


Avaliação da influência da oxidação do cobre no processo de soldagem por ultrassom em componentes da indústria automotiva

Evaluation of the influence of oxidation of copper in the soldering process ultrasound in automotive industry components

Luiz Pereira da Costa Neto¹ , Moisés Euclides da Silva Junior¹, Gabriel Lucas Cordeiro de Lima Silva², Cleiton de Souza Wanderley³, Diego Borges Santos², Oscar Olimpio de Araujo Filho¹

¹Universidade Federal de Pernambuco. Av. Prof. Moraes Rego, 1235, Cidade Universitária, 50670-901, Recife, PE, Brasil.

²Instituto Federal de Pernambuco. Av. Prof. Luiz Freire, 500, Cidade Universitária, 50740-545, Recife, PE, Brasil.

³Universidade dos Guararapes. Rua Comendador José Didier, 27, Piedade, 54400-160, Jaboatão dos Guararapes, PE, Brasil.
e-mail: luizpereiradacosta@gmail.com, juniormoisés7@hotmail.com, gabriellucas696@gmail.com, wanderleycleiton@gmail.com, bs.diego@hotmail.com, oscar.oaraujo@ufpe.br

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo entender a influência da oxidação nos fios de cobre e seus impactos em materiais soldados através do processo ultrassônico em componentes automotivos. 42 (quarenta e duas) amostras de cobre foram extraídas e subdivididas em 7 (sete) grupos com 6 (seis) amostras cada um para o experimento, onde o primeiro grupo contou com amostras sem oxidação e o último grupo conta com amostras que foram envelhecidas em 360 dias. Estas amostras foram soldadas através do processo ultrassom com parâmetros que garantiram os requisitos mínimos de soldabilidade, critérios visuais e a união completa dos filamentos de cobre na junta. Após isso, os materiais soldados foram submetidos a validação da soldagem através da medição da força de tração de cisalhamento para garantir os requisitos mínimos exigidos por norma interna do setor automotivo. As amostras sem oxidação atenderam aos parâmetros de engenharia e resultaram nos maiores valores de força de tração de cisalhamento. Nas amostras com presença de oxidação, o aumento da energia de soldagem proporcionou a redução da força de cisalhamento dos 6 (seis) grupos, apresentando 1 amostra que ficou abaixo do parâmetro mínimo estabelecido para força de cisalhamento.

Palavras-chave: Soldagem ultrassônica; Componentes automotivos; Parâmetros; Resistência à tensão de cisalhamento.

ABSTRACT

The main objective of this work is to understand the influence of oxidation on copper wires and its impacts on materials welded through the ultrasonic process in automotive components. 42 (forty-two) copper samples were extracted and subdivided into 7 (seven) groups with 6 (six) samples each for the experiment, where the first group had samples without oxidation and the last group had samples that were aged in 360 days. These samples were welded through the ultrasonic process with parameters that ensured the minimum requirements for solderability, visual criteria and the complete union of the copper filaments in the joint. After that, the welded materials were submitted to welding validation by measuring the shear traction force to guarantee the minimum requirements demanded by the internal standard of the automotive sector. The samples without oxidation met the engineering parameters and resulted in the highest values of shear tensile strength. In the samples with the presence of oxidation, the increase in welding energy provided a reduction in the shear force of the 6 (six) groups, with 1 sample that was below the minimum parameter established for shear force.

Keywords: Ultrasonic welding; Automotive components; Parameters; Shear stress strength.

1. INTRODUÇÃO

O processo de soldagem está presente em diversos segmentos industriais, sendo muito responsável pelo incremento tecnológico nas indústrias. O volume de processos de soldagem aplicados industrialmente tem uma evolução formidável, onde mais de 80 processos são utilizados atualmente. Nos últimos anos, novos processos de alta complexidade de união tem sido desenvolvidos, com destaque para processos não convencionais de soldagem com objetivo de solucionar problemas de união de materiais em que os processos convencionais não têm grande impacto [1].

Um processo que tem grande destaque nesse advento é o processo de soldagem ultrassônica (USW). Grande parte da evolução deste processo deve-se a possibilidade de: junção de materiais delgados e espessos, unir materiais dissimilares com muita eficácia, usar energia de forma eficiente e não utilizar materiais de adição ou atmosfera protetora especial [2].

Um seguimento industrial que se desenvolveu pela evolução dos processos de soldagem foi o automotivo. Diversos processos de soldagem são utilizados na fabricação e montagem dos veículos, tanto para a parte estrutural quanto periférica dos veículos. Diversos processos convencionais e não-convencionais são utilizados para unir metais e polímeros na fabricação de carrocerias, faróis, painéis e os chicotes elétricos etc.

Dentre os processos não-convencionais, a soldagem ultrassônica tem cada vez mais destaque. Este processo de estado sólido que produz uma solda através da introdução de vibração de cisalhamento de alta frequência e pressão normal para a interface da solda. A pressão é aplicada perpendicularmente às superfícies e a vibração ultrassônica induz forças de cisalhamento de alta frequência e, quando estas forças ultrapassam o limite de escoamento do material, deformações locais acontecem. Além disso, as forças de cisalhamento de alta frequência quebram e removem os contaminantes superficiais e produzem uma sólida ligação metalúrgica na superfície dos metais. A solda é produzida sem a fusão dos materiais de base e sua principal vantagem em relação aos processos convencionais de união por soldagem é o baixo aporte térmico na solda [2–4].

As variáveis básicas do processo de soldagem ultrassônica são três: amplitude de vibração, pressão aplicada e o tempo de soldagem. Deve-se fornecer energia suficiente para romper as camadas de óxidos e promover deformação na superfície, criando condições para a formação de ligações interatômicas. A potência é uma função da amplitude da vibração, da força aplicada e a energia fornecida ao processo é proporcional ao tempo de soldagem [4].

Os metais mais adequados para este processo são os metais não ferrosos, como cobre, alumínio e suas ligas, devido ao grau de pureza das ligas envolvidas no processo. Materiais que contém chumbo, zinco e estanho não são recomendados para serem soldados, pois apresentam elementos que atuam como lubrificante, minimizando a abrasão exigida para execução da soldagem [4].

O cobre está maciçamente presente nos automóveis, principalmente na parte elétrica/eletrônica. Por ter sido um dos primeiros materiais a ser descoberto e trabalhado pelo Homem, o cobre tem diversas aplicações em alguns seguimentos, sobretudo no tocante a energia elétrica e térmica. Esta presença é motivada devido o cobre ser ótimo condutor de calor e eletricidade, ser flexível e de baixo custo [5].

Neste contexto, o referido trabalho discute sobre o impacto da oxidação do cobre no resultado do processo de soldagem ultrassônica para a construção de produtos elétricos para o segmento automotivo, principalmente no tocante a redução de resistência mecânica da solda, influência nos parâmetros de soldagem e incremento no número de *scrap* de materiais com potencial de utilização e validação segundo normas do setor.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Materiais

Foram criados em laboratório 7 (sete) grupos de materiais com 6 (seis) amostras por grupo, onde o primeiro grupo foram alocados fios de cobre sem oxidação, o segundo grupo os fios de cobre apresentam 15 (quinze) dias de oxidação, o terceiro grupo 30 (trinta), o quarto grupo 60 (sessenta), o quinto grupo 90 (noventa), o sexto grupo 180 (cento e oitenta) e o sétimo grupo 360 (trezentos e sessenta dias). Os 7 (sete) grupos foram submetidos ao processo de soldagem ultrassônica. Posteriormente, foram retiradas fotos macrográficas das amostras e, em seguida, os materiais foram submetidos ao ensaio de força de cisalhamento para validação das propriedades mecânicas exigidas por normas específicas do segmento automotivo.

Os fios de cobre utilizados são fios de cobre eletrolítico (99,99% de pureza) de classificação ASTM B49 aplicados no setor automotivo, usando a referência 1T20035-000. O fio apresenta um revestimento externo de PVC ACH 9806 N, com classe de proteção II e isolamento térmico de 105 °C.

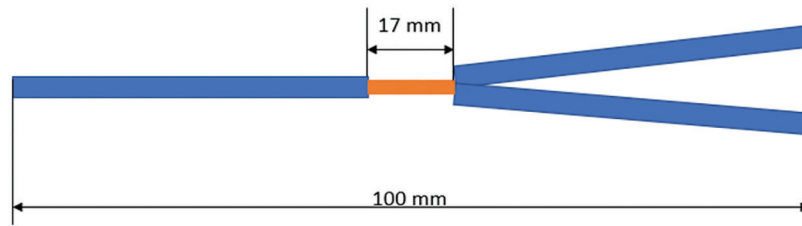


Figura 1: Características construtivas das amostras.

As amostras apresentam como principais características:

- I) Seção transversal do material: $0,35 \text{ mm}^2$ para cada fio. São 3 (três) fios, totalizando $1,05 \text{ mm}^2$ de área;
- II) Comprimento da amostra: 100 mm;
- III) Comprimento do decape: 17 mm;
- IV) Configuração da emenda: 2 para 1 (2 circuitos na entrada para 1 circuito na saída).

Na Figura 1 está representado de forma esquematicamente as características das amostras citadas anteriormente.

2.2. Métodos

2.2.1. Processo de envelhecimento

Para que seja possível uma celeridade nos ensaios, foi realizado um procedimento de envelhecimento das amostras de cobre. Este processo é fundamentado no procedimento interno da companhia PF.90303 [6], que determina uma série de ciclos de aquecimento e resfriamento das amostras para a obtenção da oxidação por um determinado período. As amostras com envelhecimento de 15 dias não passaram por estas etapas de ciclo térmico, pois se tornaria inviável estrategicamente a realização desse processo em função dos ínfimos tempos nos ciclos, optando-se assim por um envelhecimento natural das amostras.

O procedimento de envelhecimento consiste em realizar ciclos de aquecimento e resfriamento conforme descrito nas etapas abaixo:

- I) **Pré-ensaio:** as amostras foram levadas para 2 ciclos de ensaio na câmara climática, com temperaturas variando entre $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ até $85 \text{ }^\circ\text{C}$ durante um intervalo de tempo que variou de 80 min para as amostras de 1 ano até 6,6 min para as amostras de 1 mês de envelhecimento.
- II) **Ciclo 01 – Estufa – Freezer – Estufa:** nesta etapa, as amostras passam por 5 ciclos de aquecimento-resfriamento-aquecimento. O aquecimento acontece a uma temperatura de $105 \text{ }^\circ\text{C}$ durante tempo calculado para cada tipo de envelhecimento das amostras. Imediatamente após a saída da estufa, os materiais são levados ao freezer, onde são expostas a temperaturas de $-40 \text{ }^\circ\text{C} (\pm 3^\circ\text{C})$ durante tempo calculado para cada tipo de envelhecimento das amostras. Esta etapa repete-se 5 vezes de forma ininterrupta para cada grupo de amostra.
- III) **Ciclo 02 – Câmara úmida – Freezer – Estufa:** nesta etapa, as amostras passam por 5 ciclos de aquecimento-resfriamento-reposo-aquecimento-reposo. Na etapa de câmara úmida, o material é submetido a um ciclo de aquecimento a $40 \text{ }^\circ\text{C} (\pm 3^\circ\text{C})$ durante tempo calculado para cada tipo de envelhecimento das amostras. Após isso, as amostras são levadas ao freezer a temperatura de $-40 \text{ }^\circ\text{C} (\pm 3^\circ\text{C})$ durante tempo calculado para cada tipo de envelhecimento das amostras.

2.2.2. Processo de soldagem

Após o envelhecimento, as amostras com fios de cobre foram soldadas pelo processo ultrassônico. O equipamento utilizado foi uma máquina de solda do fabricante Schunk modelo Minic II. Os parâmetros de engenharia, que são os parâmetros estabelecidos para garantir que os materiais sem grau de oxidação sejam soldados são apresentados na Tabela 1.

Estes parâmetros de engenharia foram obtidos através de técnica DOE, onde todos os parâmetros são de regulagem na máquina de solda, ou seja, eles são inseridos no equipamento para que o processo possa acontecer.

Tabela 1: Parâmetros de engenharia para soldagem dos fios de cobre 0,35 mm² (total: 1,05 mm²).

ENERGIA DE SOLDAGEM (Ws)	PRESSÃO (BAR)	AMPLITUDE (%)	LARGURA (mm)	TEMPO (ms)
124	2,34	55	1,12	291

**Figura 2:** Máquina de solda utilizada no experimento.

Outro fator é que estes parâmetros garantem os requisitos de união estabelecidos no procedimento interno PF.90303/2018, que são a união completa dos 7 filamentos de cobre e força de cisalhamento superior à 10N.

Na Figura 2 é apresentada uma ilustração sobre a máquina de solda utilizada no processo.

2.2.3. Ensaio de tração

Após a soldagem das 6 amostras de cada grupo, 3 amostras foram submetidas ao processo de ensaio de tração tipo *peeling*. Este ensaio é mais crítico se comparado ao teste de força convencional. O tipo *peeling* tem por objetivo verificar a força de tração da amostra com uma força radial aplicada a amostra, enquanto o processo de força de tração convencional aplica a força na direção axial.

Baseado no procedimento interno PF.90303/2018, que regulamenta este processo, para o diâmetro de cabo de 0,35 mm² o valor mínimo admissível para força de tração método *peeling* para aprovação da amostra é de 10 N.

O equipamento utilizado para este processo é o dinamômetro da marca Starrett, modelo FFM 550-X, com data de calibração de 03/05/2021. Na Figura 3 está ilustrado esquematicamente o equipamento utilizado na realização do ensaio de tração.

2.2.4. Ensaio visual

Após a soldagem das 6 amostras de cada grupo, foram selecionadas de forma aleatória 3 amostras para inspeção visual com auxílio de microscópio antes de serem submetidas ao ensaio de tração tipo *peeling*. Este ensaio foi realizado por técnico de laboratório especializado em microscopia ótica, e habilitado ao procedimento interno. Esta etapa tem por objetivo verificar a integridade da solda, verificando aderência e conformidade da união realizada no processo de soldagem e os critérios de aceitação são: união completa dos 7 filamentos de cobre e impressão das ranhuras do ferramental da ultrassônica sobre o cobre. Estes critérios de aceitação estão presentes no procedimento interno PF.90303/2018.

As amostras foram inseridas no campo de visão do microscópio ML 3700, fabricante MECAL para visualização da face anterior e posterior da união soldada, com objetivo de verificar a marca executada pelo ferramental de soldagem e se houve a aderência dos filamentos de cobre.

A Figura 4 ilustra esquematicamente o equipamento utilizado no processo.



Figura 3: Dinamômetro Starrett FFM 550-X.



Figura 4: Visão esquemática microscópio de bancada.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir serão apresentados os resultados de soldagem para os 7 grupos de amostras submetidos ao processo de soldagem ultrassônica e os respectivos parâmetros. Vale ressaltar que os parâmetros foram obtidos de forma automática pela máquina de solda de maneira que estes valores garantiram a soldabilidade dos materiais. Valores abaixo destas referências não permitiram os mínimos requisitos de união dos materiais, que são a união completa dos 7 filamentos de cobre presente no fio e o resultado mínimo de força de tração de 10 N. Esses requisitos são estabelecidos no procedimento interno PF.90303/2018.

A partir destes resultados, são discutidos a influência de cada um destes parâmetros na qualidade de cada amostra de solda reproduzida.

3.1. Energia de soldagem

Na soldagem ultrassônica, a energia de soldagem fornecida pelo equipamento é diretamente proporcional à pressão P , amplitude A e tempo t . Com base nestes argumentos, diferentes níveis de pressão, amplitude e tempo foram adotados para realizar os experimentos [7].

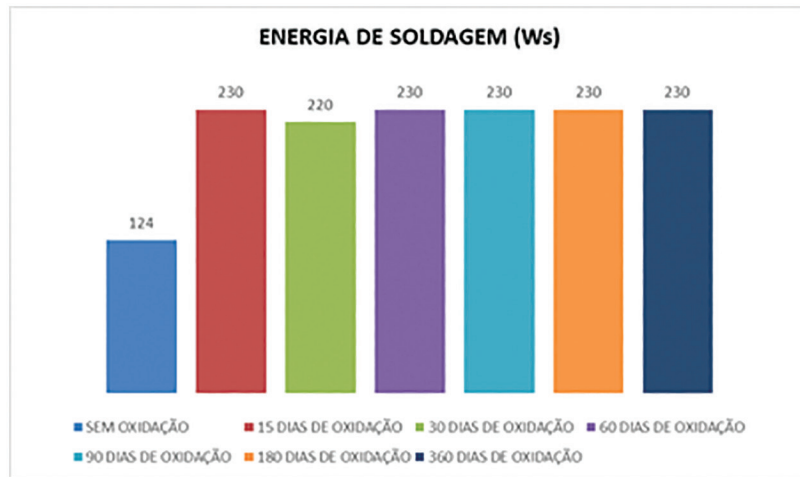


Figura 5: Parâmetro energia de soldagem após procedimento experimental.

Para o estudo realizado, foram encontrados parâmetros de energia de soldagem que garantiram as mínimas características visuais da solda e não permitiram o desprendimento de nenhum filamento do fio de cobre, pois, por norma, em função do diâmetro do fio (0,35 mm²) e a quantidade de pernas (7 pernas), a aprovação visual de uma emenda se dá a partir do não desprendimento de nenhuma perna dos fios. A Figura 5 apresenta os valores de energia de soldagem obtidos no experimento.

O material sem oxidação cumpriu o requisito necessário e apresentou boa soldabilidade com o parâmetro de engenharia (124 Ws). A partir dos 15 dias de envelhecimento/oxidação, o valor de energia necessário foi de 230 Ws, com exceção do material com 30 dias de soldagem, que apresentou o valor de 220 Ws, que apresentou essa redução em razão do aumento do tempo de soldagem (422 ms). Esse aumento de energia é justificado pela necessidade do processo de quebrar a camada de óxido formada na superfície dos fios de cobre e, para que essa condição seja atendida, é necessário intensificar a energia e o tempo de soldagem para sucesso na remoção da contaminação superficial [3].

Quando é variada a energia de soldagem durante o processo, há uma variação na amplitude vibratória e, portanto, a tensão dinâmica na superfície de solda. Caso haja variações abruptas da energia da soldagem para valores superiores ou inferiores ao limite tolerável, há consequências negativas na junta soldada, uma vez que para valores muito elevados, grandes tensões inter-raciais dinâmicas danificam a solda, pois introduzem trincas e proporcionam o cisalhamento da solda; em caso de valores muito baixos, nenhuma solda é realizada. Em materiais mais espessos e/ou mais duros, os valores requeridos de energia de soldagem são mais elevados se comparados a materiais mais delgados e/ou mais moles [3–5,7,8].

Para o aumento da energia de soldagem, a variável de maior interferência e importância é a frequência de vibração da ponta do sonotrodo em relação a tensão elétrica de entrada. O deslocamento ideal da ponta do sonotrodo são aqueles que permitem executar uma solda com boa resistência mecânica quando mantida as outras variáveis constantes [3].

3.2. Tempo de soldagem

O tempo de soldagem é uma variável que se encontra intimamente ligada a energia de soldagem e tem influência direta com a capacidade e a qualidade da junta soldada produzida. A Figura 6 apresenta os resultados do tempo de soldagem obtido no experimento.

O efeito do tempo de soldagem é importante para o parâmetro pressão de soldagem, pois tempos prolongados de soldagem resultam em danos por fadiga e tempos de soldagem insuficientes resultam em soldas incompletas [9]. O tempo mínimo necessário varia com a espessura das peças em contato com o sonotrodo. Em cenários práticos, para materiais de espessuras delgadas, tem-se o tempo de soldagem de, aproximadamente, 0,005 s e para materiais mais espessos esses valores podem se aproximar da casa de 1,2 s [3].

MATHENY e GRAFF [10] discutem a influência do tempo de soldagem e qual a correlação desse parâmetro com os outros parâmetros de soldagem. De acordo com ambos, o tempo de soldagem pode ser uma variável dependente ou independente de outros parâmetros. Essa correlação ou não acontece com base no tipo de sistema de soldagem que está sendo utilizado.

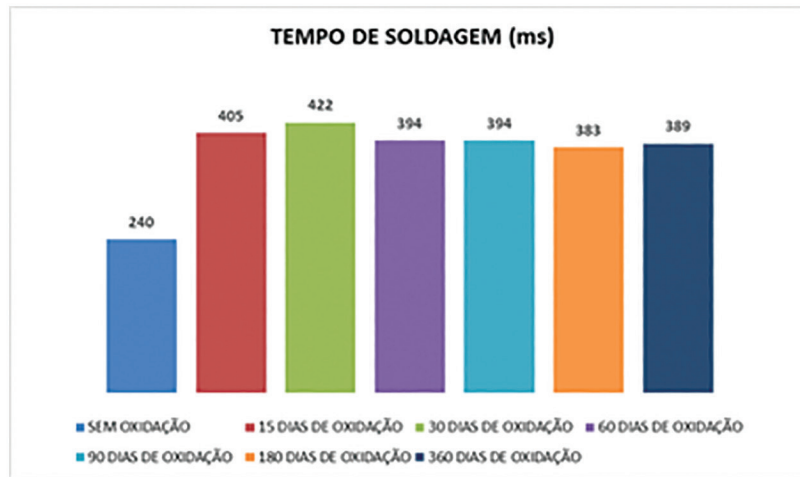


Figura 6: Parâmetro energia de soldagem após procedimento experimental.

Na soldagem com fios de cobre sem oxidação, o tempo obtido foi o parâmetro de engenharia (240 ms). Com o aumento da oxidação, o tempo de soldagem também aumentou proporcionalmente até o período de 30 dias de oxidação. Nos materiais a seguir, o tempo de soldagem caiu e se estabilizou. Essa estabilidade também foi percebida com a energia de soldagem. Além disso, o tempo de soldagem variou praticamente da mesma forma que a energia de soldagem, o que permite inferir que energia e tempo são grandezas intimamente interligadas.

Os tempos encontrados no experimento são validados pelos estudos de MATHENY e GRAFF [10]. Nos resultados encontrados, a soldagem de materiais metálicos é bastante curta, abaixo de 1 s (1.000 ms), onde os tempos mais comuns variam entre 0,25 e 0,5 s (250 a 500 ms). Tempos de soldagem superiores a esses valores requerem a necessidade de examinar a solda a fim de verificar a propagação de trincas e defeitos; além disso, tempos maiores do que esses inferem na necessidade de modificar os parâmetros de soldagem no sistema.

Outro estudo de MATHENY [11] feito em folhas de cobre encontrou os melhores resultados de soldabilidade para tempos de soldagem que variaram entre 300 e 500 ms. Para tempos superiores (700 a 900 ms) os resultados de soldagem encontrados não foram satisfatórios e as soldas foram reprovadas. Além disso, através de uma análise de Pareto e diagrama de efeito, foi confirmado que os parâmetros que mais influenciaram no resultado de resistência média da solda foram a pressão de soldagem e o tempo de soldagem, utilizando uma combinação de pressão a partir de 3 bar e tempos entre 300 e 500 ms.

ELANGO VAN *et al.* [12] no estudo realizado em juntas de cobre com 0,2 mm de espessura obteve tempos para o melhor resultado de resistência mecânica da junta soldada com tempos de soldagem de 225 ms, o que é um tempo muito próximo ao tempo determinado pela engenharia de 240 ms.

Além disso, ELANGO VAN *et al.* [12] comprova em seus estudos a forte interação entre tempo e pressão de soldagem na obtenção de juntas soldadas com alta ou baixa resistência mecânica. Além disso, é comprovado também uma correlação entre tempo e amplitude de soldagem para o resultado de elevação ou redução de resistência mecânica das juntas de cobre soldadas.

3.3. Pressão de soldagem

A pressão de soldagem tem papel importante na constituição da solda no processo ultrassônico. Este parâmetro é essencial ao processo de soldagem devido ao fato que a soldagem ultrassônica só ocorre após um contato acústico entre as peças de trabalho e o sonotrodo [13]. A Figura 7 apresenta os resultados de pressão de soldagem obtidos no experimento.

De acordo com AMZA *et al.* [14], percebe-se que ao passo que a pressão de soldagem é reduzida, os valores de resistência à tração da solda diminuem gradualmente. Esse fato acontece com a redução da pressão, o contato acústico fraco entre as peças a serem soldadas e o sonotrodo acontece, promovendo assim um amortecimento da oscilação das ondas ultrassônicas e, por consequência, há uma redução da energia mecânica que é transmitida às peças. Contudo, a pressão não pode ser elevada em demasia, pois com altos valores de pressão, a resistência mecânica da solda aumenta substancialmente. Contudo, há a introdução de características negativas a solda, como marcas indesejadas e rebarbas.

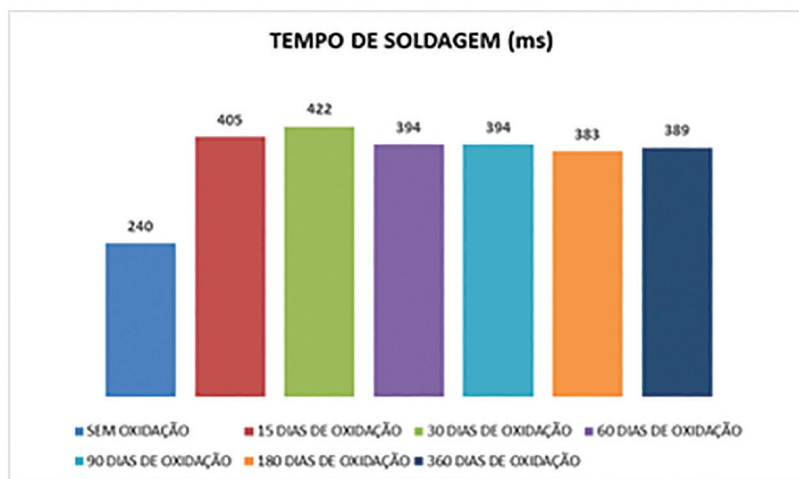


Figura 7: Parâmetro pressão de soldagem após procedimento experimental.

O resultado obtido foi uma força de cisalhamento média de 33,93 N. Ao passo que os materiais foram sendo envelhecidos, os valores de pressão reduziram significativamente, variando entre 1,9 e 1,75 e a redução dos valores de pressão e da força de cisalhamento prejudicam o contato físico e uma atenuação da energia mecânica, o que corrobora com as definições informadas.

O estudo de HIRAISHI e WATANABE [15] indica que valores de pressão excessiva provocam uma elevação demasiada do atrito. Com isso, suprime o movimento relativo das superfícies, resultando na redução da resistência mecânica da solda e aumenta o percentual de adesão da ferramenta/peça, provocando marcações significativas nas peças.

Os resultados obtidos no estudo de ELANGO VAN *et al.* [12] em chapas de cobre com espessura de 0,2 mm infere que quando a pressão está no nível de 2 bar, obtém-se os maiores valores de resistência mecânica da junta se comparado a níveis maiores (2,5 e 3 bar). Isso é esperado devido ao fato que, quando a pressão aumenta, o sonotrodo retém as peças de trabalho sem uma quantidade significativa de atrito, ou seja, a elevação da pressão não permite o movimento relativo entre as peças e, conseqüentemente, reduz a temperatura na interface e a soldagem entre as partes.

Além disso, ELANGO VAN *et al.* [12], através de uma combinação de parâmetros pelo método ANOVA, inferiu que os parâmetros que resultaram na máxima resistência mecânica da solda foram atingidos com pressão de 2 bar, tempo de 225 ms e amplitude de 50%. A combinação de fatores que obteve o menor valor de resistência mecânica da solda apresenta pressão de 2,5 bar, tempo de 200 ms e amplitude de 45%.

3.4. Amplitude

De acordo com SHADID [7], a energia de soldagem é um parâmetro diretamente proporcional a Pressão, Amplitude e Tempo. Essa informação está evidenciada e comprovada neste experimento, uma vez que o comportamento da amplitude é diretamente proporcional a evolução da energia de soldagem. Na Figura 8 é apresentado o comportamento da amplitude de soldagem durante o experimento.

No experimento, quando a energia de soldagem é aumentada, a amplitude de soldagem também é ampliada proporcionalmente, pois no equipamento utilizado nos testes, a amplitude de soldagem é variável

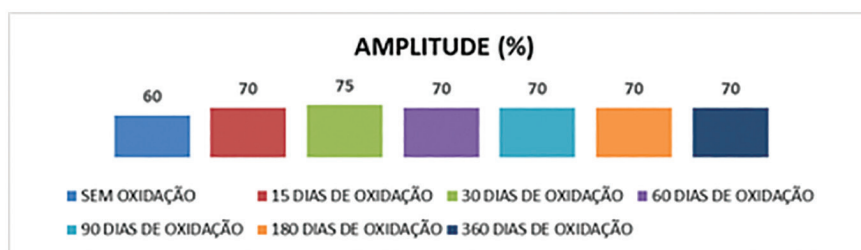


Figura 8: Parâmetro amplitude de soldagem após procedimento experimental.

dependente da energia de soldagem. Com essa variação, há uma variação na tensão dinâmica na superfície da solda. Com isso, amplitudes muito elevadas podem conferir a superfície da solda tensões inter-raciais dinâmicas e, caso os valores de amplitude sejam muito baixos, não haverá solda executada [8–10,14].

No estudo de ELANGOVA *et al.* [12], o valor de amplitude que oferece a junta soldada os melhores valores de resistência mecânica foram de 50%. Este valor é muito próximo aos valores determinados pelos parâmetros de engenharia, onde a amplitude é de 60%, o que corrobora para justificar que os valores obtidos no estudo são válidos.

Uma outra conclusão obtida em ELANGOVA *et al.* [12] é que os parâmetros de amplitude de soldagem e pressão de soldagem tem forte relação para maximizar e/ou minimizar os valores de resistência mecânica das juntas soldadas. Contudo, os parâmetros de amplitude e tempo de soldagem não tem interação e, por consequência, não são interligados no tocante a potencializar ou reduzir os valores de resistência mecânica das juntas de cobre soldadas.

3.5. Ensaio de força de tração

Como destacado e referenciado na norma PF.90303, um dos critérios de aceitação e validação da solda ultrassônica realizada é obtido através dos resultados de força tração. Na Figura 9 é apresentado a média dos resultados para o ensaio de força de tração tipo *peeling*, onde foram utilizadas 6 (seis) amostras ensaiadas para cada um dos 7 (sete) grupos que foram submetidos ao processo de soldagem ultrassônica. Vale destacar que a norma PF. 90903 estabelece que o critério de aprovação para uma amostra é um valor de força tração superior a 10 N.

No grupo 01, composto pelos materiais sem oxidação, o valor médio de força de tração de cisalhamento é de 30,23 N, com desvio-padrão de 8,525. Como esperado, todas as amostras atendem ao requisito normativo de força de tração tipo *peeling* superior a 10 N. Este fato acontece em associação a 2 parâmetros essenciais:

- I) Energia de soldagem: controlada. Neste grupo de amostras, a energia foi de 124 Ws.
- II) Pressão de soldagem: maior do grupo com valor de 2,2 Bar assim como aconteceu no estudo de SHAKIL *et al.* [13].

Com isso, para este cenário os materiais estão validados para utilização normal no produto acabado.

No grupo 02, composto por materiais com 15 (quinze) dias de oxidação, o valor médio de força de tração de cisalhamento é de 22,58 N, com desvio padrão de 4,687. Nestas condições, todas as amostras atendem ao requisito normativo de tração tipo *peeling* superior a 10 N. Os parâmetros de soldagem que permitiram esses resultados foram:

- I) Energia de soldagem: 230 Ws;
- II) Pressão de soldagem: 1,75 Bar;

Comparando a variação de energia de soldagem entre o material sem oxidação e o material com 15 dias de oxidação, há um incremento de 54% de energia e uma redução de 25% no valor médio de tração. Com isso, ao passo que a energia de soldagem aumenta no processo, o valor de tensão de cisalhamento reduz sensivelmente ao incremento.

No grupo 03, composto por materiais com 30 (trinta) dias de oxidação, o valor médio de força de tração de cisalhamento é de 15,43 N, com desvio padrão de 3,288. Nestas condições, todas as amostras atendem ao

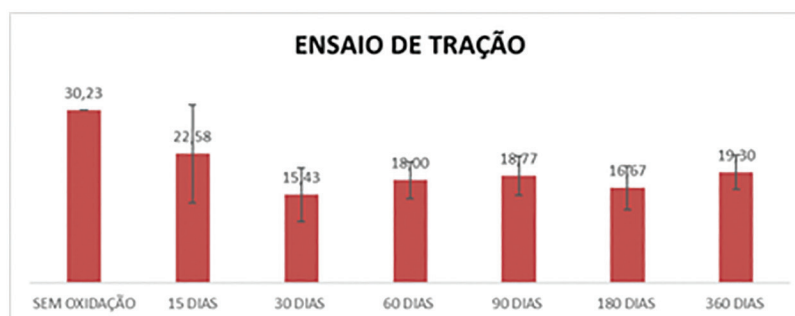


Figura 9: Resultado médio de força de tração tipo *peeling* dos 7 grupos de amostras soldadas.

requisito normativo de tração tipo *peeling* superior a 10 N. Os parâmetros de soldagem que permitiram esses resultados foram:

- I) Energia de soldagem: 220 Ws;
- II) Pressão de soldagem: 1,90 Bar;

Comparando com a variação de energia de soldagem entre o material sem oxidação e o material com 30 dias de oxidação, há um incremento de 56% de energia e uma redução de 49% do valor médio de tração. Com isso, ao passo que a energia de soldagem aumenta no processo, o valor de tensão de cisalhamento reduz sensivelmente ao incremento.

No grupo 04, composto por materiais com 60 (sessenta) dias de oxidação, o valor médio de força de tração de cisalhamento é de 18,00 N, com desvio padrão de 3,436. Nestas condições, todas as amostras atendem ao requisito normativo de tração tipo *peeling* superior a 10 N. Os parâmetros de soldagem que permitiram esses resultados foram:

- I) Energia de soldagem: 230 Ws;
- II) Pressão de soldagem: 1,80 Bar;

Comparando a variação da energia de soldagem entre o material sem oxidação e o material com 60 dias de oxidação, há um incremento de 54% de energia e uma redução de 40% no valor médio de tração. Com isso, ao passo que a energia de soldagem aumenta, o valor de tensão de cisalhamento reduz sensivelmente ao incremento.

No grupo 05, composto por materiais com 90 (noventa) dias de oxidação, o valor médio de força de tração de cisalhamento é de 18,77 N, com desvio padrão de 3,806. Nestas condições, todas as amostras atendem ao requisito normativo de tração tipo *peeling* superior a 10 N. Os parâmetros de soldagem que permitiram esses resultados foram:

- I) Energia de soldagem: 230 Ws;
- II) Pressão de soldagem: 1,90 Bar;

Comparando a variação da energia de soldagem entre o material sem oxidação e o material com 90 dias de oxidação, há um incremento de 54% de energia e uma redução de 38% no valor médio de tração. Com isso, ao passo que a energia de soldagem aumenta, o valor de tensão de cisalhamento reduz sensivelmente ao incremento.

No grupo 06, composto por materiais com 180 (cento e oitenta) dias de oxidação, o valor médio de força de tração de cisalhamento é de 16,67 N, com desvio padrão de 2,984. Nestas condições, todas as amostras atendem ao requisito normativo de tração tipo *peeling* superior a 10 N. Os parâmetros de soldagem que permitiram esses resultados foram:

- I) Energia de soldagem: 230 Ws;
- II) Pressão de soldagem: 1,75 Bar;

Comparando a variação da energia de soldagem entre o material sem oxidação e o material com 180 dias de oxidação, há um incremento de 54% de energia e uma redução de 45% no valor médio de tração. Com isso, ao passo que a energia de soldagem aumenta, o valor de tensão de cisalhamento reduz sensivelmente ao incremento.

No grupo 07, composto por materiais com 360 (trezentos e sessenta) dias de oxidação, o valor médio de força de tração de cisalhamento é de 19,30 N, com desvio padrão de 6,438. Nestas condições, todas as amostras atendem ao requisito normativo de tração tipo *peeling* superior a 10 N. Os parâmetros de soldagem que permitiram esses resultados foram:

- I) Energia de soldagem: 230 Ws;
- II) Pressão de soldagem: 1,80 Bar;

Comparando a variação da energia de soldagem entre o material sem oxidação e o material com 60 dias de oxidação, há um incremento de 54% de energia e uma redução de 57% no valor médio de tração. Com

isso, ao passo que a energia de soldagem aumenta, o valor de tensão de cisalhamento reduz sensivelmente ao incremento.

Ainda no grupo 07, mesmo com grande redução do valor de tração de cisalhamento, os parâmetros produzem materiais que atendem aos requisitos de validação de qualidade através do ensaio de tração. Um fato diferente nesse grupo versa a respeito do resultado da tração da amostra 02, que foi de 9,6 N. Este valor é abaixo do mínimo estabelecido, o que reprova a condição da amostra. Entretanto, os valores das outras 2 amostras são bastante discrepantes entre essa amostra e o desvio-padrão é o maior entre todos os 7 grupos estudados, o que faz inferir que a amostra 02 deve ser descartada do estudo.

Os resultados encontrados de energia de soldagem e tração tem correlação validada por MARQUES *et al.* [4], uma vez que ao passo que a energia de soldagem é incrementada, ela transfere para a solda deformações plásticas e, por consequência, tensão residual. Com isso, a resistência à tração de cisalhamento sofre redução com comportamento quase que inversamente proporcional a energia de soldagem, ou seja, com o aumento da energia de soldagem, há redução da tensão de cisalhamento.

4. CONCLUSÃO

A partir do exposto, é possível identificar as seguintes relações:

1. Os parâmetros que afetam a soldagem ultrassônica para união Cobre-Cobre foram estudados. Os parâmetros ideais para união dos materiais foram encontrados nos valores de engenharia e confirmados nos materiais sem oxidação.
2. É observado que a pressão de soldagem, tempo de soldagem e amplitude tem efeito significativo na resistência mecânica das juntas soldadas.
3. O parâmetro energia de soldagem tem a maior influência no processo de descontaminação das superfícies oxidadas durante o processo de soldagem ultrassônica, pois é a responsável por inserir energia vibracional no processo.
4. O aumento da energia de soldagem reduz proporcionalmente os valores da força de cisalhamento da solda em função da inserção de deformações na solda.
5. As amostras com 30 dias e 180 dias apresentaram os menores valores de resistência a tensão de cisalhamento.
6. Existe uma linearidade no incremento dos parâmetros nas amostras envelhecidas até 30 dias.
7. Nas amostras a partir de 60 dias, os parâmetros tornam-se estáveis.
8. Uma amostra no ensaio de tração do material envelhecido por 360 dias apresentou valor inferior a 10 N no ensaio de resistência a tração de cisalhamento (*peeling*), tornando questionável os parâmetros obtidos para essa condição.
9. Estatisticamente, o melhor grupo de amostras é o grupo 6 (180 dias de envelhecimento), pois é o que apresenta menor desvio-padrão entre todos os grupos analisados.
10. Com os parâmetros e resultados encontrados, os filamentos de cobre com grau de oxidação até 365 apresentam condições de serem trabalhados e utilizados em caráter industrial sem comprometer o produto acabado.

5. AGRADECIMENTOS

Agradecemos a Universidade Federal de Pernambuco, em especial ao laboratório de Metalurgia do Pó, pela colaboração no desenvolvimento deste estudo, principalmente pelo direcionamento das ações realizadas no campo.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] DEHELEAN, D., OANCA, O., “Improving productivity and quality in plastic and thin metallic plates manufacturing by using ultrasonic welding processes”, *Soldagem & Inspeção*, v. 14, n. 4, pp. 344–351, Out. 2009. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-92242009000400009>.
- [2] ASM International, *ASM Metals Handbook, Volume 6: Welding brazing and soldering*, Materials Park, OH, ASM International, 1993.
- [3] CHANG, U.I., FRISCH, J., “On optimization of some parameters in ultrasonic metal welding”, In: *Proceedings of the 54th AWS Annual Meeting Held*, Chicago, 1973.
- [4] MARQUES, P.V., MODENESE, P., BRACARENSE, A., *Soldagem: fundamentos e tecnologia*, 3 ed., Belo Horizonte, Editora UFMG, 2011.

- [5] RODRIGUES, M.A., SILVA, P.P., GUERRA, W., “COBRE”, *Química Nova na Escola*, v. 34, n. 3, p. 161–162, 2012.
- [6] FCA Fiat Chrysler Automobili, *PF 90303 Wiring Harness – Assembly Performance*, v. 2, Reino Unido, FCA Fiat Chrysler Automobili, 2018.
- [7] SHAHID, M.B., HAN, S.C., JUN, T.S. *et al.*, “Effect of process parameters on the joint strength in ultrasonic welding of Cu and Ni foils”, *Materials and Manufacturing Processes*, v. 24, n. 11, p. 1217–1224, 2019. doi: <http://dx.doi.org/10.1080/10426914.2019.1643474>.
- [8] DANIELS, H.P.C., “Ultrasonic welding”, *Ultrasonics*, v. 3, n. 4, p. 190–196, Oct.–Dec. 1965. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0041-624X\(65\)90169-1](http://dx.doi.org/10.1016/0041-624X(65)90169-1).
- [9] TYLECOTE, R.F., *The solid phase welding of metals*, New York, St. Martin’s Press, 1968.
- [10] MATHENY, M.P., GRAFF, K.F., “Ultrasonic welding of metals”, In: Ahmed, N. (ed), *New Developments in Advanced Welding*, chapter 9, Sawston, Reino Unido, Woodhead Publishing Limited, 2005.
- [11] MATHENY, M.P., *Ultrasonic metal welding foils to tabs for lithium-ion Battery cells EWI Summ Rep SR1301*, Columbus (OH), EWI, 2012.
- [12] ELANGO VAN, S., PRAKASAN, K., JAIGANESH, V., “Optimization of ultrasonic welding parameters for copper to copper joints using design of experiments”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 51, n. 1, pp. 163–171, 2010. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-010-2627-1>.
- [13] SHAKIL, M., TARIQ, N.H., AHMAD, M., *et al.*, “Effect of ultrasonic welding parameters on microstructure and mechanical properties of dissimilar joints”, *Materials & Design*, v. 55, pp. 263–273, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2013.09.074>.
- [14] AMZA, G., LUCHIAN, C., NITOI, D. F., *et al.*, “Contributions regarding plastic materials ultrasonic welding used in automotive industry”, *Materiale Plastice*, v. 47, n. 1, p. 90–93, 2010.
- [15] HIRAISHI, M., WATANABE, T., “Improvement of ultrasonic weld strength for Al-Mg alloy by adhesion of alcohol”, *Quarterly Journal of the Japan Welding Society*, v. 21, n. 2, p. 295–301, 2003. doi: <http://dx.doi.org/10.2207/qjws.21.295>.