

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação
Curso de Especialização em Soldagem

Leandro Prado Lima

**AVALIAÇÃO DA VIDA ÚTIL DOS ELETRODOS REVESTIDOS E NÃO
REVESTIDOS PARA SOLDA A PONTO**

Belo Horizonte
2023

Leandro Prado Lima

**AVALIAÇÃO DA VIDA ÚTIL DOS ELETRODOS REVESTIDOS E NÃO
REVESTIDOS PARA SOLDA A PONTO**

Monografia de especialização apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Soldagem da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para a obtenção do título de Especialista em Soldagem.

Orientador: Prof. Ariel Rodriguez Arias

Belo Horizonte
2023

L732a	<p>Lima, Leandro Prado.</p> <p>Avaliação da vida útil dos eletrodos revestidos e não-revestidos para solda a ponto [recurso eletrônico] / Leandro Prado Lima. - 2023.</p> <p>1 recurso online (45 f. : il., color.) : pdf.</p> <p>Orientador: Ariel Rodriguez Arias.</p> <p>Monografia (especialização) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.</p> <p>Bibliografia: f. 44-45.</p> <p>Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.</p> <p>1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Aço inoxidável - Teses. 3. Processos - Teses. 4. Soldagem - Teses. I. Rodríguez Arias, Ariel. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 621(043)</p>
-------	---



Universidade Federal de Minas Gerais
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia Mecânica
Programa de Pós-Graduação
Curso de Especialização em Soldagem



ATA 12ª/2023 DA DEFESA DE MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO

No dia 22 de dezembro de 2023, às 10:00 h, a Comissão Examinadora se reuniu remotamente para avaliar o trabalho:

Título: AVALIAÇÃO DA VIDA UTIL DOS ELETRODOS REVISTIDOS E NAO REVISTIDOS PARA SOLDA A PONTO

Aluno: LEANDRO PRADO LIMA – Matrícula: 2021664494

Local: Remotamente via plataforma "TEAMS".

Parecer:

A Comissão Examinadora, após a apresentação pelo (a) candidato (a) durante 30 minutos e após ter argüido o(a) candidato(a) por 28 minutos, é de parecer favorável à aprovação do trabalho de monografia com a nota final de 85 e com (com ou sem) sugestões de modificação.

Sugere-se o prazo de 30 dias para efetuar-se as modificações sugeridas com revisão final acompanhada e homologada pelo orientador Prof. Dr. Ariel Rodriguez Arias.

Assinaturas:

Prof. Dr. Ariel Rodriguez Arias
DEMEC/UFMG – Orientador

Prof. Me. Peter Franklin Ribeiro de Souza
IFMG – Avaliador

Engo. Dante Otavio Silvano Cruz
FIAT – Avaliador

Aluno: Leandro Prado Lima

RESUMO

Este estudo aborda a soldagem a ponto por resistência (RSW) de chapas de aço galvanizado com objetivo de avaliar a vida útil de diferentes tipos de eletrodos, sendo eles os não revestidos e os com revestimento na face. Durante o processo de soldagem, a vida útil do eletrodo é influenciada pelo processo de degradação de sua face em função não só dos parâmetros de soldagem, das camadas de zinco na chapa e de seus contaminantes como também de algumas variáveis importantes do procedimento, como vazão e temperatura da água para refrigeração dos eletrodos. Ao longo dos testes, foi verificado que os eletrodos revestidos no processo melhoram o desempenho de produção, pois, durante toda a vida útil, não há necessidade de realizar limpeza nem nova afiação das pontas, o que é conhecido como fresagem. A faixa de corrente observada durante a vida útil do eletrodo revestido é relativamente maior em função da taxa de crescimento de sua face e, em alguns casos, poderia gerar problemas em relação aos requisitos de qualidade da solda. Durante o trabalho, a degradação da face dos eletrodos não revestidos pode ser controlada pela fresagem, o que garante um melhor controle do processo no que tange aos requisitos de qualidade da junta a ser soldada, porém, em alguns casos, pode afetar o processo de produção no aumento de tempo de ciclo da célula. Assim, este trabalho avalia as vantagens e desvantagens práticas na utilização de cada tipo de eletrodo usado na RSW, avaliando requisitos importantes, por exemplo, soldabilidade, custo por ponto de solda, capacidade produtiva e, não menos importante, a qualidade da junta ser soldada.

Palavras-chave: análise; parâmetros; eletrodos; processos de soldagem; resistência.

ABSTRACT

This study looks at resistance spot welding (RSW) of galvanized steel sheets in order to evaluate the service life of different types of electrodes. These are uncoated and face-coated. During the welding process, the service life of the electrode is influenced by the degradation processes of the electrode face as a function of the welding parameters, zinc layers on the sheet and their contaminants, as well as some important process variables such as the flow rate and temperature of the water used to cool the electrodes. During the tests, it was found that the electrodes coated in the process improve production performance because there is no need to clean and resharpen the tips throughout their useful life. This process is known as milling. The current range observed during the service life of the coated electrode is relatively higher due to the growth rate of the electrode face and in some cases could cause problems in relation to the quality requirements of the weld. During the work, the degradation of the uncoated electrode face can be controlled by the milling process, which guarantees better control of the process in terms of the quality requirements of the joint to be welded, but in some cases can affect the production process by increasing the cycle time of the cell. This work therefore evaluates the practical advantages and disadvantages of using each type of electrode used in the RSW process, assessing some important requirements such as weldability, cost per weld point, production capacity and not least the quality of the joint to be welded.

Keywords: analysis; parameters; electrodes; welding processes; resistance.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação soldagem por pontos	12
Figura 2 – Curva de resistência dinâmica teórica.....	14
Figura 3 – Ciclo de soldagem.....	17
Figura 4 – Sistema de suporte e refrigeração de um eletrodo	20
Figura 5 – Sistema de suporte e refrigeração de um eletrodo	22
Figura 6 – Diâmetro da face do eletrodo em função da vazão e da temperatura.....	23
Figura 7 – Cobre deixado na chapa de aço	24
Figura 8 – Face do eletrodo em processo de degradação	24
Figura 9 – Temperatura do eletrodo durante a soldagem	25
Figura 10 – Geometria do eletrodo utilizado.....	25
Figura 11 – Equipamentos de fresagem.....	26
Figura 12 – Efeitos da falha de fresagem	26
Figura 13 – Entupimento no equipamento de fresagem.....	27
Figura 14 – Curva <i>Stepper</i> – Comando WTC	28
Figura 15 – Representação da face do eletrodo revestido com titânio	29
Figura 16 – Modelos de eletrodo com face de titânio – Huys.....	29
Figura 17 – Modelo de dispositivo de solda.....	33
Figura 18 – Processo de solda das peças	34
Figura 19 – Célula de solda ponto a ponto – Projeto Túnel	34
Figura 20 – Posição de soldagem	35
Figura 21 – Foto de eletrodo revestido.....	36
Figura 22 – Eletrodo não revestido – Classe 2	36
Figura 23 – Taxa de viação da face do eletrodo	39
Figura 24 – Resultados – comparação entre os eletrodos.....	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Descrição dos materiais	18
Tabela 2 – Tipo de material da chapa e HLSA	32
Tabela 3 – Revestimento.....	36
Tabela 4 – Parâmetros iniciais – soldabilidade.....	38
Tabela 5 – Resultados – soldabilidade.....	38
Tabela 6 – Resultados – densidade de corrente para eletrodo não revestido.....	40
Tabela 7 – Resultados – custo de eletrodo por robô por ano	41
Tabela 8 – Resultado – efeitos da fresagem	41
Tabela 9 – Resultados – densidade de corrente para eletrodo revestido	42
Tabela 10 – Resultados – custo do eletrodo por robô por ano.....	43

LISTA DE SIGLAS

Dureza HB

Dureza Brinell (HB)

I.A.C.S.

International Annealed Copper Standard

RWMA

Resistance Welder Manufacturers' Association

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	12
2.1	Soldagem por pontos: contextualização	12
2.1.1	Fundamento do processo	12
2.1.2	Parâmetros	15
2.1.3	Corrente de soldagem	15
2.2	Força aplicada nos eletrodos	15
2.2.1	Tempo de soldagem	16
2.2.2	Ciclo de operação do processo de soldagem por resistência por pontos	16
2.3	Os eletrodos aplicados no processo de soldagem por pontos	17
2.3.1	Material dos eletrodos	17
2.3.2	Geometria dos eletrodos	19
2.3.3	Variáveis do processo	20
2.3.4	Qualidade da solda	21
2.4	Consumíveis utilizados no processo de soldagem a ponto	21
2.5	Mecanismo de degradação do eletrodo	23
2.6	Processo de fresagem de eletrodos	25
2.7	Compensação de desgaste do eletrodo	27
2.8	Eletrodos revestidos de titânio	28
2.8.1	Parâmetros de soldagem à resistência por pontos	30
3	METODOLOGIA	31
4	ESTUDO DE CASO	32
4.1	Escolha do material	32
4.2	Análise do processo de solda	34
4.3	Análise de caso	35
4.3.1	Análise do eletrodo revestido	35
4.3.2	Análise do eletrodo não revestido	36
4.3.3	Soldabilidade	37
4.4	Soldagem	37
5	RESULTADOS	39
5.1	Análise do eletrodo não revestido	39
5.2	Análise do eletrodo revestido	41

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	44
REFERÊNCIAS	45

1 INTRODUÇÃO

A soldagem por resistência, *resistance spot welding* (RSW), é um processo fundamental na indústria automotiva, amplamente reconhecido por sua eficácia na união de chapas metálicas. Esse método tem sido o principal na montagem de carrocerias e chassis de veículos (Branco, 2019). A soldagem a ponto por resistência destaca-se nesse contexto devido à sua facilidade e confiabilidade, resultando em produtos com qualidade e resistência satisfatórias, e à não adição de material, o que a deixa com baixo custo de investimento e produção.

Atualmente, estima-se que um carro popular tenha aproximadamente 5.000 pontos de solda em sua carroceria, mostrando ser um processo altamente viável para produção de automóveis. A soldagem por resistência é excelente para fixar rapidamente peças umas às outras, pois a fusão pode ser concluída em fração de segundos. Também é um tipo de soldagem ideal para ser automatizado. Com a ajuda da automação robótica, a soldagem a ponto por resistência pode produzir peças com mais rapidez e eficiência do que a soldagem a ponto manual ou a soldagem a ponto em pedestal.

A soldagem a ponto é um processo em que as peças de metal são fundidas por uma alta concentração de calor e subsequente resfriamento produzido por uma forte corrente elétrica no local da união. A fusão e a solidificação do material ocorrem nesse ponto de solda, enquanto os eletrodos aplicam força “[...] antes, durante e após a aplicação da corrente para restringir a área de contato da solda nas superfícies sobrepostas” (Soares *et al.*, [2021]). Durante esse procedimento, “as superfícies de contato, na região de concentração de corrente[,] são aquecidas por um breve pulso de baixa tensão e alta corrente [...]”, formando o que é conhecido como ponto de solda (Soares *et al.*, [2021]).

No entanto, na soldagem a ponto, podem ocorrer problemas de qualidade, por exemplo, rebarbas, pontos soltos e pontos profundos com alta indentação. A correção desses defeitos muitas vezes envolve ajustes nos parâmetros de corrente elétrica aplicados no equipamento, avaliação da face dos eletrodos e, em caso de soldas robotizadas, regulagem correta da posição do robô. Assim, este estudo se concentra na análise experimental dos tipos de eletrodos utilizados na produção dos pontos de solda, pois esses consumíveis entram em contato direto com a peça a ser soldada e sofrem uma degradação mecânica ao longo tempo, principalmente em função do crescimento da face.

Para isso, foram realizados testes em uma peça de carroceria para avaliação de pontos de solda com diferentes tipos de eletrodos, sendo eles revestidos e não revestidos, tendo, dessa forma:

a) **objetivo geral:** realizar uma avaliação da vida útil dos eletrodos revestidos e não revestidos. Para um melhor detalhe, o objetivo geral foi dividido em alguns pontos específicos que serão avaliados ao decorrer deste trabalho.

b) **objetivos específicos:**

- comparar o número de pontos por eletrodo dentro da vida útil;
- avaliar o impacto financeiro referente ao custo do consumível;
- mensurar o impacto no tempo de ciclo de produção em função de troca de eletrodo;
- entender as variáveis de processo que influenciam a taxa de crescimento da face do eletrodo.

Para a validação das inspeções visuais, os testes destrutivos e as análises com ultrassom foram utilizados para verificar os efeitos da substituição dos eletrodos. Os parâmetros de solda, como corrente elétrica, força e tempo, foram mantidos constantes para os diferentes tipos de eletrodos avaliados. O intuito foi fornecer conclusões práticas e aplicáveis à indústria automotiva referentes ao tipo de eletrodo a ser usado.

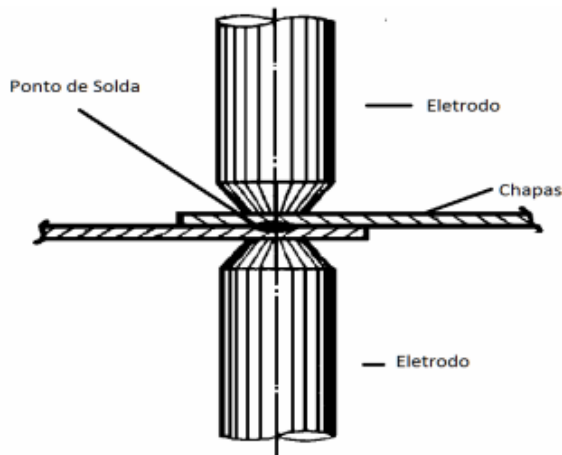
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Soldagem por pontos: contextualização

Conforme destacado pela Resistance Welder Manufacturers' Association (RWMA, 1989), a soldagem por resistência por pontos é amplamente empregada na união de peças metálicas sobrepostas. Esse processo é conhecido por sua eficiência em termos de baixo custo e alta velocidade, tornando-se especialmente vantajoso para juntas que não exigem desmontagem (RWMA, 1989).

A soldagem por pontos é quase exclusivamente utilizada para soldar chapas metálicas, predominantemente de aço. Nesse método, a corrente passa entre duas ou mais chapas sobrepostas por meio de eletrodos de pequeno diâmetro na face de contato (normalmente entre 3 e 8 mm), acompanhada pela aplicação de força axial para formar uma solda pontual. Geralmente, as chapas soldadas dessa maneira não excedem três milímetros de espessura (Marques; Modenesi; Bracarense, 2009). A Figura 1 ilustra de forma esquemática o processo.

Figura 1 – Representação soldagem por pontos



Fonte: Christofoletti (2013, p. 16)

2.1.1 Fundamento do processo

De acordo com as pesquisas de Fonseca (1999) e RWMA (1989), a soldagem por resistência por pontos é executada mediante a passagem de corrente elétrica em um intervalo de tempo definido, levando à fusão de um pequeno volume de material por meio dos eletrodos com a aplicação de uma força localizada. Durante esse procedimento, a corrente é aplicada até

que ocorra a fusão do material, e a força dos eletrodos é aplicada antes, durante e depois da passagem da corrente elétrica.

A geração de calor responsável pela fusão ocorre devido ao efeito Joule, causado pela resistência à passagem da corrente elétrica. Dados o curto percurso percorrido pela corrente elétrica no material base e o breve período de soldagem, são necessárias correntes elétricas elevadas para realizá-la. O aquecimento no local da solda resulta da interação combinada de três parâmetros distintos, conforme discutido por Branco (2004), Fonseca (1999) e Marques, Modenesi e Bracarense (2009).

Considerando os fatores relevantes na soldagem por resistência por pontos, destacamos os seguintes termos essenciais:

- a) I – corrente elétrica;
- b) R – resistência ôhmica da junta a ser soldada;
- c) t – tempo de aplicação da corrente de soldagem.

Ao reunir esses termos em uma única expressão, obtemos a equação 1, que representa a lei de Joule aplicada ao condutor:

$$Q=I^2 \times R \times t \tag{1}$$

em que Q representa o calor gerado durante o processo de soldagem.

Observando a equação mencionada, é evidente que a corrente elétrica é o fator dominante na geração de calor, já que é o termo de maior grau (Fonseca, 1999).

Durante o processo de soldagem, parte do calor é direcionada para a criação da solda, enquanto outra parte é dissipada por condução, convecção e radiação para o material base e o eletrodo. Geralmente a extensão dessas perdas é desconhecida (Branco, 2004).

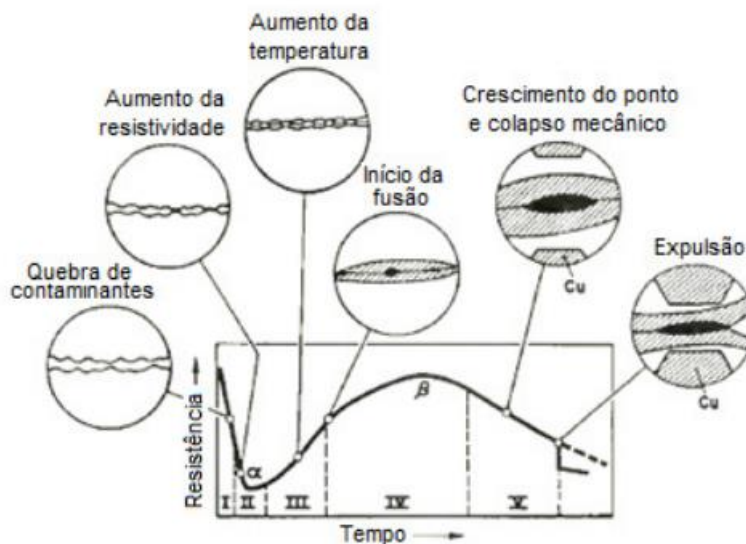
Embora a lei de Joule aplicada a condutores seja comumente usada para representar a quantidade de calor gerada no processo de soldagem por pontos, essa equação pode ser considerada uma simplificação excessiva, uma vez que a resistência varia de maneira complexa durante a soldagem, influenciada por fatores como a força aplicada pelos eletrodos, a temperatura, o tempo e as características do material soldado, sendo a variação da resistência ao longo do processo conhecida como resistência dinâmica.

$$Q = \int I^2 \times R \times dt \tag{2}$$

em que Q representa o calor gerado no processo.

Como a resistência elétrica varia durante o processo de soldagem, entender o seu comportamento pode ajudar a desenvolver estratégias para um melhor controle dos parâmetros de solda e melhor definição da vida útil do eletrodo em relação à taxa de crescimento de sua face. De acordo com Nascimento (2008), a resistência dinâmica é constituída pela resistência do material, do revestimento e de constrição. Sua magnitude depende da condição da superfície da grade e do eletrodo, do tamanho e do perfil da face do eletrodo e da força aplicada.

Figura 2 – Curva de resistência dinâmica teórica



Fonte: Turetta (2016, p. 19)

Entre os estágios I e V (Figura 2), observa-se a camada de óxidos (I) que podem estar presentes nas chapas, funcionando como isolantes da evaporação da camada de zinco sendo quebrada, observando uma diminuição da resistência (II). Logo após, vê-se o aumento da resistividade e da fusão entre III e IV, porém, durante o processo, pode haver expulsão do material, o que gera uma queda brusca da resistência (V).

Este é um ponto de alta geração de calor, então é esperado que a superfície da grade não atinja sua temperatura de fusão durante a passagem de corrente devido à alta condutibilidade térmica dos eletrodos.

2.1.2 Parâmetros

Os parâmetros de soldagem desempenham um papel crucial na eficiência da execução desse procedimento e na determinação das propriedades mecânicas do ponto soldado. Na soldagem por pontos, três parâmetros principais têm um papel fundamental: a corrente de soldagem, a força aplicada nos eletrodos e o tempo de soldagem (Vargas, 2006).

Embora a resistência elétrica da peça não seja um parâmetro diretamente controlado no processo de soldagem, sua importância é significativa na geração de calor (Vargas, 2006).

2.1.3 Corrente de soldagem

De acordo com Vargas (2006), a corrente de soldagem é o parâmetro mais influente na geração de calor, e mudanças em sua magnitude podem alterar significativamente as propriedades da solda.

No processo de soldagem por pontos, a corrente pode ser de dois tipos distintos, como discutido por Fonseca (1999):

- a) alternada: gerada por transformadores monofásicos ou trifásicos, operando em frequências iguais ou diferentes da rede de distribuição;
- b) contínua: podendo ser direta, pulsada ou com picos de corrente.

É fundamental encontrar um equilíbrio entre a corrente e o tempo de soldagem. Geralmente, ao aumentar aquela, é necessário reduzir este. Nos procedimentos de soldagem por pontos, os valores de corrente podem atingir níveis superiores a 15 kA (Vargas, 2006).

2.2 Força aplicada nos eletrodos

Como afirmado por Vargas (2006), a força aplicada serve para aproximar, posicionar e unir as chapas que serão soldadas. A tensão mecânica resultante dessa força na peça está presente antes, durante e após a aplicação da corrente de soldagem. Esse parâmetro desempenha um papel importante na qualidade dos pontos soldados.

A força pode ser gerada por sistemas hidráulicos, pneumáticos, magnéticos ou mecânicos, conforme discutido por Fonseca (1999). O aumento da força afeta indiretamente a geração de calor, uma vez que reduz as resistências de contato. Além disso, ela é responsável por manter o metal fundido no lugar, garantindo a consolidação adequada do ponto (Fonseca, 1999).

Durante o processo de soldagem, a força aplicada na pinça cria uma flexão nos braços, pois os materiais são ligas de cobre, de alumínio ou de latão. Segundo Furlanetto (2014), com a flexão dos braços, a pressão interna do ponto ultrapassa a aplicada pelos eletrodos, permitindo a expulsão de material.

2.2.1 Tempo de soldagem

Conforme observado por Vargas (2006), o tempo de aplicação da corrente de soldagem no ciclo desta deve ser inversamente proporcional à intensidade da corrente de soldagem. A quantidade de calor gerada na junta, por sua vez, é diretamente proporcional ao tempo de aplicação da corrente elétrica. Portanto, o tempo deve ser otimizado com base nos parâmetros de soldagem (Fonseca, 1999).

No processo, a unidade de tempo é denominada ciclo. Cada ciclo é igual a $1/f$, em que f (Hz) representa a frequência da rede. No Brasil, a frequência pode ser de 50 Hz ou 60 Hz, dependendo da região, então cada ciclo equivale a $1/50$ ou $1/60$ segundos (Fonseca, 1999).

2.2.2 Ciclo de operação do processo de soldagem por resistência por pontos

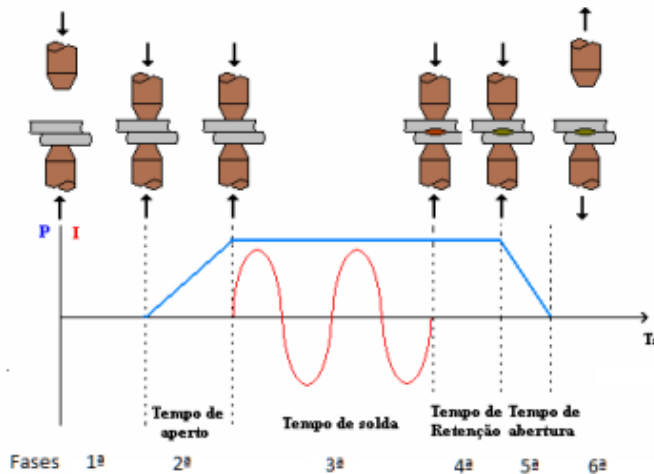
Na Figura 3, apresenta-se um ciclo hipotético básico de soldagem por pontos, em que “P” denota a força aplicada pelos eletrodos nas chapas e “I” representa a corrente de soldagem (Nascimento, 2008). Esse ciclo pode ser dividido em seis fases distintas, e a soma dos tempos de todas as fases constitui o tempo total de soldagem.

Na primeira fase, os eletrodos iniciam o movimento de descida para pressionar e posicionar as chapas. É essencial que as chapas sejam pressionadas de maneira adequada para garantir um bom assentamento e evitar problemas, por exemplo, a expulsão de metal fundido, o que pode resultar em rebarbas no ponto soldado. Essa etapa é seguida pela aplicação da força necessária para a execução da soldagem, na segunda fase. Esse parâmetro, no comando WTC, é conhecido como *Squeeze*.

Durante a terceira fase, os eletrodos são mantidos tensionados, e a corrente de soldagem é aplicada, podendo ser contínua ou alternada. Posteriormente, na quarta fase, a corrente de soldagem é desligada assim que o ponto de solda é formado, mas os eletrodos permanecem pressionando as chapas para auxiliar na solidificação do ponto de solda. Esse parâmetro é conhecido como *hold*.

Na quinta e na sexta fases, a força de soldagem aplicada pelos eletrodos é retirada, e os eletrodos são totalmente abertos. Esses processos foram descritos com base em estudos anteriores de Branco (2004) e Vargas (2006).

Figura 3 – Ciclo de soldagem



Fonte: Vargas (2006)

2.3 Os eletrodos aplicados no processo de soldagem por pontos

Os eletrodos utilizados na soldagem por pontos desempenham diversas funções cruciais, como a condução de corrente elétrica, a aplicação de força no local onde o ponto de solda será realizado e o auxílio na dissipação do calor na zona soldada (RWMA, 1989; Wainer; Brandi; Mello, 1992).

É fundamental que os eletrodos possuam certas características para desempenhar efetivamente essas funções. Isso inclui boa condutividade térmica e elétrica, alta resistência mecânica e capacidade de manter suas propriedades em temperaturas elevadas (RWMA, 1989).

2.3.1 Material dos eletrodos

Conforme discutido por Wainer, Brandi e Mello (1992), os materiais dos eletrodos para soldagem por resistência por pontos devem possuir alta temperatura de recozimento, resistência à compressão e boa resistência ao atrito.

A RWMA classificou os materiais dos eletrodos em três grupos: ligas à base de cobre, composições de metal refratário ou compósitos e materiais especiais. Esses grupos são

subdivididos em várias classes, abrangendo uma ampla gama de materiais a serem soldados (Fonseca, 1999; RWMA, 1989).

Na indústria automotiva, os eletrodos à base de cobre são amplamente utilizados. Dentre estes, três classes são particularmente proeminentes, como citado por Branco (2004) e RWMA (1989):

- a) **Classe 1:** composta por materiais não tratáveis termicamente e endurecidos por trabalho a frio, apresenta alta condutibilidade térmica e elétrica;
- b) **Classe 2:** composta por materiais com propriedades mecânicas aprimoradas e condutibilidade elétrica e térmica ligeiramente inferiores em comparação com os eletrodos da Classe 1. As propriedades mecânicas e físicas necessárias são alcançadas por tratamento térmico ou por uma combinação de tratamento térmico e trabalho a frio. Esses eletrodos são os mais utilizados e podem se adequar a uma ampla gama de metais e condições de soldagem;
- c) **Classe 20:** composta por materiais capazes de resistir a altas taxas de troca de calor e altas tensões aplicadas, em comparação com os materiais das Classes 1 e 2. São fabricados usando cobre e materiais refratários como a alumina.

A Tabela 1 descreve os materiais:

Tabela 1 – Descrição dos materiais

Classe RWMA	Descrição	Condutividade (I.A.C.S.)	Dureza (HB)		Mecanismo de Endurecimento
RWMA 1 (CLASSE 1)	Cobre – Zircônio CuZr (0,15% Zr)	90%	70		Precipitação
RWMA 2 (CLASSE 1)	Cobre – Cromo CuCr (1% Cr)	85%	83		Precipitação
RWMA 2 (CLASSE 1)	Cobre Cromo Zircônio CuCrZr (1% Cr 0,25% Zr)	85%	83		Precipitação
RWMA 20 (CLASSE 20)	Cobre Resistente por Dispersão CuAl ₂ O ₃ (1,1% Al ₂ O ₃)	85%	75		Dispersão

Fonte: Adaptada de Branco (2004)

A classificação RWMA Classe 1 é especialmente recomendada para soldagem por pontos de ligas de alumínio, ligas de magnésio, latão e bronze, devido à sua alta condutividade térmica e elétrica.

A Classe 2 da RWMA possui condutividade térmica e elétrica ligeiramente inferior à Classe 1 e uma resistência mecânica mais elevada. É recomendada para a soldagem por pontos e por costura na maioria dos materiais metálicos. Além disso, pode ser utilizada na soldagem por projeção de porcas e parafusos de aço.

A RWMA Classe 20 apresenta condutividade térmica e elétrica semelhante à da Classe 2, porém com resistência mecânica superior. Esse material é altamente recomendado para a soldagem de materiais revestidos, por exemplo, chapas de aço galvanizadas.

Os eletrodos de Cu/Cr (1% Cr), Cu/Cr/Zr (1% Cr; 0,25% Zr) e CuZr (0,15% Zr) são compostos por ligas endurecidas por precipitação. Estas adquirem suas propriedades por meio da adição de elementos de liga em solução, seguida por um processo de envelhecimento em condições específicas de tempo e temperatura, resultando na formação de precipitados finos. Segundo Branco (2004), a condutibilidade elétrica desses tipos de eletrodo varia entre 80% e 90% International Annealed Copper Standard (IACS).

2.3.2 Geometria dos eletrodos

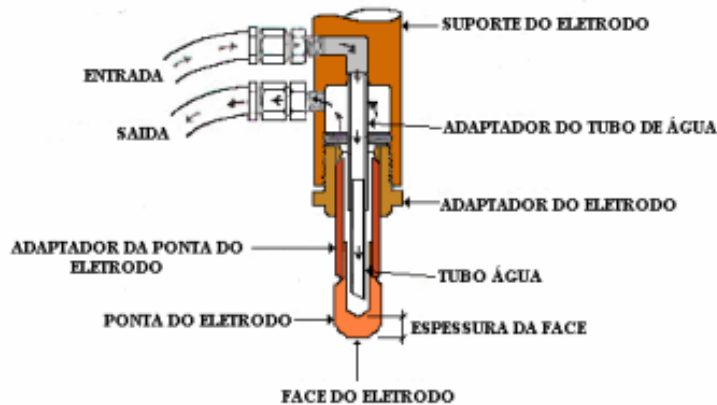
De acordo com Fonseca (1999) e Vargas (2006), um eletrodo para soldagem por pontos apresenta quatro características geométricas fundamentais:

- a) face: é a parte do eletrodo que entra em contato com a peça de trabalho durante a soldagem. É a característica mais crucial do eletrodo, pois determina a densidade de corrente aplicada durante a solda. Também influencia a definição do parâmetro de força aplicada pelo equipamento de soldagem e a tensão aplicada pelos eletrodos. Geralmente o uso de áreas de face de eletrodos grandes não é recomendado;
- b) corpo: deve ser dimensionado adequadamente para suportar a força aplicada durante a soldagem. Além disso, a área da seção transversal deve ser projetada para minimizar a resistência elétrica;
- c) conexão: refere-se ao acoplamento que une o eletrodo ao seu suporte. Geralmente, a fixação ocorre por meio de roscas ou acoplamento cônico. É crucial que a conexão possua uma vedação eficiente para evitar vazamentos no sistema de refrigeração;

- d) cavidade de refrigeração: é a parte oca interna do eletrodo que está conectada ao seu suporte. Sua função é permitir a refrigeração do eletrodo. Deve ser dimensionada de forma que não dificulte a passagem da água de refrigeração.

A Figura 4 evidencia o sistema de suporte e de refrigeração do eletrodo.

Figura 4 – Sistema de suporte e refrigeração de um eletrodo



Fonte: Vargas (2006)

2.3.3 Variáveis do processo

Segundo Ruiz (2005), a qualidade exigida para a soldagem por pontos pode ser afetada por vários fatores, incluindo a composição química e as condições do metal base, o design da junta e das peças, as condições dos eletrodos e os equipamentos de soldagem.

A espessura da chapa desempenha um papel crucial na formação do ponto de solda e na dissipação de calor no processo. Quanto maior a espessura, maior é a quantidade de material a ser fundido na junta, o que demanda um ponto de solda proporcionalmente maior para garantir a qualidade da união. Consequentemente, a influência dos eletrodos na taxa de resfriamento no processo é reduzida. Para espessuras maiores, são necessários valores elevados de corrente elétrica e tempo de soldagem (Fonseca, 1999).

A condição superficial das peças a serem soldadas afeta a geração de calor no processo. A presença de óxidos, sujeira, óleo e outros materiais estranhos afeta a resistência de contato dos eletrodos com a peça e a interface entre as peças. A limpeza adequada destas possibilita a execução de soldas de melhor qualidade e com propriedades mais uniformes. Ademais, a variação na resistência de contato pode resultar em um aquecimento maior nos eletrodos de solda, reduzindo sua vida útil (Fonseca, 1999).

A profundidade mínima (indentação) geralmente é aceita como 20% da espessura da chapa mais fina. Caso seja menor, a solda é considerada “fria” devido ao baixo calor gerado na zona de solda. O valor máximo de profundidade não deve exceder 4/5 da espessura da chapa mais fina (Vargas, 2006).

2.3.4 Qualidade da solda

A qualidade na soldagem por resistência por pontos depende principalmente de sua aplicação específica. Para determinadas indústrias, existem normas específicas para a análise da qualidade dos pontos de solda (Fonseca, 1999; Ruiz, 2005).

De maneira geral, uma solda a ponto de qualidade deve apresentar as seguintes características (Fonseca, 1999):

- a) boa aparência superficial: sem trincas, crateras, excessiva indentação, inclusões ou rebarbas visíveis;
- b) dimensões do ponto de solda dentro das especificações definidas;
- c) resistência: a solda deve apresentar resistência dentro dos parâmetros especificados;
- d) ausência de descontinuidades internas: sem trincas, porosidade, inclusões ou vazios no seu interior;
- e) ausência de expulsão ou separação das chapas unidas pelo ponto de solda.

Esses critérios garantem a integridade estrutural e a funcionalidade da solda, o que é essencial para as aplicações industriais específicas.

2.4 Consumíveis utilizados no processo de soldagem a ponto

Os eletrodos utilizados na soldagem por pontos desempenham múltiplas funções essenciais, incluindo a condução de corrente elétrica, a aplicação de força no local onde o ponto de solda será realizado e a dissipação do calor na zona soldada, segundo Christofletti (2013). Para atender a essas demandas, os eletrodos devem exibir características específicas, como uma condutividade térmica e elétrica eficiente, além de uma resistência mecânica robusta, que lhes permita manter suas propriedades mesmo em elevadas temperaturas, conforme enfatizado por Branco (2019).

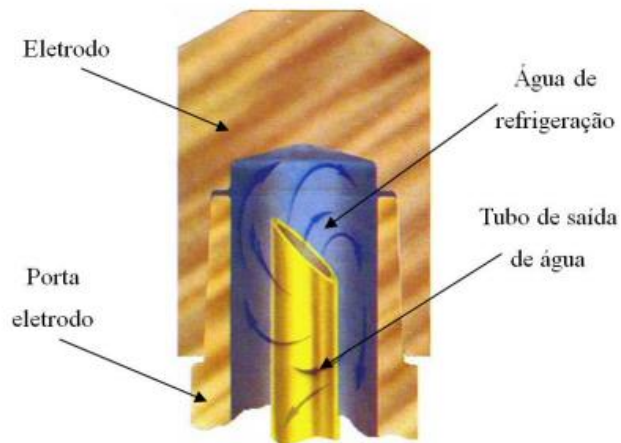
A geometria de um eletrodo de soldagem por pontos é composta por quatro características fundamentais, de acordo com Christofletti (2013). A face do eletrodo é a parte que entra em contato direto com a peça de trabalho durante a soldagem, sendo um de seus

aspectos mais cruciais, pois determina a densidade da corrente aplicada durante o processo e influencia a definição dos parâmetros de força aplicados pelo equipamento de solda e a tensão aplicada pelos eletrodos.

Além da face, o corpo do eletrodo deve ser adequadamente dimensionado para suportar a força exercida durante a soldagem, com uma seção transversal dimensionada de forma que não crie resistência elétrica durante a operação. A conexão é o ponto de acoplamento entre o eletrodo e seu suporte, geralmente realizado por meio de roscas ou de um acoplamento cônico, devendo possuir uma vedação eficiente para evitar vazamentos no sistema de refrigeração do eletrodo.

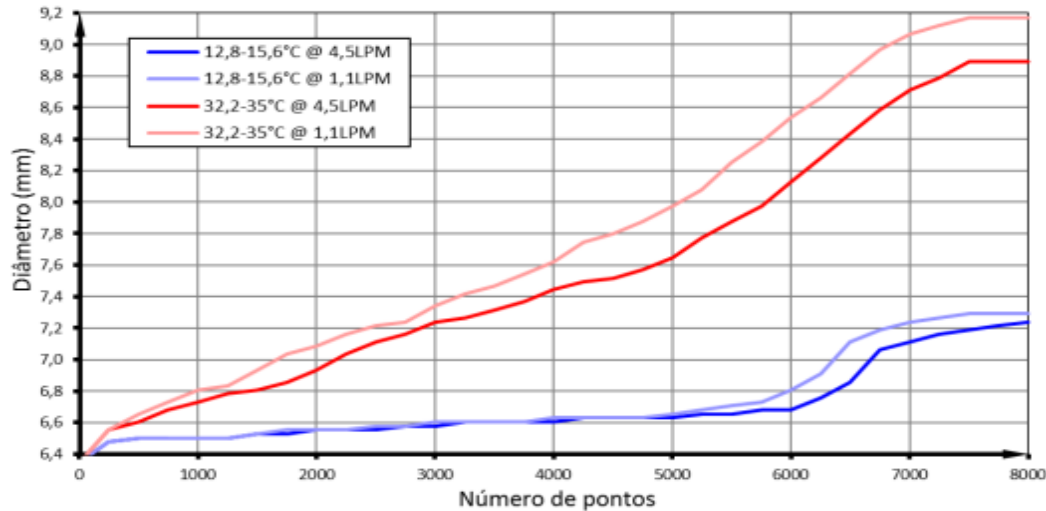
A presença de uma cavidade para refrigeração é essencial no eletrodo de soldagem por pontos, permitindo a passagem de água de refrigeração para dissipar o calor gerado no procedimento. Essa cavidade, localizada internamente no eletrodo e conectada ao suporte, deve ser cuidadosamente dimensionada para garantir uma refrigeração eficiente dele, sem prejudicar a passagem fluida da água de refrigeração (Figura 5). Porém, nem todo fabricante de eletrodo possui essa cavidade, chamada de *dip*.

Figura 5 – Sistema de suporte e refrigeração de um eletrodo



Fonte: Furlanetto (2014, p. 83)

Figura 6 – Diâmetro da face do eletrodo em função da vazão e da temperatura



Fonte: Furlanetto (2014, p. 85)

A Figura 6 demonstra o comportamento do crescimento da face do eletrodo em função da vazão de água e da temperatura. Observa-se que a temperatura possui uma influência significativa na taxa de crescimento da face do eletrodo. Para este trabalho e para fins de comparação com os resultados, a vazão de água e a temperatura foram mantidas constantes.

2.5 Mecanismo de degradação do eletrodo

Durante o procedimento de soldagem a ponto, eletrodos podem ser usados na soldagem de aços revestidos. Estes são largamente utilizados na indústria automobilística, pois funcionam como barreiras para a proteção contra corrosão. O zinco adere à superfície do eletrodo desde a primeira solda e no processo pode-se observar a presença do latão, que seria a reação entre o zinco e o cobre, gerando a coloração amarelada na superfície dos pontos de solda na peça. Essa coloração também pode ser gerada pelo desprendimento do cobre da face do eletrodo. A retração dos eletrodos após a soldagem causa a remoção do cobre e das ligas de cobre do eletrodo, como se vê pelo cobre deixado na chapa de aço ou pelo latão formado na superfície do ponto (Figura 7).

Figura 7 – Cobre deixado na chapa de aço



Fonte: Autor (2023)

Essa perda líquida de massa da face de contato do eletrodo causa a redução do comprimento, que, por sua vez, gera o crescimento geométrico da face de contato e ocasiona a perda de contato por densidade de área, o que provoca uma perda significativa da qualidade da solda (Figura 8). Em muitos processos, são implementados passos de aumento de corrente proporcionais ao aumento da área de contato do eletrodo.

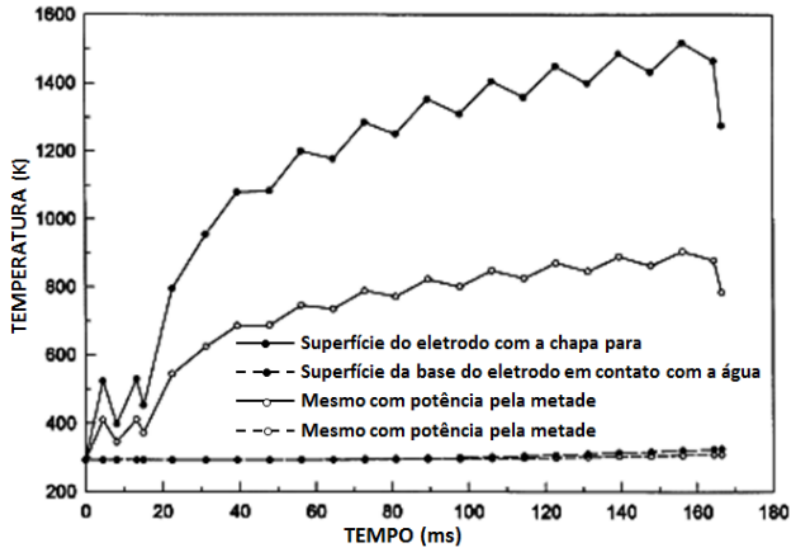
Figura 8 – Face do eletrodo em processo de degradação



Fonte: Autor (2023)

Durante a soldagem, os eletrodos estão exercendo uma pressão nas chapas através da face de contato e estão sob forte aquecimento. Apesar de o sistema de refrigeração tirar parte do calor, as temperaturas alcançadas são suficientes para reduzir a dureza na região de contato. Aliada à pressão, a face do eletrodo é deformada, fazendo com que ela aumente ao longo da produção (Branco, 2004). A Figura 9 exemplifica a temperatura do eletrodo durante a soldagem.

Figura 9 – Temperatura do eletrodo durante a soldagem



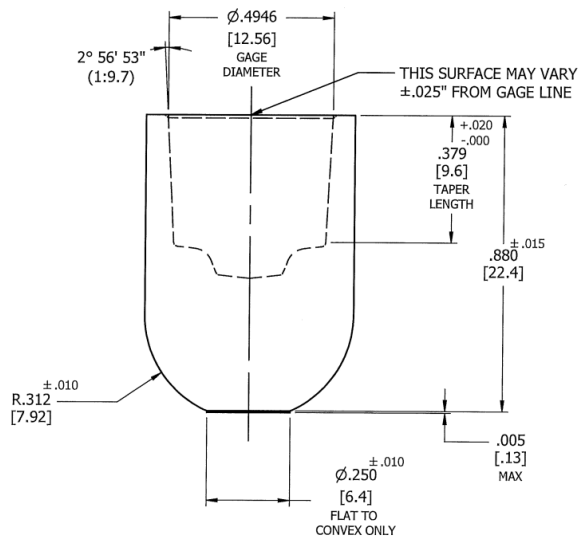
Fonte: Furlanetto (2014, p. 84)

2.6 Processo de fresagem de eletrodos

O mecanismo de desgaste do eletrodo e o aumento da face de contato durante a produção dos pontos de solda requerem a troca do eletrodo ou a usinagem de sua face de contato para retornar à geometria original.

Na Figura 10 está a geometria do eletrodo utilizado. Sua face possui um diâmetro inicial de 6.4 mm.

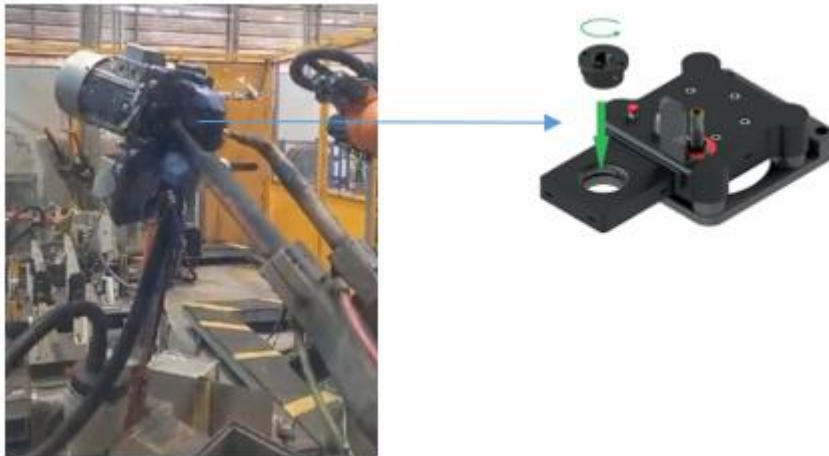
Figura 10 – Geometria do eletrodo utilizado



Fonte: Autor (2023)

A prática de fresagem é utilizada tanto para soldagens manuais quanto para as automáticas. As fresas e lâminas são definidas de acordo com tipo de eletrodo a ser usado e o perfil da face que se deseja usinar. Normalmente a lâmina de corte é estabelecida para retornar à condição inicial. Os equipamentos desse procedimento encontram-se representados na Figura 11.

Figura 11 – Equipamentos de fresagem



Fonte: Autor (2023)

Durante o processo de fresagem, podem ocorrer alguns erros, como entupimento, quebra da lâmina, desalinhamento da pinça, falha no motor de fresagem, o que pode gerar efeitos negativos na área de contato do eletrodo (Figura 12).

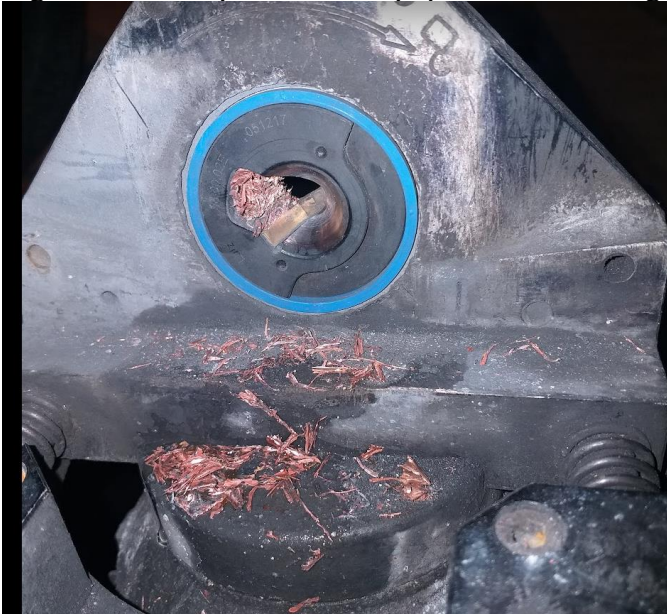
Figura 12 – Efeitos da falha de fresagem



Fonte: Autor (2023)

Durante a fresagens, defeitos, como entupimento, são ocasionados por excesso de força, tempo de fresagem ou erro de funcionamento do sistema de sopro. Este tem a função de remover o excesso de material proveniente desse procedimento. A Figura 13 apresenta um sistema com entupimento.

Figura 13 – Entupimento no equipamento de fresagem



Fonte: Autor (2023)

2.7 Compensação de desgaste do eletrodo

Durante o processo de produção, o aumento da área de contato dos eletrodos é inevitável. Com isso, a densidade da corrente é reduzida (A/mm^2), diminuindo a quantidade de calor produzida. De acordo com Furlanetto (2014), podemos considerar o ponto de solda de um corpo adiabático pela lei de Fourier do fluxo de calor dada pela equação 3:

$$\phi_{ponto} = K_{chapas} \frac{S_{el} \Delta T_{ponto}}{e_{chs}} \quad (3)$$

ϕ_{ponto} – fluxo de calor;

K_{chapas} – coeficiente de condutividade térmica do metal no ponto de solda;

S_{el} – seção transversal definida pela área de contato dos eletrodos;

ΔT_{ponto} – diferença de temperatura entre o centro do ponto de solda e a superfície das chapas;

e_{chs} – soma das espessuras das chapas.

Avaliando a equação, se a área de contato aumenta para a mesma quantidade de calor, a diferença de temperatura diminui ΔT_{ponto} . Nesse caso, para compensar a perda de temperatura, os comandos de solda possuem uma tecnologia para aumentar a corrente de soldagem de forma gradual (*Stepper*).

O aumento da área de contato, a resistência na face do eletrodo causada pela difusão e a diminuição da diferença da temperatura do ponto são variáveis que precisam ser monitoradas e controladas para que possa ser definida uma curva *Stepper* adequada. A Figura 14 representa uma curva programada para compensar o crescimento da face de um eletrodo revestido.

Figura 14 – Curva *Stepper* – Comando WTC



Fonte: Autor (2023)

2.8 Eletrodos revestidos de titânio

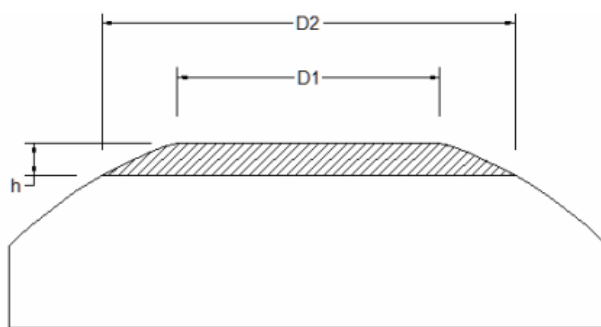
A interação do zinco do revestimento de aço com o cobre do eletrodo foi identificada como um fator fundamental para a degradação dos eletrodos. A formação de camadas de liga requer a presença de zinco para se difundir no cobre. Se o zinco não entrasse em contato com o material de base do eletrodo, a interação poderia ser impedida. Isso pode ser obtido com o uso de um revestimento de eletrodo para servir como barreira de difusão (Chan, 2005).

O projeto do processo e do material de revestimento pode permitir que o eletrodo seja uma solução econômica para estender a vida útil da ponta e melhorar seu desempenho. O desafio era encontrar um material de revestimento que não se ligasse ao zinco e permanecesse

intacto para proteger o eletrodo sem afetar negativamente sua soldabilidade. Os eletrodos com superfície de titânio da Huys Industries utilizados neste estudo foram capazes de reduzir a aderência, a ligação local e a transferência de materiais, o que geralmente acontece com os eletrodos não revestidos. Os de Cu-Cr-Zr e CuAl_2O_3 foram revestidos com o titânio usando um processo patenteado de deposição (Chan, 2005).

A Figura 15 mostra uma representação da face do eletrodo revestido com titânio.

Figura 15 – Representação da face do eletrodo revestido com titânio



Fonte: Chan (2005, p. 20)

Devido à alta dureza da face dos eletrodos, eles não podem ser retrabalhados pelo processo de dressagem convencional, pois as lâminas de corte utilizadas não são projetadas para remover o titânio inserido na ponta do eletrodo ou retornar à sua geometria original. A Figura 16 mostra modelos de eletrodo com face de titânio da Huys.

Figura 16 – Modelos de eletrodo com face de titânio – Huys



Fonte: Acervo da Huys

2.8.1 Parâmetros de soldagem à resistência por pontos

As variáveis que determinam a eficiência do processo de soldagem a ponto e influenciam diretamente as propriedades do ponto de solda são denominadas parâmetros, destacando-se três principais conforme salientado por Christofolletti (2013): a corrente de soldagem, a força aplicada nos eletrodos e o tempo de soldagem.

A corrente de soldagem desempenha um papel crucial no processo, sendo o parâmetro mais impactante na geração de calor e, conseqüentemente, no desempenho da solda. A escolha da corrente adequada é essencial para garantir a qualidade desejada da junta soldada. Atualmente ela continua a ser mais utilizada por ser facilmente controlada pelo sistema eletrônico de potência e por microprocessadores dos comandos de solda.

Outro parâmetro fundamental é a força aplicada nos eletrodos, a qual é responsável por unir as chapas a serem soldadas, garantir o posicionamento adequado, assegurar a conexão eficiente e exercer um papel importante sobre a resistência de contato chapa-chapa. A tensão mecânica originada por essa força atua não somente durante a aplicação da corrente de soldagem mas também antes e depois desse processo. A força utilizada para esse trabalho é proveniente de um motor controlado pelo sétimo eixo de um braço robótico, que pode ser controlado e configurado por um pacote de aplicação dos robôs Kuka, conhecido como servo gun TC 4.1.

O tempo, por sua vez, corresponde ao intervalo em que a corrente de soldagem é aplicada durante o ciclo de solda. O controle preciso desse tempo é fundamental para assegurar a formação adequada do ponto de solda, bem como a manutenção das propriedades desejadas na junta soldada. O tempo é ajustado de acordo com as especificidades das chapas a serem soldadas, considerando fatores como espessura e composição do material, e está intimamente relacionado à corrente de soldagem.

3 METODOLOGIA

A pesquisa realizada neste estudo é de natureza comparativa, buscando compreender as relações de custo-benefício entre a utilização de eletrodos não revestidos e de eletrodos revestidos para realização de solda a ponto observando a taxa de desgaste da face do eletrodo. A abordagem comparativa é fundamental, proporcionando uma compreensão abrangente dos fatores que influenciam a qualidade e a integridade de solda, além de observar também os custos envolvidos no processo.

O estudo de caso foi conduzido em um ambiente industrial em uma célula robotizada equipada com um robô industrial KUKA modelo #KR210R2700 PRIME C4 FLR, este com uma ferramenta de solda a ponto Obara acoplada ao punho do robô, tendo um sistema completo de comando de solda da WTC 6000 e um equipamento de dressagem industrial para realizar o teste de soldagem. A seleção desse ambiente propiciou um controle preciso das variáveis do processo, garantindo a consistência dos resultados obtidos e a validade das conclusões tiradas. As condições controladas permitiram uma investigação minuciosa das interações entre os parâmetros de soldagem e os tipos de eletrodos utilizados, possibilitando uma compreensão abrangente dos fenômenos envolvidos no processo de soldagem por pontos.

A coleta de dados foi realizada por meio de observações diretas durante o processo de soldagem, bem como por meio de testes subsequentes, por exemplo, análises de ultrassom, medições do diâmetro dos pontos de solda e avaliação de resistência das soldas através dos testes de arrancamento.

Para análise do custo-benefício da produção, foram levados em consideração o tempo de ciclo da célula, o número de pontos do produto a ser soldado e a curva *Stepper* para cada eletrodo estudado.

Além disso, foram realizadas consultas a fontes especializadas, como literatura técnica e requisitos dos clientes, a fim de embasar teoricamente o estudo e situar os resultados no contexto mais amplo da soldagem por pontos e suas aplicações industriais. A combinação de abordagens práticas e teóricas proporcionou uma base sólida para a análise dos resultados e a formulação de conclusões fundamentadas sobre a influência dos parâmetros de soldagem nas propriedades mecânicas da junta soldada.

4 ESTUDO DE CASO

4.1 Escolha do material

As chapas de aço usadas foram galvanizadas por imersão a quente, com aço de baixa liga e alta resistência, conforme especificado. Trata-se de um material largamente utilizado na indústria automobilística. Os aços de baixa liga oferecem uma maneira simples de aumentar a resistência dos componentes automotivos e, assim, reduzir seu peso.

A soldabilidade é boa devido à composição com elementos de liga de baixo teor, e a capacidade de dobra é excelente. Para esse processo, foram consideradas no projeto duas chapas de espessuras de 2.0 mm e 0.7 mm (Tabela 2). A fim de analisar os requisitos, foram levadas em conta a norma ANSI/AWS/SAE/D8.9-97 e a de montadoras automobilísticas.

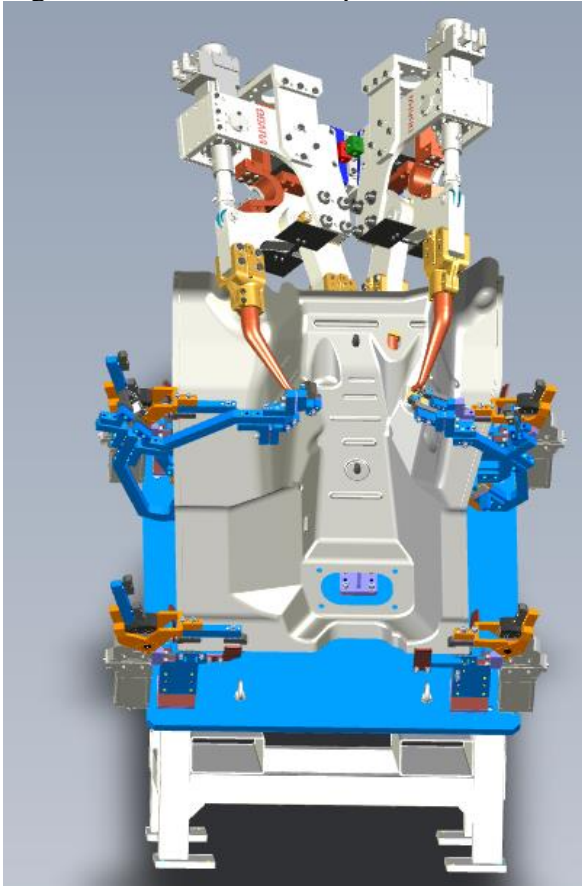
Tabela 2 – Tipo de material da chapa e HLSA

Tipo de material	HLSA
Espessura (mm)	2.0 e 0.7
Resistência à tração MPa	245

Fonte: Autor (2023)

Para garantir que os componentes fossem soldados sempre na mesma posição, foi desenvolvido um dispositivo automático que teria a função de fixá-los, de acordo com a Figura 17. O projeto é constituído por duas partes: uma mecânica e outra eletrônica. Garantir a posição da junta é fundamental para assegurar que o robô irá aplicar os pontos de solda sempre no mesmo local.

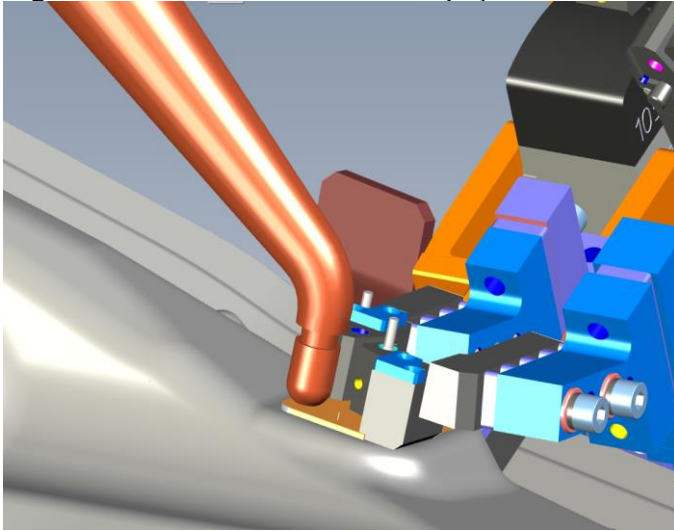
Figura 17 – Modelo de dispositivo de solda



Fonte: Autor (2023)

O dispositivo de solda foi projetado avaliando as interferências mecânicas que poderiam ocorrer entre sensores, grampos e cilindros. Assegurar a perpendicularidade da face do eletrodo é importante nesse processo para evitar o escorregamento da pinça, o que pode provocar variação na resistência dinâmica, alterando, portanto, a formação do ponto e de projeções da solda, condição que afeta a qualidade e a segurança do procedimento (Figura 18).

Figura 18 – Processo de solda das peças

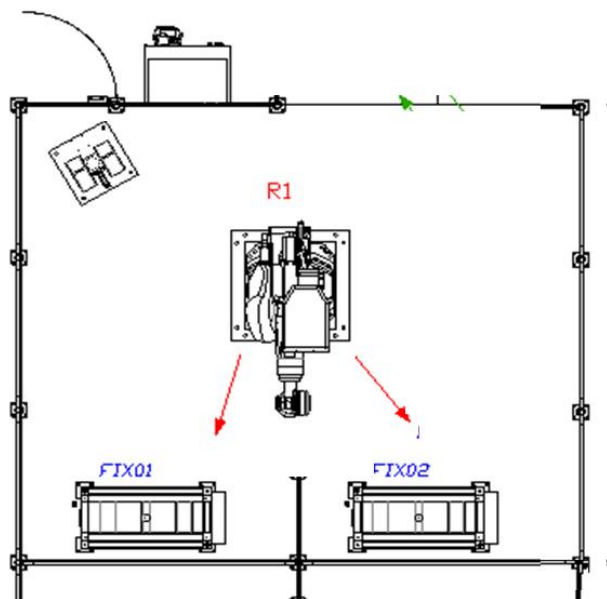


Fonte: Autor (2023)

4.2 Análise do processo de solda

A célula de solda é composta por dois dispositivos denominados fix 01 e fix 02 (Figura 19). Em cada um deles, o robô aplica oito pontos de solda. Para o experimento, foram comparados dois tipos de eletrodos, sendo eles os revestidos e os não revestidos.

Figura 19 – Célula de solda ponto a ponto – Projeto Túnel

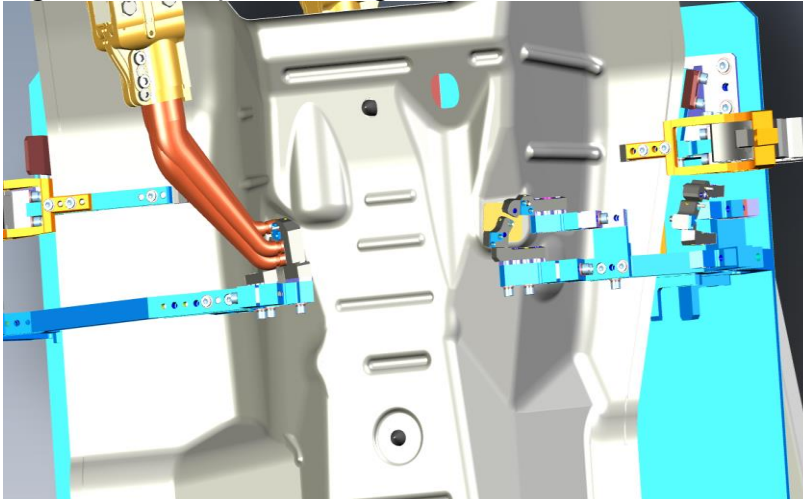


Fonte: Autor (2023)

Considerando o processo de solda a ponto, o controle da temperatura e da vazão é fundamental e, conseqüentemente, pode afetar os resultados das análises. Sendo assim, foram

tomadas precauções para evitar quaisquer influências térmicas indesejadas nos eletrodos. Nesse caso a vazão de água internamente nos eletrodos e no transformador foi estabelecida com sensores, sendo os valores de vazão definidos em 8 l/min e temperatura menor que 25 graus Celsius. Para avaliação dos dois eletrodos, a vazão e a temperatura foram mantidas iguais (Figura 20).

Figura 20 – Posição de soldagem



Fonte: Autor (2023)

4.3 Análise de caso

4.3.1 Análise do eletrodo revestido

Os eletrodos revestidos usados neste estudo eram idênticos aos não revestidos, exceto o revestimento de titânio aplicado à superfície abaulada, pertencente ao fornecedor Huys. O material de revestimento na forma de uma haste sinterizada é aplicado à superfície do eletrodo usando um sistema de arco de deposição de faíscas elétricas. Esse processo causa o derretimento e a fusão local da haste de revestimento e do material de base. A natureza intermitente do procedimento, entretanto, faz com que o revestimento seja depositado em gotículas discretas que são acumuladas para formar sua espessura. A camada revestida contém as partículas de TiC em suspensão.

A composição do revestimento do eletrodo é apresentada na Tabela 3:

Tabela 3 – Revestimento

Camada revestida	Ti	Ni	Mo	W	Cu
	59.3	22.4	13.13	1.02	4.14

Fonte: Autor (2023)

A Figura 21 mostra o eletrodo revestido, e a área escurecida circundante de sua face refere-se ao revestimento de titânio. A dureza medida na camada revestida do eletrodo foi de 190 HB.

Figura 21 – Foto de eletrodo revestido



Fonte: Autor (2023)

4.3.2 Análise do eletrodo não revestido

Os eletrodos não revestidos usados neste estudo eram idênticos aos revestidos em relação às suas dimensões mecânicas. O eletrodo utilizado (Figura 22) foi fornecido pela empresa Obara, seguindo a RWMA 2 (Classe 2) com composição CuCrZr (1% Cr; 0,25% Zr). A dureza medida em sua face de contato foi de 81 HB. Foi usado esse eletrodo por possuir boas propriedades mecânicas e condutividade elétrica.

Figura 22 – Eletrodo não revestido – Classe 2



Fonte: Autor (2023)

4.3.3 Soldabilidade

O estudo de teve como um dos objetivos determinar se há diferenças na formação de respingos, na taxa de crescimento da face de solda durante o processo produtivo e no custo do procedimento. Os requisitos de qualidade e segurança também foram levados em consideração. Os procedimentos usados para estabelecer os parâmetros de soldagem para esses testes estão detalhados nas próximas subseções deste trabalho, e os parâmetros avaliados e observados foram tempo e corrente de soldagem e curva *Stepper*. Foram realizados dois conjuntos de testes para cada tipo de eletrodo tanto para a corrente quanto para o tempo de soldagem. Todos eles foram feitos com chapas de aço de 0.7 e 2.0 mm, utilizando o dispositivo de solda para fixar a junta a ser soldada.

A corrente de solda variou a cada tipo de eletrodo, mantendo todos os outros parâmetros constantes, e a expulsão da solda foi registrada. A evolução do *nugget* de solda foi então estudada apenas em relação ao crescimento da face do eletrodo.

4.4 Soldagem

O processo para determinar a corrente de soldagem envolve o aumento lento da corrente de solda, mantendo todos os outros parâmetros constantes até que o tamanho mínimo seja atingido. Nesse ponto, a corrente é considerada I_{min} .

Em seguida, continua-se a aumentar a corrente até que ocorra expulsão ou aderência grave do eletrodo, então o I_{max} foi determinado. Na Tabela 4, temos os parâmetros iniciais que foram definidos para esse processo.

Tabela 4 – Parâmetros iniciais – soldabilidade

Program #		1				
Instruction	Description	(CY)	(kA)	Heat	Cool	Imp.
1	Squeeze	5	-	-	-	-
45	Slope	-	-	-	-	-
2	Cool	-	-	-	-	-
60	Impulse	-	-	-	-	-
30	Weld 1	22	9.5	-	-	-
3	Hold 1	5	-	-	-	-
Approaching force (kgf)		-				
Squeezing force(kN)		3.3				

Fonte: Autor (2023)

Para o processo abaixo, a fim de avaliar a soldabilidade, foi encontrado o resultado para os dois eletrodos (Tabela 5). Esses valores foram utilizados para ajudar a definir os parâmetros de solda iniciais com o objetivo de analisar a vida útil dos eletrodos.

Tabela 5 – Resultados – soldabilidade

Tabela de Soldabilidade		
Variáveis	Eletrodo	Eletrodo
	Revestido	Não Revestido
Imin. (kA)	8	8.5
Imáx (kA)	9.8	10.5
Tem. Máx (Cy)	25	28
Tem. Mím (Cy)	17	18

Fonte: Autor (2023)

5 RESULTADOS

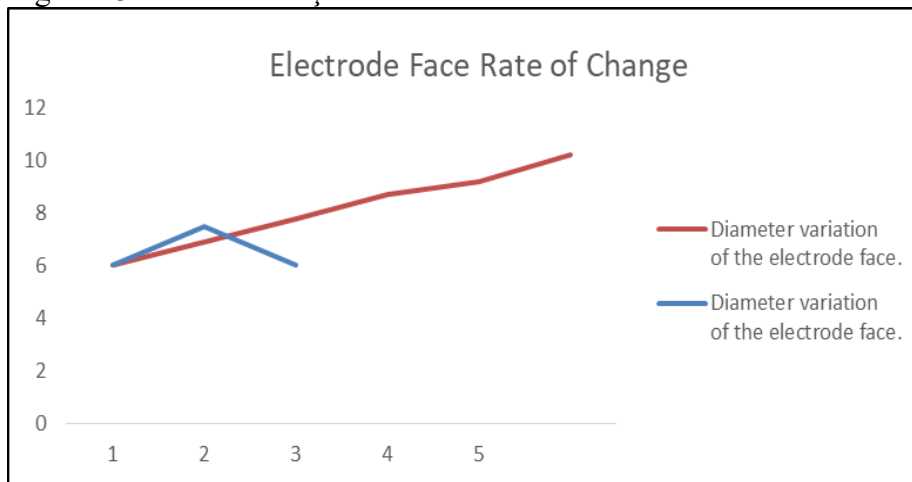
Durante a análise, os resultados puderam ser discutidos avaliando a capacidade produtiva da célula, a taxa de crescimento da face do eletrodo, os custos de soldagem, a produtividade e a qualidade.

5.1 Análise do eletrodo não revestido na face de contato

Para este estudo, foi utilizado um eletrodo de CuCrZr sem revestimento em sua face e com alto grau de crescimento geométrico devido à redução do comprimento. Os eletrodos foram formados a frio para a geometria final da soldagem. Sua face de contato foi usinada $6,0 \pm 0,5$ mm para se adequar à espessura do aço, conforme as práticas recomendadas e os requisitos do cliente para se obter um botão de solda de $>5 \pm 0,5$ mm.

Na Figura 23, encontra-se a taxa de crescimento por passos para os eletrodos, referente à curva *Stepper* para os dois tipos estudados.

Figura 23 – Taxa de viação da face do eletrodo



Fonte: Autor (2023)

- Crescimento da face do eletrodo – titânio
- Crescimento da face do eletrodo sem revestimento

Para os eletrodos não revestidos, foram evidenciados (passo 2):

- a) eletrodo com 145 pontos de solda;
- b) face do eletrodo em 7.5 mm;

- c) necessidade de realizar o processo de fresagem, pois foi constatada redução do diâmetro do ponto de solda com ultrassom em 5.2 mm, próximo do especificado em 5 mm.

Tabela 6 – Resultados – densidade de corrente para eletrodo não revestido

R1				Initial Parameter			
	Process			Corrent (A)	Diameter variation of the electrode face	Desnsity Current area	Spot diameter Nugget>5mm
Fixture	Passos	Corrente (A)	Points	9000	6,00	318	5,6
Solda Fixture	1	300	145	9300	7,50	211	5,2
	2	300	20	9600	6,00		

Fonte: Autor (2023)

A Tabela 6 mostra a redução da densidade de corrente em função do crescimento da face do eletrodo e a redução do diâmetro do ponto de solda. Sendo a diminuição do diâmetro significativa, há necessidade de realizar o processo de fresagem, que, em modo automático, leva cerca de 20 segundos. Cada fresagem com força de 0.7 kN por 1.2 s remove cerca de 0.127 mm do comprimento do eletrodo.

Esse procedimento se repete por 45 vezes durante a vida útil do eletrodo, dessa maneira, no final da vida do eletrodo, ele teve seu comprimento reduzido a 16.24 mm e precisa ser trocado. A quantidade de pontos executados por toda a vida dele neste estudo foi de 6.525 pontos por par de eletrodo. Para este trabalho, foram utilizadas lâminas novas e sem desgaste mecânico.

Referente ao custo por ponto, a Tabela 7 evidencia o custo dos eletrodos.

Tabela 7 – Resultados – custo de eletrodo por robô por ano

R1	
Total de Pontos – por peça	8
Total de pontos para fresar	145
Total de fresagens para trocar	45
Custo por eletrodo	R\$ 4,25
Custo por robô com eletrodo	R\$ 8,50
Total de pontos	6525
Custo por ponto	R\$ 0,001
Custo de peça por solda	R\$ 0,01
Total de peças por hora	109
Total de peças – turno	773,9
Total de peças – dia	2322
Custo dia com pontos de solda – eletrodo	R\$ 24,20
Total de peças – custo – ano	R\$ 6.048,87
Total de eletrodo – dia	6

Fonte: Autor (2023)

Em relação ao tempo de fresagem, é possível verificar que cerca de 6% da eficiência da produção é perdida por esse processo (Tabela 8). No entanto, essa perda pode ser compensada inserindo um traçador de eletrodo automático no processo.

Tabela 8 – Resultado – efeitos da fresagem

Análise de Processo de Produção	
Quant. peça fres.	18
Tempo de Fresa	20
Total de peça Sth.	776
Total de peça perd.	43
Porcentagem de perda	6%

Fonte: Autor (2023)

5.2 Análise do eletrodo revestido

Para este estudo, foi utilizado um eletrodo com a face revestida em titânio, que possui uma maior resistência mecânica na face de contato. Esta possui um diâmetro inicial $6,0 \pm 0,5$ mm a fim de que se possa compará-la de forma semelhante à do eletrodo não revestido.

Observando acima a taxa de crescimento por passos para o eletrodo revestido, percebe-se que a face cresce menos considerando o número de pontos (Tabela 9). O revestimento de titânio foi capaz de reduzir a taxa de crescimento da ponta do eletrodo em função do número

de pontos de solda. Porém, nesse caso houve uma taxa de aumento de corrente elevada em relação aos eletrodos convencionais sem revestimento.

Tabela 9 – Resultados – densidade de corrente para eletrodo revestido

	R1			Initial Parameter			
				Corrent (A)	Diameter variation of the electrode face	Desnsity Current area	Quality Criteria
Fixture	Passos	Corrente (A)	Points	9500	6	336	Nugget>5mm
Fix 01	1	950	600	10450	6,90	280	5,6
Fix 02	2	1200	500	11650	7,80	244	5,2
Total Time	3	1200	400	12850	8,70	216	5
Dimension New	4	1200	300	14050	9,20	211	4,9
Dimensal used	5	1500	200	15550	10,20	190	4,8

Fonte: Autor (2023)

Para os eletrodos revestidos, foram evidenciados (passo 2):

- a) eletrodo com 1.110 pontos de solda;
- b) face do eletrodo em 7.8 mm.

Como esse eletrodo não sofre o processo de fresagem, observa-se uma melhor eficiência na produtividade da célula. Porém, com o aumento considerável de corrente, foi possível notar o alto índice de respingos de solda durante os testes de produção.

A quantidade de pontos executados por toda vida útil do eletrodo neste estudo foi de 2.000 pontos por par de eletrodo.

Tabela 10 – Resultados – custo do eletrodo por robô por ano

R1	
Total de pontos – por peça	8
Custo por eletrodo	R\$ 4,45
Custo por robô com eletrodo	R\$ 8,90
Total de pontos	2000
Custo por ponto	R\$ 0,004
Custo de peça por solda	R\$ 0,04
Total de peças por hora	109
Total de peças – turno	773,9
Total de peças – dia	2322
Custo por dia com pontos de solda – eletrodo	R\$ 82,65
Total de peças – custo – ano	R\$ 20.663,13
Total de eletrodo – dia	19

Fonte: Autor (2023)

Utilizando o eletrodo de titânio, é possível verificar um aumento de 142% no custo do eletrodo por dia, sendo um número consideravelmente alto. Houve um aumento de três vezes na frequência da troca dos eletrodos, pois não foi possível realizar uma ampliação significativa na quantidade de pontos de solda para vida em função da alta corrente aplicada na curva *Stepper*.

Para um cotejo mais visual, segue uma comparação dos critérios definidos para validação dos eletrodos de acordo com os objetivos específicos (Figura 24).

Figura 24 – Resultados – comparação entre os eletrodos

Critério	Eletrodo Revestido	Eletrodo Nao revestido
Controle de Respingos	++++	++
Qualidade visual dos pontos	++++	++
Soldabilidade	++++	+++
Custo por ponto de soda	+++	++
Manutentabilidade Processos	++	++++
Sustentabilidade	+++	++
	3.3	2.5
Escala + = regular, ++ = Bom, +++ =Otimo, ++++ = Excelente		

Fonte: Autor (2023)

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos resultados obtidos e nas análises, foram estabelecidas as seguintes conclusões:

- a) há um aumento da face do eletrodo com a ampliação do número dos pontos de solda;
- b) o diâmetro do ponto de solda aumenta com a diminuição da temperatura;
- c) o eletrodo revestido é mais eficiente em relação à vida útil;
- d) eletrodos não revestidos trabalham com valores de correntes menores na curva *Stepper*;
- e) a taxa de crescimento da face do eletrodo varia com os parâmetros de solda;
- f) a taxa de remoção de material durante o processo de fresagem depende da força aplicada, do tempo, da condição da lâmina e do mecanismo de fresagem;
- g) eletrodos de titânio podem ser uma opção quando o processo não permitir equipamentos de fresagem;
- h) eletrodos de titânio podem possuir valores mais elevados para o processo em função da baixa quantidade de pontos para vida útil;
- i) eletrodos de titânio trabalham com correntes mais elevadas durante a vida útil na curva *Stepper*;
- j) os eletrodos sem revestimentos oferecem uma melhor qualidade de solda com menos incidência de respingos.

Para os trabalhos futuros seria importante avaliar a resistência de contato dos eletrodos para o processo após a fresagem; desenvolver sensores de monitoramento para analisar a face do eletrodo após a fresagem com medição de seu diâmetro; avaliar o comportamento metalúrgico das condições dos eletrodos de titânio durante a fase de crescimento da área de contato; e verificar a utilização de eletrodo de titânio para solda a projeção.

REFERÊNCIAS

BRANCO, Hideraldo Luiz Osorio. **Avaliação de capas de eletrodos utilizadas na soldagem por resistência de chapas galvanizadas automotivas**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/33534>. Acesso em: 5 dez. 2023.

BRANCO, Hideraldo Luiz Osorio. **Soldagem por resistência: máquinas, processos e aplicações**. [S. l.]: MEPE, 2019.

CHAN, Kevin Randall. **Weldability and degradation study of coated electrodes for resistance spot welding**. 2005. Thesis (Master of Applied Science in Mechanical Engineering) – University of Waterloo, Waterloo, 2005. Disponível em: <https://tecwelding.com/images/tb/Weldability%20of%20Coated%20Electrodes.pdf>. Acesso em: 7 dez. 2023.

CHRISTOFOLETTI, Guilherme Mendes. **Soldagem por pontos: avaliação dos parâmetros de soldagem e das propriedades mecânicas da junta soldada**. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Materiais) – Departamento de Engenharia de Materiais, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

FONSECA, Eduardo Otávio da. **Monitoração da resistência dinâmica na soldagem a ponto por resistência elétrica e avaliação da sua relação com a resistência mecânica do ponto de solda**. 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1999.

FURLANETTO, Valdir. **Desenvolvimento e instrumentação de um cabeçote de solda a ponto por resistência elétrica para aplicação em condições industriais**. 2014. Tese (Doutorado em Ciências Mecânicas) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

MARQUES, Paulo Villani; MODENESI, Paulo José; BRACARENSE, Alexandre Queiroz. **Soldagem: fundamentos e tecnologia**. 3. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2009.

NASCIMENTO, Vinícius Castanheira do. **Seleção de parâmetros de soldagem a ponto por resistência, baseado na medição da resistência elétrica entre chapas**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2008. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/14831>. Acesso em: 5 dez. 2023.

RUIZ, Douglas Criado. **Contribuição ao desenvolvimento de processos de montagem e soldagem de carrocerias automotivas**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Automotiva) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

RWMA. **Resistance Welding Manual**. 4. ed. [S. l.]: RWMA, 1989.

SOARES, Ezequiel Franco *et al.* Influência da corrente elétrica no processo de soldagem a resistência por pontos aplicados na montagem de carrocerias em uma indústria automotiva. **Repositório Universitário da Ânima**, [s. l.], [2021].

TURETTA, Ivonei. **Análise do desgaste de eletrodos de solda por resistência a ponto em função do número de pontos soldados em chapas galvanizadas**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

VARGAS, José Enrique. **Estudo da formação, geometria e resistência do ponto na soldagem por resistências**: uma abordagem estatística. 2006. Dissertação (Mestrado em Sistemas Mecatrônicos) – Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2006.

WAINER, Emílio; BRANDI, Sérgio Duarte; MELLO, Fábio Décourt Homem de (coord.). **Soldagem**: processos e metalurgia. São Paulo: Blucher, 1992.