

11º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

ANÁLISE DA VIABILIDADE E EXEQUIBILIDADE DA SOLDAGEM DE PINOS (STUD WELDING) POR DESCARGA CAPACITIVA EM APLICAÇÕES DO SETOR NAVAL

AUTORES:

Tiago de Siqueira Lima Marchione¹
Álison Fernandes da Rosa¹
Régis Henrique Gonçalves e Silva¹
Leonardo Matos Brasil¹
Lucas Maraschin¹
Ricardo Reppold Marinho²
Giovani Dalpiaz²

INSTITUIÇÃO:

¹Universidade Federal de Santa Catarina/CTC/EMC/LABSOLDA

²PETROBRAS/CENPES/PDIDP/TIA/TMI

ANÁLISE DA VIABILIDADE E EXEQUIBILIDADE DA SOLDAGEM DE PINOS (STUD WELDING) POR DESCARGA CAPACITIVA EM APLICAÇÕES DO SETOR NAVAL

Resumo

O processo de soldagem de pinos (*Stud Welding* - SW) foi desenvolvido e empregado pela Marinha dos EUA durante a Segunda Guerra Mundial, na fixação e instalação de decks de madeira em navios e submarinos. Sem o SW, este serviço demandava muitas horas de mão-de-obra, incluindo atividades como perfuração, para a instalação dos parafusos passantes, além da instalação de andaimes para a acomodação das porcas nos parafusos roscados. Ainda, muitas vezes, as porcas eram soldadas para que não se soltassem devido à vibração. Nos tempos hodiernos, a tecnologia SW é amplamente utilizada em diversas aplicações da indústria na busca incessante pelo melhoramento da produtividade na fixação de elementos mecânicos por soldagem, como na soldagem de componentes nos setores de construção naval, construção civil e automotivo. No contexto de aplicações do setor *offshore*, foram identificadas demandas como restrição no verso da chapa ou estrutura metálica, seja por dificuldade de acesso, seja por limitação de aporte térmico devido ao acabamento do seu verso, como pinturas ou isolamentos térmicos e acústico, ou até mesmo, hidrocarbonetos armazenados em tanques, que possuem característica altamente volátil e inflamável. Tais demandas podem ser supridas e satisfeitas com o processo SW, que possui diferentes variações em função da tecnologia empregada na geração do arco elétrico: descarga capacitiva e arco retraído. Neste contexto, o objetivo do presente estudo é avaliar de forma preliminar a viabilidade e exequibilidade de soldagem de pinos roscados de 8 mm de diâmetro em chapas maiores que 10 mm de espessura utilizando o processo SW por descarga capacitiva, soldados na posição plana. O estudo verificou a temperatura máxima e a evolução do comportamento térmico no verso de chapas, por meio da aquisição por sensores termopares, obtidas por um sistema portátil de aquisição de temperaturas. Os resultados sugerem que o uso do processo SW por descarga capacitiva, que apresentou temperatura inferior devido ao menor tempo de exposição ao calor do arco elétrico, se comparado com o processo SW por arco retraído, minimizam sobremaneira os potenciais riscos para os componentes e materiais que permanecem no verso da chapas e estruturas.

Palavras-chave: Soldagem *Offshore*, Descarga Capacitiva, Soldagem de Pinos.

Abstract

The Stud Welding (SW) process was developed and employed by the US Navy during World War II for fastening and installing wooden decks on ships and submarines. Without SW, this service required many man-hours, including activities such as drilling to install through bolts, and scaffolding to accommodate the nuts on the threaded bolts. In addition, the nuts were often welded to keep them from coming loose due to vibration. Nowadays, SW technology is widely used in various industry applications in the never ending search for productivity improvement in the welding of mechanical fasteners, such as welding components in the shipbuilding, construction, and automotive industries. In the context of offshore applications, demands have been identified as restrictions on the back of the plate

or metallic structure, either because of difficult access, or because of thermal contribution limitation due to the finishing of its back, such as painting or thermal and acoustic insulation, or even hydrocarbons stored in tanks, which have a highly volatile and flammable characteristic. Such demands can be met and satisfied with the SW process, which has different variations depending on the technology employed in the generation of the electric arc: capacitor discharge and drawn arc. In this context, the objective of this study is to preliminarily evaluate the viability and feasibility of welding threaded studs of 8 mm diameter in plates larger than 10 mm thick using the SW process by capacitive discharge, welded in the flat position. The study verified the maximum temperature and the evolution of the thermal behavior on the backside of plates by means of thermocouple sensor acquisition, obtained by a portable temperature acquisition system. The results suggest that the use of the capacitor discharge SW process, which presented lower temperature due to less exposure time to the arc heat, compared to the drawn arc SW process, greatly minimize the potential risks to components and materials that remain on the back of the plates and structures.

Keywords: Offshore Welding, Capacitor Discharge, Stud Welding.

Introdução

O processo de soldagem de pinos (Stud Welding – SW) remonta da década de 1930 e foi desenvolvido por Edward Ted Nelson em um estaleiro da Marinha dos Estados Unidos. Foi utilizado para fixação de deck de madeira sobre uma superfície metálica na construção (PIRES, 2005). Essa fixação era feita, até então, utilizando-se parafusos passantes, o que exigia a montagem de muitos andaimes para permitir a instalação de porcas nos parafusos, prendendo assim a madeira à estrutura de aço (STANLEY, 2019). Adicionalmente, era comum as porcas serem soldadas para evitar que folgassem e se soltassem com a vibração dos navios. O processo SW eliminou a necessidade de acesso com andaimes por baixo dos decks de madeira, reduzindo drasticamente o tempo envolvido na instalação dos decks. De suma importância durante a construção e reparos de navios, estima-se que a implementação do processo SW economizou cerca de 50 milhões de homens-horas para a Marinha dos Estados Unidos durante a instalação de decks de madeira em submarinos, navios e porta-aviões (STANLEY, 2019).

Desde a sua criação, há quase 1 século, é possível observar a grande variedade de aplicação do processo SW. De acordo com Pires (2005) e Chambers (2001), o processo SW se tornou popular e é amplamente utilizado na indústria de construção naval e construção civil. Além desses setores, Ramasamy (2002) desenvolve estudo para utilização do processo SW na soldagem de pinos de alumínio na indústria automobilística, visando a redução da poluição atmosférica ao ser utilizado material mais leve. Ainda segundo Chambers (2001), mais de 1 milhão de soldas de pinos são feitas por ano em todo o mundo.

Tendo em vista a tecnologia empregada na geração do arco elétrico, pode-se destacar diferentes variações deste processo de soldagem, como o arco retraído e a descarga capacitiva. No processo SW por arco retraído, ao ser acionado o gatilho da pistola de soldagem, o pino é elevado e o arco é estabelecido, ocorrendo a fusão do material do pino e do metal de base. Após o tempo de arco aberto pré-selecionado na fonte de soldagem, o pino é empurrado pela mola contra o metal de base, ocorrendo a soldagem do pino. Já no processo SW por descarga capacitiva, ao ser acionado o gatilho da pistola de soldagem, a energia armazenada no banco de capacitores é descarregada rapidamente, entre 1 e 3 ms.

Existe uma demanda na indústria offshore para fixação de componentes mecânicos por processos de soldagem que possuam uma redução da energia de soldagem imposta pelo processo, justificada pelo risco de degradação e até mesmo de explosão que este aporte térmico possa ocasionar aos materiais contidos no verso da estrutura metálica em que o componente será soldado, que pode ser um revestimento de tinta ou isolante térmico ou acústico, ou até mesmo um tanque de hidrocarboneto, sendo este último mais crítico por apresentar características altamente volátil e inflamável. Outro fator extremamente relevante na indústria naval é a dificuldade de acesso aos diversos compartimentos de uma embarcação, tanto na fase de construção como na fase de manutenção.

Tais demandas de aporte térmico e acesso podem ser supridas pelo processo SW, mesmo tendo correntes de soldagem elevadas, o tempo de soldagem é relativamente baixo se comparado com outros processos de soldagem, podendo chegar até 1 segundo de tempo de arco (NISHIKAWA, 2003). Nesse sentido, Rosa et al (2022) apresenta estudos realizados com chapas de aço carbono de 12,7 mm de espessura, em que a temperatura medida no verso da chapa ao soldar um pino M10 foi de 105°C.

Um conceito difundido é que a soldagem de pinos por descarga capacitiva só é exequível, em termos de qualidade, soldabilidade e aceitabilidade, utilizando-se pinos com diâmetros até 10 mm em chapas finas. Outrossim, há carência de literatura técnica que apresente um valor máximo de espessura de chapa que se possa soldar com descarga capacitiva. Cary (1995) se limita a mencionar que o processo SW por descarga capacitiva pode ser usado para soldar pinos em chapas finas, sem mencionar quais seriam os limites máximo e mínimo de espessura em função do diâmetro do pino.

Neste contexto, foi investigado primeiramente o comportamento térmico da soldagem de pinos utilizando o processo SW por descarga capacitiva. Posteriormente, foi feita uma avaliação quanto a viabilidade e exequibilidade da soldagem de pinos roscados de 8mm de diâmetro em chapas de maior espessura, também utilizando o processo SW por descarga capacitiva, de modo que se possa suprir essa carência na literatura utilizando-se soldagem de pinos em chapas de maior espessura.

Metodologia

De modo a obter informações de temperatura utilizando-se o processo SW por descarga capacitiva, foram realizados experimentos utilizando pinos roscados de 10 mm de diâmetro (M10) soldados em chapas de aço carbono ASTM A36 de diferentes espessuras (2,0 mm, 2,6 mm, 3,2 mm e 6,4 mm), na posição vertical de soldagem.

Para as medições de temperaturas no verso das chapas, foram utilizados sensores termopares tipo K, e o objetivo principal foi obter as curvas do comportamento térmico do processo para cada espessura de chapa supracitada através de um sistema de aquisição de temperaturas portátil IMC/SAT. Com as curvas térmicas, foi possível extrair o valor da temperatura máxima atingida, bem como o tempo de resfriamento das chapas.

Após a obtenção das curvas térmicas, buscou-se verificar a exequibilidade e viabilidade da soldagem de pinos M8 utilizando-se o processo SW por descarga capacitiva em chapas de aço carbono ASTM A36 de 12,7mm e 63,5 mm de espessura. A norma AWS D1.1/D1.1M:2020 prevê a realização de 10 testes de dobramento, torque ou tração para a qualificação do procedimento de soldagem. Nesse

estudo, foram realizados testes de dobramento e de torque. Para o teste de torque, foi utilizado um torquímetro de estalo RAVEN/100200.

A tabela 1 apresenta a composição química das chapas utilizadas nos experimentos.

Tabela 1 – Composição química das chapas utilizadas nos testes com pinos M10

C (%)	Cu (%)	Cr (%)	Mn (%)	Mo (%)	Ni (%)	P (%)	S (%)	Si (%)	V (%)
0,18	0,17	0,16	0,68	0,02	0,07	0,011	0,016	0,20	0,003

Fonte: GERDAU, 2021

A fonte de soldagem utilizada em todos os experimentos foi uma SOYER/BMS-10N, equipada com uma pistola de soldagem de pinos SOYER/PS-3K. É importante mencionar que a tensão de carga do banco de capacitores é regulada na fonte de soldagem. Já na pistola, é possível regular a protrusão do pino, que é a distância em que pino fica disparada para fora da pinça, além do ajuste da pressão da mola. O processo SW por descarga capacitiva sem gap, também denominada de descarga capacitiva por contato inicial, ou seja, não há a elevação do pino antes da abertura do arco. Os principais parâmetros de soldagem utilizados nos experimentos que possuem relevância para este estudo estão descritos na tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros de soldagem utilizados

Pino	Tensão de Carga (V)	Protrusão do pino (mm)	Ajuste de Pressão da Mola
M8	150	1,5	Médio
M10	180	1,5	Médio

Resultados e Discussão

As aquisições de temperaturas feitas pelo sistema de aquisição de temperaturas portátil nas diferentes espessuras de chapas na soldagem de pinos M10 foram plotados na forma de gráfico em função do tempo e estão apresentados na Figura 1.

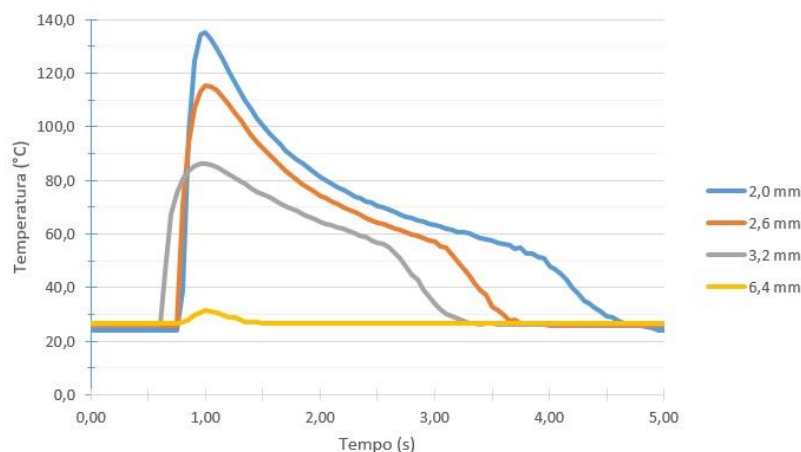


Figura 1 – Ciclo térmico para soldagem de pinos M10 com processo SW por descarga capacitiva em chapas de diferentes espessuras

É possível verificar que a temperatura mais alta atingida no verso da chapa foi maior para a chapa de 2 mm de espessura, atingindo a temperatura máxima de 135°C. Para as chapas de 2,6 mm, 3,2 mm e 6,4 mm de espessura, as temperaturas máximas atingidas no verso da chapa foram de 115°C, 87°C e 32°C, respectivamente. Além disto, com as curvas térmicas plotadas, foi possível realizar uma comparação com os resultados obtidos por Rosa et al (2022) na soldagem de pinos M10 com o processo SW por arco retraído. No presente estudo, a temperatura no verso da chapa ao se utilizar o processo SW por descarga capacitiva atinge patamares de 100°C para chapas de aproximadamente 3 mm de espessura, como pode ser visto no gráfico apresentado na Figura 1. Já utilizando o processo SW por arco retraído, Rosa et al (2022) obteve o mesmo patamar de temperatura de 100°C atingida no verso da chapa, só que para uma chapa quatro vezes mais espessa (12,7 mm).

Outro fator relevante que é possível comparar é o tempo de resfriamento. Ainda segundo Rosa et al (2022), a soldagem de pinos M10 utilizando o processo SW por arco retraído só permite o manuseio completo das peças pelo operador, sem a necessidade de proteção como luvas antitérmicas, somente 60 segundos após a soldagem, em que a temperatura atinge patamar próximo a temperatura ambiente. Já no processo por descarga capacitiva, é possível verificar que a temperatura da chapa já atinge a temperatura ambiente em menos de 5 segundos após a soldagem.

Após a medição de temperatura no verso das chapas com diferentes espessuras, foi realizado a soldagem de pinos M8 utilizando-se o processo SW por descarga capacitiva em chapas de aço carbono ASTM A131 AH36 de 12,7 mm e 63,5 mm de espessura. O objetivo destes experimentos foi de suprir a carência de informações na literatura de soldagem de pinos utilizando o processo SW por descarga capacitiva em chapas mais espessas.

Assim sendo, foi realizada a soldagem de 20 pinos M8 para descarga capacitiva em uma chapa de 12,7mm de espessura, que foram submetidos a ensaios para qualificação do procedimento de soldagem, sendo 10 deles submetidos ao teste de torque e os outros 10 submetidos ao teste de dobramento. Os testes foram realizados conforme preconizado na norma AWS D1.1/D1.1M:2020, que exige que os testes sejam realizados até a falha/ruptura, sendo o procedimento considerado aprovado e qualificado desde que esta falha/ruptura não ocorra na região da solda. A Figura 2a ilustra em vista superior e a Figura 2b em vista lateral os 20 pinos M8 após terem sido submetidos aos testes supramencionados e a Tabela 3 mostra os resultados dos testes em cada pino.



Figura 2 – Pinos M8 soldados na chapa de 12,7 mm de espessura após os testes de dobramento e de torque.
(a) vista superior (b) vista lateral.

Tabela 3 – Resultados dos Testes de Dobramento e Torque de pinos M8 soldados na chapa de 12,7 mm

Pinos	Teste de Dobramento		Teste de Torque		
	Local da falha	Resultado	Torque máximo sem falha (N.m)	Local da falha	Resultado
Pino 1	Pino	Aprovado	-	-	-
Pino 2	Pino	Aprovado	-	-	-
Pino 3	Pino	Aprovado	-	-	-
Pino 4	Pino	Aprovado	-	-	-
Pino 5	Pino	Aprovado	-	-	-
Pino 6	Pino	Aprovado	-	-	-
Pino 7	Pino	Aprovado	-	-	-
Pino 8	Pino	Aprovado	-	-	-
Pino 9	Pino	Aprovado	-	-	-
Pino 10	Pino	Aprovado	-	-	-
Pino 11	-	-	29	Pino	Aprovado
Pino 12	-	-	28	Pino	Aprovado
Pino 13	-	-	28	Pino	Aprovado
Pino 14	-	-	30	Pino	Aprovado
Pino 15	-	-	30	Pino	Aprovado
Pino 16	-	-	30	Pino	Aprovado
Pino 17	-	-	31	Pino	Aprovado
Pino 18	-	-	30	Pino	Aprovado
Pino 19	-	-	30	Pino	Aprovado
Pino 20	-	-	32	Pino	Aprovado

Para verificar se o mesmo procedimento de soldagem seria também viável e exequível em uma chapa ainda mais espessa, devido à aplicabilidade no setor naval/offshore, o mesmo ensaio foi realizado utilizando os mesmos parâmetros de soldagem em uma chapa de aço ASTM A36 de 63,5 mm. Para essa espessura de chapa, o procedimento de soldagem também foi aprovado, não havendo ruptura na região da solda, e sim na região do pino. A Figura 3 ilustra os 20 pinos M8, soldados na chapa de 63,5 mm de espessura, após terem sido submetidos aos testes e a Tabela 4 mostra os resultados dos testes submetidos em cada pino.

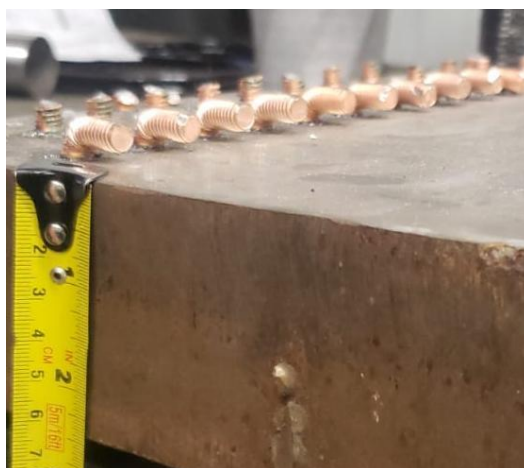


Figura 3 – Pinos M8 soldados na chapa de 63,5 mm de espessura após os testes de dobramento e de torque.

Tabela 4 – Resultados dos Testes de Dobramento e Torque de pinos M8 soldados na chapa de 63,5mm

Pinos	Teste de Dobramento		Teste de Torque		
	Local da falha	Resultado	Torque máximo sem falha (N.m)	Local da falha	Resultado
Pino 1	Pino	Aprovado	-	-	-
Pino 2	Pino	Aprovado	-	-	-
Pino 3	Pino	Aprovado	-	-	-
Pino 4	Pino	Aprovado	-	-	-
Pino 5	Pino	Aprovado	-	-	-
Pino 6	Pino	Aprovado	-	-	-
Pino 7	Pino	Aprovado	-	-	-
Pino 8	Pino	Aprovado	-	-	-
Pino 9	Pino	Aprovado	-	-	-
Pino 10	Pino	Aprovado	-	-	-
Pino 11	-	-	26	Pino	Aprovado
Pino 12	-	-	28	Pino	Aprovado
Pino 13	-	-	26	Pino	Aprovado
Pino 14	-	-	28	Pino	Aprovado
Pino 15	-	-	30	Pino	Aprovado
Pino 16	-	-	28	Pino	Aprovado
Pino 17	-	-	28	Pino	Aprovado
Pino 18	-	-	29	Pino	Aprovado
Pino 19	-	-	31	Pino	Aprovado
Pino 20	-	-	31	Pino	Aprovado

Conclusões

Os experimentos constataram, por meio da medição de temperatura no verso da chapa, que o aporte térmico para o processo SW por descarga capacitiva é inferior quando comparado com o processo SW por arco retraído, conforme apresentado em outros estudos (ROSA et al., 2022). Essa característica já era esperada, uma vez que o tempo de soldagem (arco aberto) no processo SW por descarga capacitiva é muito inferior, quando comparado com o processo SW por arco retraído.

De forma geral, a temperatura máxima em torno de 100°C atingida no verso da chapa para o processo SW por arco retraído ocorreu na chapa de espessura de 12,7mm. Quando comparada com o processo SW por descarga capacitiva, este mesmo patamar de temperatura foi atingido no verso da chapa 4 vezes menos espessa, com aproximadamente 3 mm de espessura, corroborando para o aporte térmico inferior, e desta forma, contribuindo sobremaneira para a minimização dos potenciais riscos para os componentes e materiais que permanecem no verso da chapas e estruturas.

Embora a literatura encontrada não mencione uma espessura máxima para o metal de base que seja recomendado efetuar a soldagem utilizando o processo SW por descarga capacitiva, a experiência prática tem mostrado apenas aplicações do referido processo em chapas finas. Desta forma, os resultados apresentados no presente estudo sugerem que a utilização deste processo de soldagem é viável e exequível, sendo aprovado na qualificação conforme preconizado em norma técnica, mesmo para chapas de maior espessura (acima de 10 mm, por exemplo).

Dentre várias possíveis aplicações na indústria offshore/naval da utilização do processo SW por descarga capacitiva é para a soldagem de pinos para aterramento em flanges de tubulações, em que o material de base é mais espesso. Outro fator relevante para o processo SW por descarga capacitiva é referente equipamento é mais enxuto e requer menos parâmetros de regulação pelo operador.

Ainda assim, mesmo com os resultados preliminares promissores obtidos com o processo SW por descarga capacitiva, entende-se que é indispensável estudos mais aprofundados no que tange a aplicabilidade de soldas efetuadas com o referido processo em chapas mais espessas, e até mesmo para maiores diâmetros de pinos, visando atender as altas demandas do setor *offshore*/naval.

Agradecimentos

Os autores agradecem a todos os membros da equipe do Instituto de Soldagem e Mecatrônica (LABSOLDA) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), pelo suporte, orientação e discussões. Agradecem também aos organismos brasileiros de fomento à pesquisa, por meio da Fundação de Amparo à Pesquisa e Extensão Universitária (FAPEU) e da PETROBRAS, através do Termo de Cooperação nº 0050.0117882.21.9, pelo apoio financeiro e pelas bolsas de pesquisa.

Referências Bibliográficas

PIRES, J. N.; LOUREIRO, A.; BOLMSJÖ, G. **Welding Robots: technology, system issues and applications**. 1 ed. Springer, 2005.

Problem-Solving Was Ted Nelson's First Love. Stanley Engineered Fastening, 2019. Disponível em: <https://www.stanleyengineeredfastening.com/en/News-and-Stories/Problem-Solving-Was-Ted-Nelson-First-Love>. Acesso em 15 de agosto de 2022.

CHAMBERS, H.A. **Principles and Practices of Stud Welding**. Pci Journal. Elyria, Ohio, 2001.

RAMASAMY, S. **Drawn arc aluminum stud welding for automotive applications**. JOM 54, 44–46 (2002). Disponível em: <https://doi.org/10.1007/BF02711866>.

NISHIKAWA, W. **The principle and application field of stud welding**. Welding International 17, 699–705 (2003). Disponível em: <https://doi.org/10.1533/wint.2003.3170>.

ROSA, A. F.; BATISTA, F.; BRASIL, L. M.; ZANINI, J. B.; SILVA, R. H. G. **Preliminary Characterization of the Thermal and Electrical Behavior of Stud Welding**. In: Proceedings ABCM - CREEM 2022, RS/Brazil.

CARY, H. B. **Arc Welding Automation**. New York: Marcel Dekker, Inc, 1995.

GERDAU. **Certificado de Qualidade nº 8132313755/000010**. Gerdau, 2021.

AMERICAN WELDING SOCIETY. **AWS D1.1/D1.1M:2020: Structural Welding Code - Steel**. 24 ed. Miami, 2020.