.7M. **Recommended Practices for Automotive Weld Quality Resistance Spot Welding**. 2005.
- BATALHA, G. F. **Processos de fabricação: junção, soldagem e brasagem**. Material auxiliar ao livro, KALPAKJIAN, S. & SCHIMD, S. Manufacturing Engineering and Technology, 4 ed. ed. Prentice Hall, 2001, editado pelo autor, 2003.
- BRACARENSE, A. Q. **Processo de Soldagem por Resistência**. Programa de Pós-Graduação em engenharia Mecânica. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2000.
- BRANCO, H. L. O. **Avaliação de Capas de Eletrodos Utilizadas na Soldagem por Resistência de Chapas Galvanizadas Automotivas**. Dissertação (mestrado) – Setor de Tecnologia. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2004.
- BRANDI, S. D. **Soldagem por resistência**. In: WAINER, E.; BRANDI S. D.; DE MELLO, F. B. H. Soldagem Processos e Metalurgia. São Paulo, 1992. p. 217-242.

DAMASCO, A. **Soldagem a ponto por resistência elétrica de juntas de chapa/chapa e chapa/tubo de aço de baixo carbono com diferentes composições químicas, espessuras e revestimentos.** Tese (Doutorado em Materiais e Processos/ Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1995.

FÜHR, T. A. **Reconhecimento e Avaliação dos Riscos Ambientais Gerados nos Processos de Soldagem de uma Empresa do Segmento Metal Mecânico.** Pós-Graduação em Engenharia de Segurança do Trabalho. Ijuí: Universidade Regional Do Noroeste Do Estado Do Rio Grande Do Sul, 2012.

GERDAU. **Aços Finos Piratini – Manual dos Aços,** 2003. Disponível em: <http://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariamecanica/maprotec/catalogo_acos_gerdau.pdf>. Acesso em: 13 out. 2016.

INTERMACHINERY COMÉRCIOS LTDA. **I Seminário de Solda a Ponto.** São Paulo: 2003, CD-ROM.

ISO 4995 - **Hot-rolled Steel Sheet of Structural Quality.** 2008.

ISO 14273. **International Organization for Standardization, Specimen dimensions and procedure for shear testing resistance spot, seam and embossed projection welds.** 2000.

ISO 16433. **Resistance Welding - Procedure for Seam Welding of Uncoated and Coated Low Carbon Steels.** 2006.

MACHADO, I. G. **Soldagem e técnicas convexas: processos.** Porto Alegre, 1996.

METALURGICA MARIMAX. **Manual de produtos.** Disponível em: <<http://www.marimax.com.br>>. Acesso em: 11 out. 2016.

MARQUES, P. V.; MODENESI P. J.; BRACARENSE A. Q. **Soldagem – Fundamentos e Tecnologia.** 3 ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2009.

NAKANO, R. K. **Influência da Taxa de Deformação na Falha de Uniões por Solda Ponto.** Dissertação (Mestrado em Engenharia/ Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

NASCIMENTO, V. C.; SCOTTI, A. **Avaliação do Princípio de Auto-ajuste de Parâmetros de Soldagem a Ponto por Resistência, Baseado na Medição da Resistência Dinâmica.** In: XXX Congresso Nacional de Soldagem. Rio de Janeiro, 2004.

ROGEON, P. C. P.; COSTA, J.; SIBILA, G.; SAINDRENAN, G. **Characterization of electrical contact conditions in spot welding assemblies.** Journal of Materials Processing technology, 2007.

RWMA. **Resistance Welder Manufacturer's Association,** 2003.

SANTOS, F. B. **Estudo da Eficiência do Processo de Soldagem de pontos por Resistência Elétrica Utilizado na Indústria Automobilística.** Mestrado profissional de sistema de Gestão. Universidade Federal Fluminense. Niterói, 2006.

SANTOS, W. A. **Estudo da Influência dos parâmetros de regulagem na soldagem por resistência na indústria automobilística.** Monografia – Pós-graduação em engenharia de soldagem. Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia. São Caetano do Sul, 2013.

STOCCO, D. **Caracterização de Solda por Resistência a Ponto Através de Avaliações não Destrutivas.** Dissertação – Mestre em Engenharia Mecânica. Escola Politécnica da universidade de São Paulo. São Paulo, 2010.

VARGAS, J. E. **Estudo da Formação, Geometria e Resistência do Ponto na Soldagem por Resistência: Uma Abordagem Estatística.** Dissertação (Mestrado em Sistemas Mecatrônicos). Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, 2006.

VOGLER, M.; SHEPPARD, S. **Electrical Contact Resistance under High Loads and Elevated Temperatures.** Welding Journal. June, 2003.