

OTIMIZAÇÃO DE PARÂMETROS DE SOLDAGEM POR RESISTÊNCIA PARA REDUÇÃO DE RESPINGOS EM JUNTAS SOLDADAS

Rômulo Borba Vicente, romuloborba@outlook.com¹

José Hilton Ferreira da Silva, jhiltonf@ct.ufpb.br¹

Thiago Domingos de Araújo Lemos, thiago_domingos15@hotmail.com²

¹Universidade Federal da Paraíba, Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Centro de Tecnologia, Bloco “F” - Campus I 58.059-900, João Pessoa-PB, Brasil.

² Universidade de Pernambuco, Rua Benfica, 455 - Madalena - 50.740-410, Recife-PE, Brasil.

Resumo: A Soldagem por Resistência é um processo que permite uma grande produtividade, não utiliza material de adição e apresenta uma ótima qualidade nas uniões soldadas. Devido as suas características, é amplamente utilizado na indústria automobilística. Com a utilização de aços de alto desempenho e adesivos estruturais na união de chapas, surge um maior desafio na parametrização da solda para garantir a ausência de expulsão (respingo de solda) mantendo a qualidade da união soldada. Este trabalho tem como objetivo a caracterização de uniões soldadas por solda a ponto e otimizar a redução de respingos de solda, que afetam a segurança e qualidade do processo. Em uma primeira etapa é apresentada a formação do núcleo de solda, respingos e os parâmetros associados como: tempo, corrente, força, resistência e materiais. Como o tempo de solda é uma variável que afeta diretamente a produtividade na indústria e o material é uma imposição do projeto, este trabalho analisa as variáveis corrente e energia para avaliar os limites de formação das expulsões em uniões soldadas sem utilização de adesivos estruturais e com a utilização dos mesmos. A fim de avaliar os parâmetros, foram utilizados ensaio não destrutivo e resultantes de energia do processo de solda das chapas soldadas para determinar uma melhor configuração, mantendo o processo livre de expulsões e garantindo a resistência mecânica necessária para as uniões soldadas.

Palavras-chave: Soldagem por resistência, Respingos, Adesivos estruturais, Parâmetros de soldagem, Expulsão.

1. INTRODUÇÃO

A Soldagem a Ponto por Resistência (Resistance Spot Welding - RSW) tem um lugar importante na indústria, por ser a forma mais simples e amplamente utilizada do processo de soldagem por resistência elétrica, em que as partes metálicas são unidas em um ou mais pontos. Conforme mostrado na Figura 1, a coalescência é produzida em uma área relativamente pequena pelo calor obtido a partir da resistência ao fluxo de corrente elétrica através das peças mantidas juntas por eletrodos sob pressão. A quantidade de calor produzido é uma função de corrente, tempo e resistência entre as peças de trabalho.

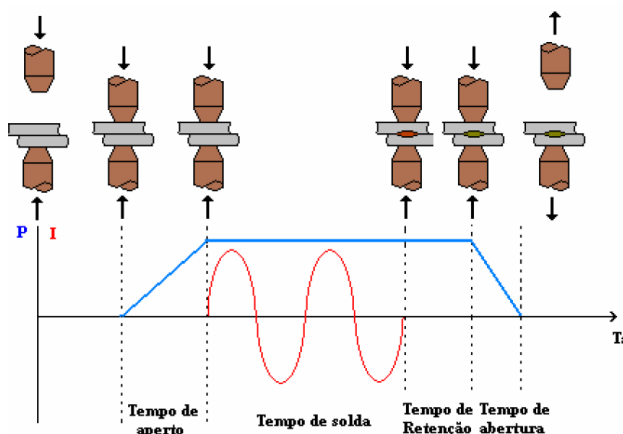


Figura 1. Processo de solda por resistência (Branco, 2004)

Devido à alta resistência na região de solda, o fluxo de corrente elétrica elevada provoca o aquecimento na área de contato, formando o núcleo de solda através do efeito Joule, que pode ser calculado como mostrado na Equação (1).

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

Sendo: Q = Energia (J);

R = Resistência elétrica do material (Ω);

I = Intensidade de corrente elétrica (A);

t = Tempo de solda (s).

A soldagem por resistência tem chamado a atenção de pesquisadores. Segundo Stocco et al. (2008), a caracterização de soldagem por pontos em tempo real usando ultra-som é uma realidade na indústria automotiva de hoje e tem como principal objetivo reduzir o tempo de operação e fornecer meios confiáveis de inspeção de qualidade; os resultados obtidos proporcionam maior flexibilidade para que as plantas trabalhem com o equipamento de inspeção ultra-sônico, aumentará a confiabilidade e o controle nas regiões mais críticas dos corpos e também diminuirá o tempo de inspeção durante a produção.

Furlanetto et al. (2012) correlacionaram os métodos tradicionais de teste destrutivo com a análise ultra-sônica B-Scan de porcas soldadas de resistência por projeção; o sistema ultra-sônico pode facilmente detectar qualquer desvio no processo de soldagem, com algumas vantagens importantes em relação aos procedimentos de inspeção atualmente utilizados (testes de torque aplicados estatisticamente em alguns locais do corpo de prova).

Segundo Zhang e Senkara (2006), problemas operacionais durante o processo de soldagem por resistência ocorrem, dentre os quais, os mais comuns são: desvio de corrente, endentação excessiva, distribuição da corrente, alinhamento e desalinhamento de eletrodos e expulsão de material.

A formação de respingos de solda, também conhecido por expulsão, é um fenômeno indesejado e bastante comum associado ao processo de solda por resistência. A qualidade do material soldado e do eletrodo são afetados pelos respingos, como mostrado na Figura 2. Quando o respingo é proveniente do núcleo fundido, a resistência da solda pode ser prejudicada.

Os respingos também servem como um indicador visual de um processo de solda, para atingir os requisitos do processo de solda, as altas correntes utilizadas chegam geralmente muito próximas do limite de formação dos respingos. Adicionalmente a expulsão tem uma influência negativa nos adesivos estruturais quando utilizados em conjunto com a solda ponto, danificando a camada de adesivo.



Figura 2. Ponto de solda e eletrodo afetados por respingos.

A AWS (2012) apresenta os métodos de teste para avaliar o comportamento de solda por resistência a ponto de resistência de chapas de aço para indústria automotiva.

Este trabalho tem como objetivo a caracterização de uniões soldadas a ponto por resistência e otimizar a redução de respingos de solda, que afetam a segurança e qualidade do processo.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para o procedimento foi utilizado uma pinça de solda robotizada e um eletrodo de cobre com diâmetro de 6 mm, Figura 3a, para garantir a repetitividade do experimento, controlado por um sistema de soldagem Bosch Rexroth.

Os materiais utilizados foram chapas de aço zincado com espessura de 1,2 mm e adesivo estrutural como mostrado na Figura 3b. Como para a indústria o tempo é uma variável que impacta diretamente na produtividade, o tempo de soldagem foi fixado em 400ms e a pressão de soldagem fixada em 300dN.

As variáveis de influência foram:

- a corrente de soldagem;
- a presença ou não de adesivo nas chapas.

As variáveis de resposta foram:

- a presença ou não de expulsões (respingos);
- a energia resultante na junta.

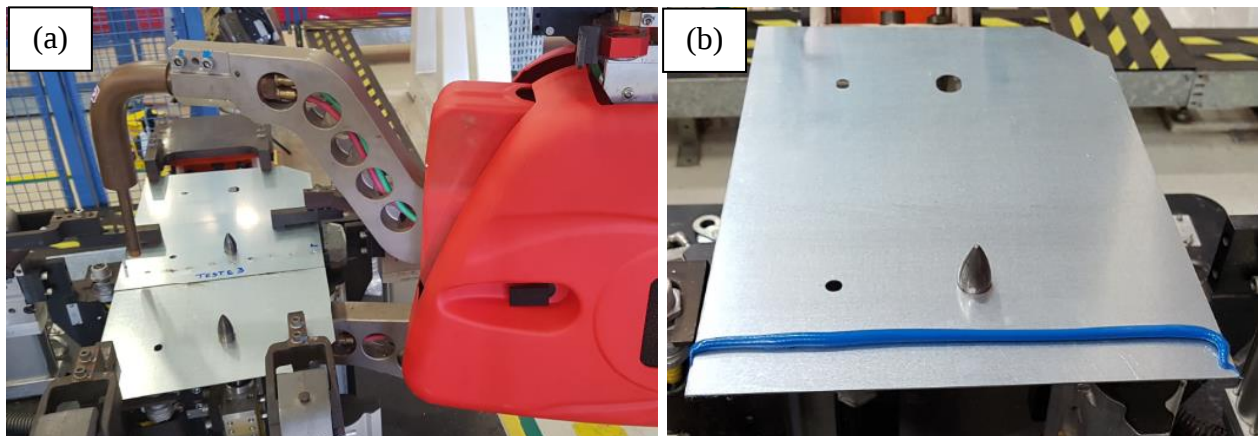


Figura 3. Procedimento experimental. (a) Posicionamento das chapas; (b) disposição do adesivo estrutural

A Figura 4 apresenta a vista superior de chapas soldadas com e sem adesivos, para correntes variando de 5 kA a 9 kA.

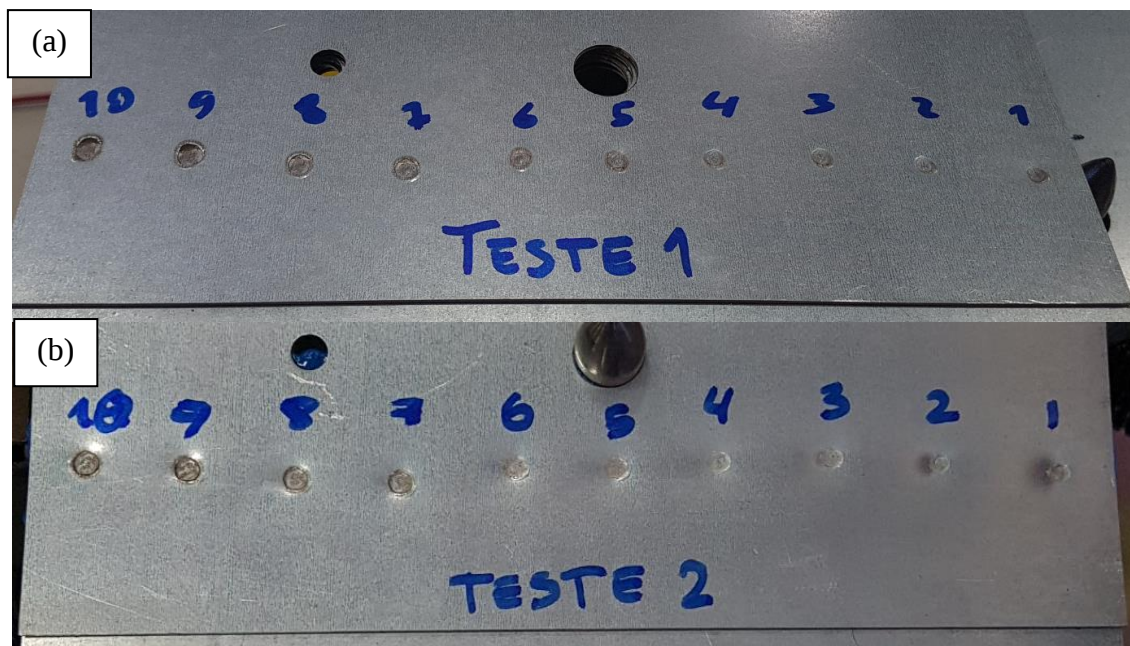


Figura 4. Chapas soldadas com Corrente de 5 kA a 9 kA. (a) sem adesivo; (b) com adesivo.

É possível verificar na Figura 4 que para as amostras iniciais, devido a baixa corrente utilizada, os núcleos não têm uma boa formação, pois a energia resultante é insuficiente. Com o aumento da corrente os pontos começam a exibir uma melhor formação, até o início do aparecimento de respingos superficiais, interfaciais e ponto furado, vistos na Figura 5.

A Figura 5 apresenta a vista superior de chapas soldadas com e sem adesivos, para correntes variando de 10 kA a 12 kA.

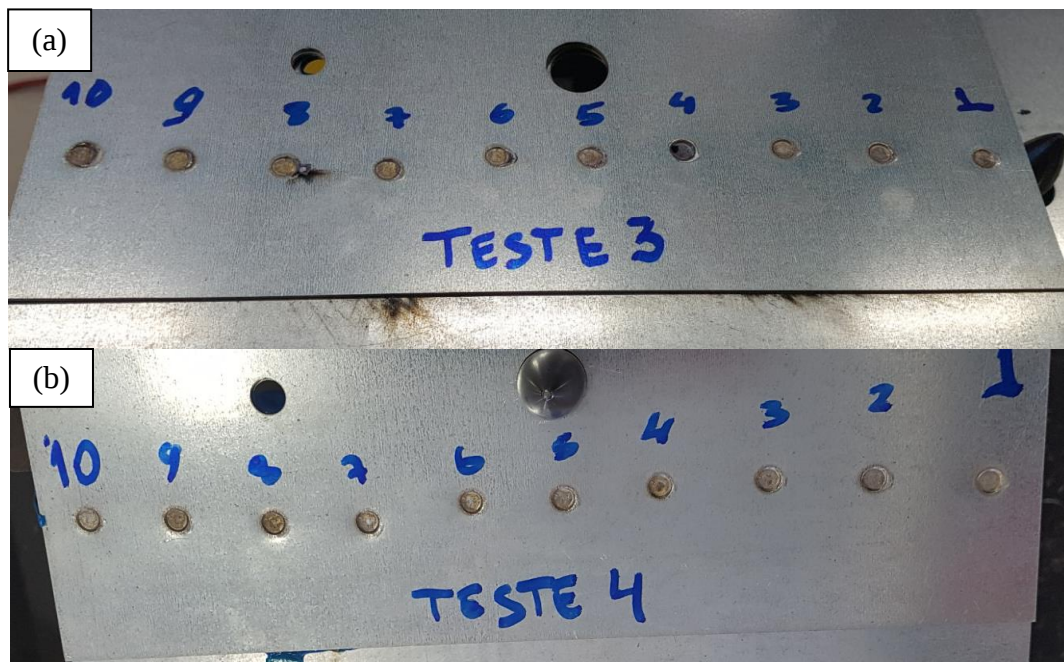


Figura 5. Chapas soldadas com Corrente de 10 kA a 12 kA. (a) sem adesivo; (b) com adesivo.

3. RESULTADO E DISCUSSÃO

As Tabelas 1 e 2 apresentam os ensaios realizados com as respectivas correntes e energias para as chapas com e sem adesivos. Os parâmetros de tempo e pressão são constantes e fixados em 400ms e 300dN respectivamente.

Tabela 1. Amostras utilizando adesivo entre chapas.

	Corrente (kA)	Energia (J)	Respingo
Amostra 1	5	1872,10	Não
Amostra 2	5	1804,06	Não
Amostra 3	6	2462,75	Não
Amostra 4	6	2490,46	Não
Amostra 5	7	3286,23	Não
Amostra 6	7	3324,00	Não
Amostra 7	8	4271,5	Não
Amostra 8	8	4300,22	Não
Amostra 9	9	5135,29	Não
Amostra 10	9	5165,50	Não
Amostra 11	10	5432,65	Não
Amostra 12	10	5466,15	Não
Amostra 13	10	5684,96	Não
Amostra 14	10,5	5790,00	Sim
Amostra 15	11	6074,71	Sim
Amostra 16	11	6082,96	Sim
Amostra 17	11	6222,01	Sim
Amostra 18	11	6115,21	Sim
Amostra 19	12	7033,75	Sim
Amostra 20	12	7039,60	Sim

A análise das Tabelas 1 e 2 mostra que para uma espessura de chapa de 1,2 mm, a presença de respingos só é observada para os níveis de corrente superiores a 10,5 kA com a utilização de adesivo e 11kA sem a utilização de adesivo. É possível verificar também que o adesivo provoca redução da resistência elétrica, que gera menores níveis de energia de soldagem na junta.

Tabela 2. Amostras sem utilização de adesivo entre chapas.

	Corrente (kA)	Energia (J)	Respingo
Amostra 1	5	2175,38	Não
Amostra 2	5	2164,64	Não
Amostra 3	6	2906,71	Não
Amostra 4	6	2847,69	Não
Amostra 5	7	3664,52	Não
Amostra 6	7	3591,85	Não
Amostra 7	8	4436,73	Não
Amostra 8	8	4446,53	Não
Amostra 9	9	5306,89	Não
Amostra 10	9	5318,82	Não
Amostra 11	10	5660,81	Não
Amostra 12	10	5731,23	Não
Amostra 13	10	5621,23	Não
Amostra 14	10,5	6368,96	Não
Amostra 15	11	6357,98	Sim
Amostra 16	11	6227,92	Sim
Amostra 17	11	6357,98	Sim
Amostra 18	11	6227,92	Sim
Amostra 19	12	7002,91	Sim
Amostra 20	12	7114,62	Sim

Para uma melhor visualização os resultados apresentados na Tabela 1 e Tabela 2, são apresentados na forma de gráfico com valores médios na Figura 6.

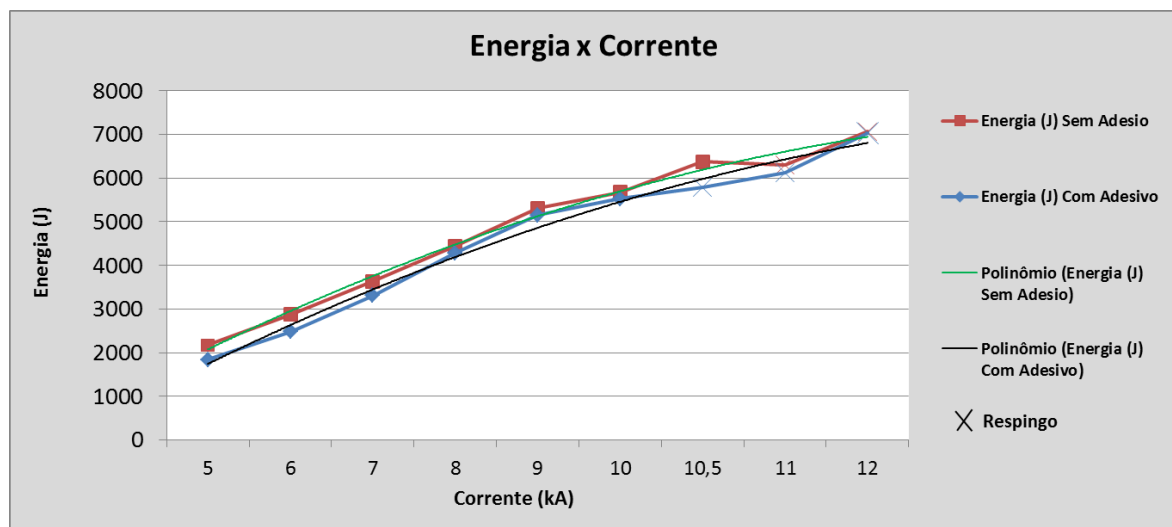


Figura 6. Resultado das amostras com e sem adesivo entre chapas de 5kA a 12kA.

A análise da Figura 6, resultante das Tabelas 1 e 2, permite ratificar graficamente a função quadrática dos níveis de energia resultante que é calculada pelo sistema de maneira infinitesimal $Q = \int_0^t I^2 R dt$. Também é possível verificar que os valores do nível de energia resultante da curva das amostras com adesivo são menores que o das amostras sem adesivo e que a partir de 11 kA tem-se o aparecimento de respingo em todas as amostras.

Para comparar as diferenças de energias observadas na Figura 6, foi confeccionado um gráfico de diferença de energia para cada nível de corrente entre as amostras com adesivo e sem adesivo, mostrado na Figura 7.

Observa-se na Figura 7 que com o aumento da corrente a diferença de energia resultante nas 2 configurações de amostras diminui até que em 12 kA é de praticamente zero. Assim, entende-se pelo gráfico que o adesivo diminui a resistência elétrica da junta em até 6% para corrente de 5 kA chegando a se igualar a condição de solda sem adesivo em níveis elevados de corrente.

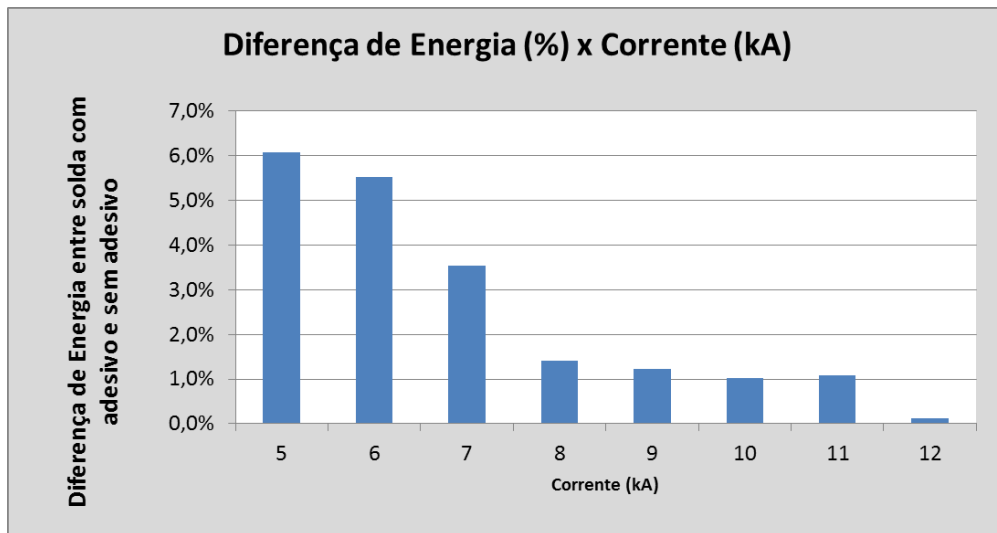


Figura 7. Diferença de energia resultante entre solda com e sem adesivo entre chapas.

As Figuras 8 e 9 apresentam o comportamento da resistência dinâmica versus tempo de soldagem para correntes de 6 kA e 11 kA, respectivamente.

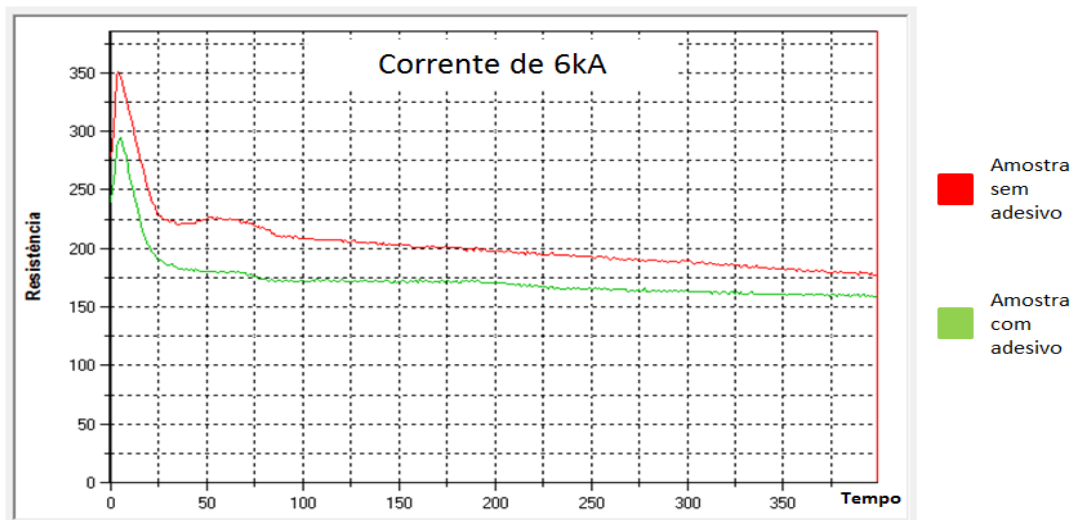


Figura 8. Gráfico de resistência dinâmica gerado para baixa corrente de 6kA.

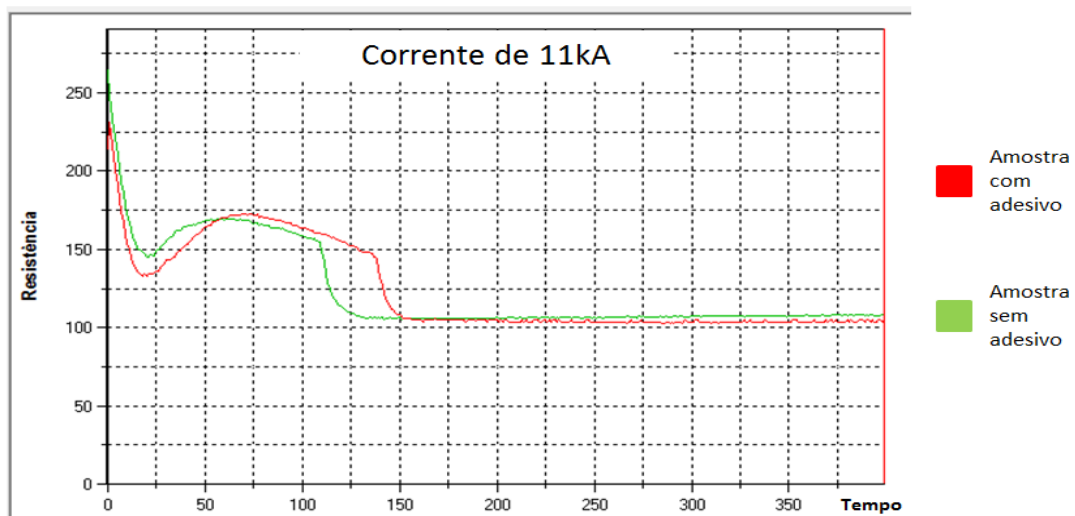


Figura 9. Gráfico de resistência dinâmica gerado para alta corrente de 11kA.

A análise dos gráficos de resistência dinâmica apresentados nas Figuras 8 e 9, gerados pelo software do controlador da pinça, mostra uma mudança de comportamento nas duas configurações propostas em baixa e alta corrente de soldagem. Na Figura 8 verifica-se que a resistência dinâmica é mais baixa para a amostra com adesivo, o que ocasiona uma menor resistência e consequentemente menor geração de energia. No gráfico da Figura 9 é possível observar o momento em que ocorre a queda brusca de resistência, que corresponde ao momento exato da formação do respingo. Para a amostra com adesivo o momento da expulsão ocorreu em 25 ms após a amostra sem adesivo e a resistência final se equivalem, então as energias são equivalentes para alta corrente.

Para uma melhor análise do momento em que ocorrem as expulsões, foram soldadas mais vinte amostras considerando o intervalo de transição do aparecimento de respingos detectado pelas amostras iniciais. A Figura 10 mostra o resultado no intervalo entre 10,2 kA a 11 kA.

As Tabelas 3 e 4 apresentam os valores de corrente de soldagem utilizados, a energia resultante e a presença ou não de respingo.

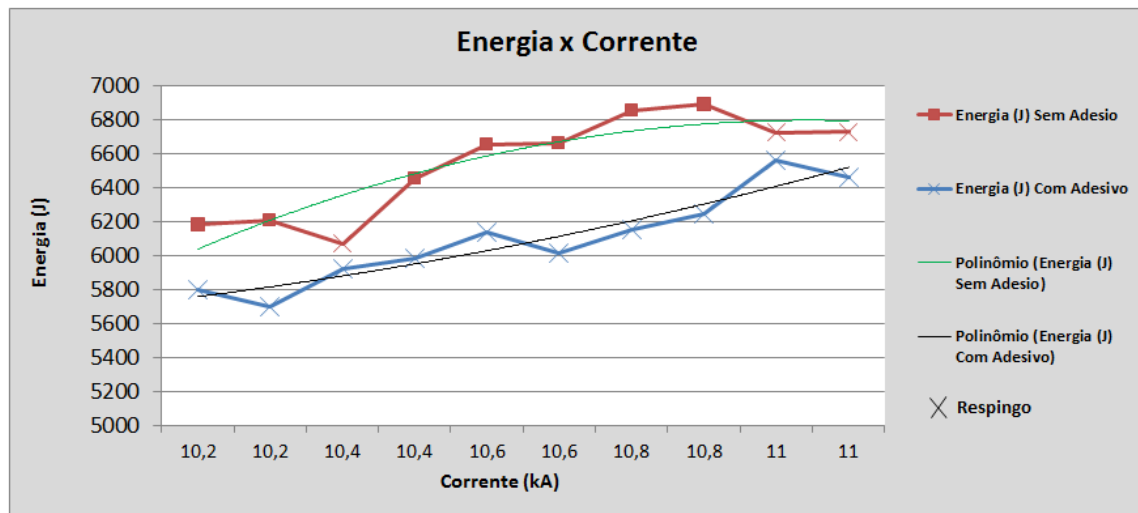


Figura 10. Resultado das amostras com e sem adesivo entre chapas de 5 kA a 12 kA.

Tabela 3 – Amostras utilizando adesivo entre chapas.

	Corrente (kA)	Energia (J)	Respingo
Amostra 1	10,2	6182,56	Não
Amostra 2	10,2	6206,30	Não
Amostra 3	10,4	6069,80	Sim
Amostra 4	10,4	6454,09	Não
Amostra 5	10,6	6650,07	Não
Amostra 6	10,6	6662,76	Não
Amostra 7	10,8	6852,46	Não
Amostra 8	10,8	6891,68	Não
Amostra 9	11,0	6724,34	Sim
Amostra 10	11,0	6727,36	Sim

Tabela 4 – Amostras utilizando adesivo entre chapas.

	Corrente (kA)	Energia (J)	Respingo
Amostra 1	10,2	5796,70	Sim
Amostra 2	10,2	5700,00	Sim
Amostra 3	10,4	5922,80	Sim
Amostra 4	10,4	5982,20	Sim
Amostra 5	10,6	6136,21	Sim
Amostra 6	10,6	6013,66	Sim
Amostra 7	10,8	6149,79	Sim
Amostra 8	10,8	6242,09	Sim
Amostra 9	11,0	6562,77	Sim
Amostra 10	11,0	6458,50	Sim

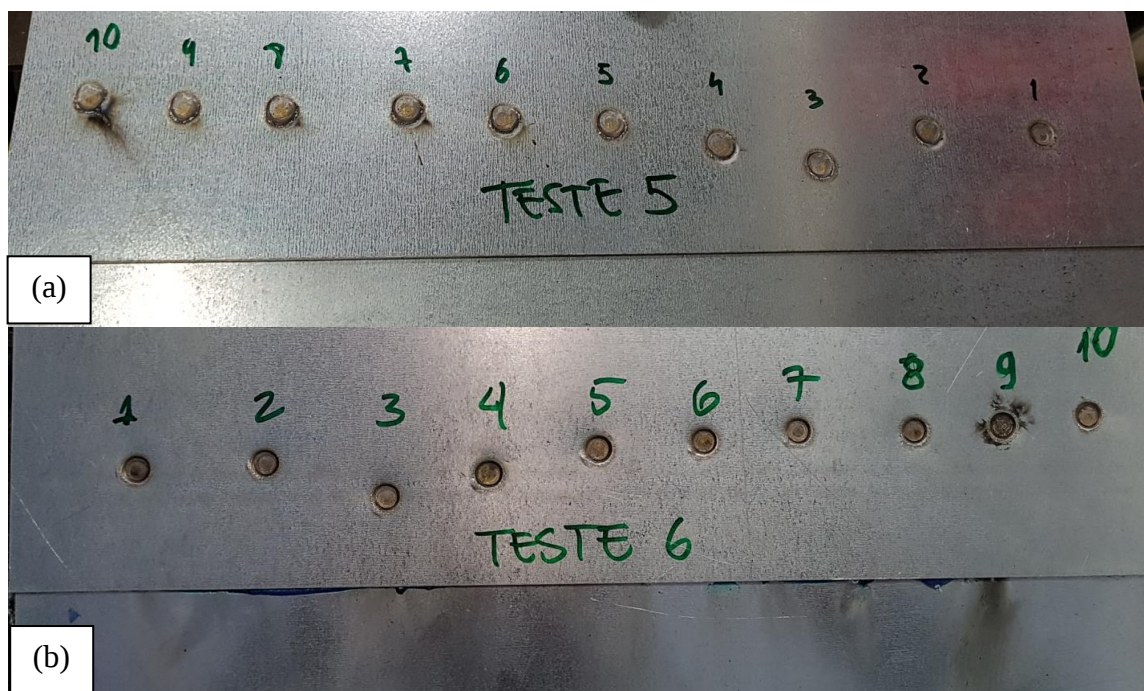


Figura 11. Chapas soldadas com Corrente de 10,2 kA a 11 kA. (a) sem adesivo; (b) com adesivo.

A análise dos resultados observados nas Tabelas 3 e 4, com intervalo de variação de corrente entre 10 kA e 11 kA, permite verificar que o intervalo de aparecimento de respingos acontece de maneira antecipada com a utilização de adesivo estrutural na junta soldada. Apesar de os respingos de solda serem um fenômeno influenciável por muitas variáveis externas e do processo, o aparecimento dos respingos na configuração de chapa utilizada foi antecipado em cerca de 1 kA em relação as juntas que não possuem adesivo. Apenas um respingo ocorreu em um dos pontos com 10,4 kA na amostra sem adesivo, que pode ocorrer devido a fatores externos, pois nos pontos até 10,8 kA não apresentaram respingos.

Na Figura 12 vê-se o fenômeno do respingo de solda, que além de comprometer a segurança, provoca danos qualitativos ao produto e ao processo. Através dos dados coletados neste trabalho é possível otimizar o processo de solda da configuração de junta proposta, ajustando os parâmetros a fim de reduzir a formação de respingos.

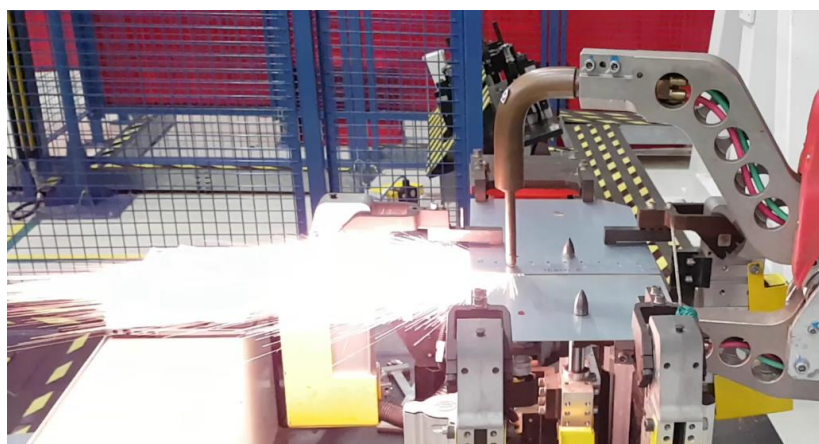


Figura 12. Respingo de solda interfacial.

4. CONCLUSÕES

Os objetivos propostos, a metodologia experimental utilizada e dos resultados obtidos e discutidos nesta pesquisa, permitem concluir que:

- A presença de expulsões (respingos) só é observada em todas as amostras para valores de corrente de soldagem a partir de 11 kA para juntas sem adesivos e acima de 10 kA para juntas com adesivos, considerando valores de força e tempo constantes.

- A energia de soldagem é influenciada pela presença do adesivo para valores de corrente utilizadas nesta pesquisa.
- A influência do adesivo sobre a energia de soldagem diminui com o aumento da corrente.
- A presença do adesivo estrutural tem influência no nível de respingos nas juntas soldadas, também altera ligeiramente as curvas da resistência dinâmica do processo.

5. REFERÊNCIAS

- AWS D8.9M:2012 “Test Methods for Evaluating the Resistance Spot Welding Behavior of Automotive Sheet Steel Materials”, An American National Standard. 3rd Edition, Miami, USA.
- Branco, H. L. O., 2004, “Análise do desgaste de capas de eletrodos de solda ponto e sua influência na qualidade da soldagem de chapas automotivas galvanizadas”, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, 113p.
- Chertov, A. M., Maev, Roman Gr., 2004, “Determination of Resistance Spot Weld quality in Real Time Using Reflected Acoustic Waves”, Comparison with Through-Transmission Mode.” 16^o WCNDT, Montreal.
- Degarmo, E. P.; Black, J. T; Kohser, and R. A., 1988, “Materials and Processes in Manufacturing”, New York: Macmillian Publishing Company, 1988.
- Furlanetto, Valdir; Stocco, Danilo; Batalha, Gilmar F., Szabados, Fernando R., 2012, “Inspection of projection welded automotive nuts through b-scan ultrasonic acoustic imaging”, 18th World Conference on Nondestructive Testing, 16-20, Durban, South Africa.
- Pandey, A. K; Khan, M. I K.; Moeed, M., 2013 “Optimization of Resistance Spot Welding Parameters Using Taguchi Method”, International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST).
- Stocco, Danilo; Maev, Roman Gr.; Chertov, Andriy M.; Batalha; Gilmar F., 2008, “Comparison between in - line ultrasonic monitoring of the spot weld quality and conventional NDT methods applied in a real production environment”, 17th World Conference on Nondestructive Testing, 25-28 Oct 2008, Shanghai, China.
- Zhang, Hongyan; Senkara, Jacek, 2017, “Resistance Welding: Fundamentals and Applications” Second Edition, Ed. London: Taylor & Francis.

6. RESPONSABILIDADE AUTORAL

“Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho”.

OPTIMIZATION OF RESISTANCE WELDING PARAMETERS TO REDUCE SPLASHES IN WELDED JOINTS

Rômulo Borba Vicente, romuloborba@outlook.com¹

José Hilton Ferreira da Silva, jhiltonf@ct.ufpb.br¹

Thiago Domingos de Araújo Lemos, thiago_domingos15@hotmail.com²

¹Universidade Federal da Paraíba, Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Centro de Tecnologia, Bloco “F” - Campus I 58.059-900, João Pessoa-PB, Brasil.

² Universidade de Pernambuco, Rua Benfica, 455 - Madalena - 50.740-410, Recife-PE, Brasil.

Abstract. Resistance Welding is a process that allows a high productivity, does not use addition material and presents an excellent quality in welded joints. Due to its characteristics, it is widely used in the automobiles industry. With the use of high performance steels and structural adhesives in the union of plates, a greater challenge arises in the parameterization of the weld to guarantee the absence of expulsion (welding splash), maintaining the quality of the welded joint. This work aims at the characterization of spot welds and to optimize the reduction of welding expulsion, which affect the safety and quality of the process. In a first step the formation of welding nucleus, splashes and associated parameters such as: time, current, force, resistance and materials are presented. Since welding time is a variable that directly affects the productivity in the industry and the material is a project imposition, this work analyzes the variables current and energy to evaluate the limits of formation of the expulsions in welded joints without the use of structural adhesives and with their use. In order to evaluate the parameters, non-destructive test and energy results of the process of welding of the welded plates were used to determine a better configuration, keeping the process free of expulsions and guaranteeing the necessary mechanical resistance for welded joints.

Keywords: Resistance welding, Splashes, Structural adhesives, Welding parameters, Expulsion.