

Efeito dos parâmetros de soldagem sobre a microestrutura e a resistência à tração de juntas de pino m6 com chapa hot stamping utilizando o processo stud welding

L. S. Porto¹, T. M. Maciel²

1- Universidade Federal de Campina Grande, Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais (UAEMa)

2 - Universidade Federal de Campina Grande, Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica (UAEM)

(Recebido em 22-02-19; aceito em 09-04-19)

leonardo.porto@fcagroup.com

(Todas as informações contidas neste artigo são de responsabilidade dos autores)

Resumo:

A seleção adequada dos materiais e parâmetros de processo são fatores que tem influenciam na qualidade do conjunto soldado de Pinos pelo processo Arc Stud Welding (SW). Neste trabalho teve por objetivo avaliar a qualidade da solda sob diferentes combinações de parâmetros de soldagem entre Pinos Tuckers e chapa Hot Stamping utilizando o processo Arc Stud Welding. As soldas foram avaliadas por microscopia e ensaios de resistência à tração. Por microscopia foi verificado a variação de microestrutura na região soldada e que poros se formam na região de fusão da solda, atuando como concentrador de tensão. A penetração da solda e a resistência mecânica foram influenciadas pelos parâmetros de processo, principalmente pela corrente. Foi verificado que para obter menor área porosa, maior penetração e resistência à tração, é preciso que os valores dos parâmetros de processo estejam com tempo de 34ms, lift de 1,2mm e corrente de 820A.

Palavras-chave: Pino tucker, hot stamping, processo stud arc welding

Abstract:

The appropriate selection of materials and process parameters are factors that influence the quality of the welded pin assembly by the ARC Stud Welding (SW) process. The aim of this work is to evaluate the weld quality under different combinations of welding parameters between Tuckers Pins and Hot Stamping plate using the Arc Stud Welding process. The weld were evaluated by microscopy and tensile strength tests. By microscopy it was verified the microstructure variation in the welded region and which pores were formed in the melting region of the weld, acting as a tension concentrator. The penetration of the weld and the mechanical resistance were influenced by the process parameters, mainly by the current. It was verified that to obtain lower porous area, greater penetration and tensile strength, it is necessary that the values of the process parameters are with time of 34ms, lift of 1,2mm and current of 820A.

Keywords: Tucker pin, hot Stamping, stud arc welding process

Introdução

A soldagem à arco elétrico de Pinos Tuckers (Arc Stud Welding - SW) tem sido amplamente utilizada na indústria automotiva. Este processo é realizado através da criação de um arco elétrico entre a extremidade do pino e a peça a ser soldada, iniciando o processo de superaquecimento e fusão parcial das áreas a serem soldadas e, em seguida, o contato entre ambas por uma leve pressão. O que garante o processo de união entre as peças.

O ciclo de soldagem em milisegundo, simplicidade no uso do equipamento, eficiência de custos e a qualidade do produto final vêm chamando atenção dos especialistas de diversas áreas [1]. É um processo caracterizado por soldar pinos em chapas de espessura a partir de 0,6mm, inclusive chapas de ultra-alta resistência, como é o caso das chapas estampadas à quente, também denominada hot stamping [2]. Estas

chapas são caracterizadas por apresentarem microestrutura composta por martensita, entretanto apresentando elevada resistência mecânica durante impacto. Na indústria automobilística, sua aplicação está diretamente relacionada à confecção de partes estruturais dos veículos, trazendo consigo o conceito de segurança aos passageiros e sustentabilidade através da redução de peso da carroceria [3].

A resistência e qualidade das soldas entre os Pinos Tuckers e as chapas hot stamping vão depender de inúmeros fatores, dentre eles a seleção adequada dos parâmetros do processo de soldagem. Este trabalho tem como objetivo, otimizar os parâmetros de soldagem entre Pinos Tuckers e chapas hot stamping utilizando diferentes combinações de processo.

Materiais e métodos

Nesta pesquisa foram utilizados os seguintes materiais:

- Chapas Hot Stamping de Ultra Alta Resistencia - fornecidas com as seguintes propriedades mecânicas: limite de resistência à tração 1300 a 1650 MPa, limite de escoamento 950 a 1250 MPa e alongamento $\geq 6\%$. Dureza de núcleo com valores compreendido de 400 a 500HV, e dureza superficial de 41 a 49HRC. Composição química composta de aproximadamente de 0,26%C, 1,4%Mn, e 0,4%Si, com microestrutura composta por martensita revenida. Apresenta camada superficial revestida a base de AISi, com espessura nominal variando entre 30 a 50 μm [4].

- Pino de aço 1006 (nome comercial CB4FF KD – com diâmetro nominal de 6mm, Pino M6) fornecido com percentual de carbono $\leq 0,06\%$, Manganês 0,20 a 0,40%, silício $\leq 0,10\%$, com dureza máxima de 68HRB [5].

O processo de soldagem utilizado foi o Stud Welding com pistola de solda manual Modelo DCE 1500 Tucker. Os seguintes parâmetros de soldagem foram variados: Tempo, Corrente e distância entre o Pino Tucker e a Chapa a ser soldada (Lift) utilizando as combinações e valores apresentados na Tabela I.

Tabela I – Valores de corrente, tempo e lift usadas para definir as combinações.

Nível	Parâmetros de processo		
	Corrente (A)	Tempo (ms)	Lift (mm)
1	680	26	0.6
2	820	34	1.2

Para realizar estas combinações de processo e análise dos resultados, foi utilizado o Software Minitab, aplicando a metodologia de planejamento de experimentos do tipo fatorial com 2 níveis para cada um dos 3 fatores, 23. Foi realizada uma replica dos experimentos para analisar a variabilidade do experimento, resultando em 16 amostras, apresentadas na Tabela II.

As amostras de chapas e pinos foram caracterizadas separadamente antes do processo de solda. Foram analisadas as propriedades mecânicas de resistência à tração, dureza, microestrutura e espessura da camada de AISi que reveste a chapa. Após as soldagens utilizando-se as combinações apresentadas, as amostras foram submetidas as análises micrográficas e ensaios mecânicos de tração. Para verificar a fusão da solda e a presença de possíveis trincas e/ou porosidade foi utilizada a técnica metalográfica convencional de preparação de amostras (corte no sentido longitudinal do parafuso, seguido de embutimento, lixamento e polimento), com ataque de nital 4%.

As amostras foram analisadas no microscópio ótico Leica S8AP0 acoplado a câmera MC170 HD, software LAS V4.5 com lentes de ampliação de 10 a 80X. A penetração da solda foi medida tomando como base uma linha traçada na superfície da chapa até o final da região composta por uma microestrutura colunar,

localizada entre a ZTA do Pino e da Chapa, onde também é notado a presença de poros. A porosidade foi analisada (por área) através da mesma seção/corte aplicada para análise da penetração da solda.

Tabela II – Combinações dos parâmetros de soldagem utilizadas.

Ordem	Corrente (A)	Tempo (ms)	Lift (mm)
1	680	34	1.2
2	680	34	1.2
3	680	34	0.6
4	820	34	0.6
5	680	26	1.2
6	820	34	1.2
7	680	26	0.6
8	680	26	1.2
9	820	34	1.2
10	820	34	0.6
11	680	26	0.6
12	820	26	0.6
13	820	26	1.2
14	680	34	0.6
15	820	26	1.2
16	820	26	0.6

Para medir a espessura da camada de revestimento da chapa (AISi) e identificação da microestrutura formada no conjunto soldado, foi utilizado o microscópio ótico em modo de reflexão Modelo AX10 Imager A2m, Zeiss, com ampliação de 10 a 1000X acoplado a uma estação de captura e de Imagens com Software Axivision.

Os ensaios mecânicos de tração foram realizados em máquina universal de ensaios, Modelo Galdabini, célula de carga com capacidade de 200kN. Os ensaios foram utilizados para avaliar as propriedades mecânicas da chapa Hot Stamping e a resistência à tração dos corpos de prova soldados. Foi utilizado velocidade de ensaio de 1,2mm/minuto para os conjuntos soldados, que devem suportar força superior a 4200N para o completo destaque entre a chapa e o pino [6]. Para os corpos de prova da chapa, foi aplicando uma combinação de velocidades, com 1,2mm/minuto no regime elástico e 15mm/minuto no regime plástico [7].

Para análise de dureza do Pino Tucker e da chapa hot stamping, foi utilizado um Durômetro Universal Modelo Duravision Emcotest. O Pino foi analisado através do método de dureza Rockwell B, utilizando penetrador esférico de 1.58mm, pré-carga de 98.07N e carga principal de 980.7N. A chapa foi analisada através dos métodos de dureza Rockwell C com penetrador tipo cone de diamante, pré-carga de 98.07N e carga principal de 1.471kN [8]. A Dureza Vickers foi medida com penetrador de 136°, aplicando-se carga de 98,07N [9]. As medições foram realizadas

Efeito dos parâmetros de soldagem sobre a microestrutura e a resistência à tração de juntas de pino m6 com chapa hot stamping utilizando o processo stud welding

através da seção longitudinal do núcleo da chapa e do pino (ver Figura I).

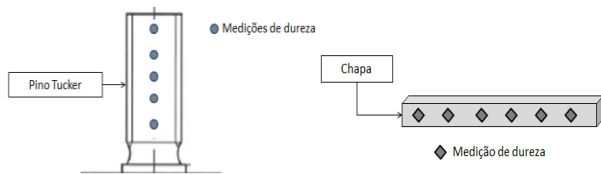


Figura I - Esquema da medição de dureza nas amostras do Pino Tucker e da Chapa Hot Stamping.

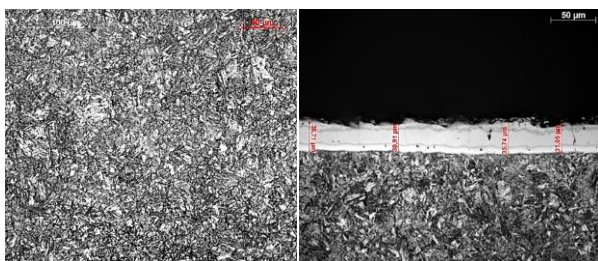
Resultados e discussão

Caracterização dos materiais aplicados

A Tabela III apresenta os resultados das propriedades mecânicas obtidas no ensaio de tração e dureza de 5 amostras da chapa hot stamping e de Pinos Tuckers. Pode-se observar que todas as amostras ensaiadas apresentaram valores de limite de escoamento superiores a 1200MPa, com resistência à tração superior a 1400MPa e alongamento maior que 6%. Verifica-se que os valores de Dureza Rockwell variaram entre 45,3 à 47,6HRC e Dureza Vickers (HV10) entre 400 e 500. É especificado valor de 41 a 49 HRC e de 400 a 500HV. Com relação a dureza dos pinos, foi verificado que os resultados de Dureza Rockwell B das amostras analisadas apresentam valores conforme especificado. Os valores de variam de 61,3 à 65,9HRB. É especificado valor inferior à 68HRB.

Tabela III – Resultados das propriedades mecânicas da Chapa e dos Pinos Tuckers M6.

Valores	Propriedades mecânicas					
	Chapas Hot Stamping					Pino (M6)
	Limite de Escoamento (MPa)	Limite de Resistência (MPa)	Alongamento (%)	Dureza Vickers (HV)	Dureza Rockwell C (HRC)	Dureza Rockwell B (HRB)
Máximo	1248,5	1500,8	8,1	447	47,6	65,9
Médio	1229,26	1473,42	7,5	443	46,48	64,4
Mínimo	1216,8	1465,8	7,3	438	45,3	61,3
Especificado	950 à 1250	1300 à 1650	≥ 6	400 à 500	41 à 49	≤ 68



(A)

(B)

Figura II – Microestrutura (A) do núcleo da chapa composta por martensita revenida e (B) superfície da camada de AISI. Nital 4%.

A Figura IIA mostra a microestrutura do núcleo da chapa hot stamping. Na imagem é possível observar que a mesma é composta por uma microestrutura martensítica., homogênea e uniforme, ausente de decarbonetação ou quaisquer outras não-conformidade que comprometam a resistência da chapa. Durante análise microscópica, foi medida a espessura da camada de revestimento (composta por AlSi). A Figura IIB mostra a superfície da chapa formada pela camada de AlSi e o metal base. Verifica-se que a camada apresentou valores de espessura variando de 30,9 à 36,7µm. Esses valores encontram-se dentro da faixa de tolerância, que varia de 30 à 50 µm.

Análise do conjunto soldado

Com o objetivo de identificar a microestrutura formada na região de solda entre o Pino Tucker e a Chapa Hot Stamping, uma micrografia foi preparada, mapeada e analisada por microscopia. Cinco regiões distintas são mostradas na Figura III, onde é possível identificar as características de cada uma delas em relação a composição da microestrutura do Pino e da Chapa, a Zona Termicamente Alterada (ZTA), a presença de poros, a penetração e fusão da solda.

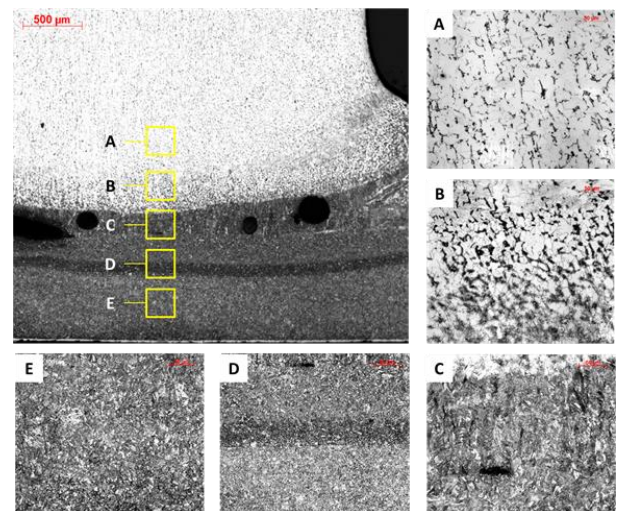


Figura III – Microestrutura característica da solda entre o Pino e a Chapa. A. Microestrutura do Pino composta por ferrita com traços de perlita globular; B. Zona Termicamente Afetada (ZTA) do Pino Tucker; C. Zona de fusão entre o Pino Tucker e a Chapa – poros são observados nesta região; D. Zona Termicamente Afetada (ZTA) da Chapa; E. Microestrutura da Chapa composta por martensita revenida.

De acordo com a Figura IIIA, é possível verificar que o Pino é composto por ferrita com pequenos traços de perlita globular e apresenta sua microestrutura modificada na Zona Termicamente Afetada (Figura IIIB). Na região da ZTA, observa-se a difusão do carbono entre os grãos de ferrita, formando uma microestrutura mais rica em perlita quando comparada com as demais regiões do Pino. Esse fenômeno é decorrente do elevado aquecimento entre as peças durante o processo de soldagem (arco elétrico), fazendo com que o carbono derivado da Chapa migre em direção ao Pino.

A Figura IIIC mostra a zona de fusão (penetração da solda) entre o Pino e a Chapa, caracterizada pela formação de uma microestrutura colunar, localizada entre a ZTA do Pino e da Chapa. A fusão da solda e sua penetração em direção a chapa são os principais responsáveis pela resistência da solda, onde uma maior zona de fusão e uma maior profundidade resultam em maior aderência do conjunto soldado. Por outro lado os poros afetam negativamente a qualidade da solda, atuando como concentradores de tensão, reduzindo a resistência mecânica da peça. A presença de poros é comum na região de fusão, sendo observada também na Figura IIIC. As Figuras IIID e IIIE mostram a região de transição entre a ZTA com a microestrutura da chapa composta por martensita e austenita retida, respectivamente.

Para análise da penetração e porosidade da solda, macrografias de cada corpo de prova foi analisada individualmente. Abaixo a Figura IV mostra de forma esquemática como foi realizado a medição de penetração da solda (Fig. IVA) e porosidade na região de fusão (Fig. IVB).

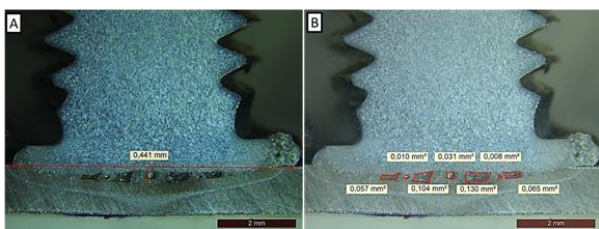


Figura IV – Esquema do corpo de prova para análise de penetração e porosidade da solda.

Os resultados de penetração, porosidade e resistência à tração analisados são mostrados na Tabela IV em relação a cada combinação de parâmetros de processo, totalizando 16 corpos de prova para cada técnica de análise (contando com uma réplica).

Tabela IV – Resultados penetração, porosidade e resistência à tração em relação aos parâmetros de processo utilizado em cada corpo de prova.

Ordem	Corrente (A)	Tempo (ms)	Lift (mm)	Penetração (mm)	Porosidade (mm ²)	Resistência tração (N)
1	680	34	1.2	0,44	0,405	6891
2	680	34	1.2	0,31	0,284	7461
3	680	34	0,6	0,25	0,164	3523
4	820	34	0,6	0,44	0,204	6964
5	680	26	1,2	0,35	0,207	3658
6	820	34	1,2	0,48	0,091	6456
7	680	26	0,6	0,27	0,016	5145
8	680	26	1,2	0,32	0,286	2510
9	820	34	1,2	0,59	0,161	7088
10	820	34	0,6	0,43	0,857	6474
11	680	26	0,6	0,26	0,295	3171
12	820	26	0,6	0,32	0,250	6130
13	820	26	1,2	0,4	1,188	5938
14	680	34	0,6	0,39	0,080	3461
15	820	26	1,2	0,37	0,166	5472
16	820	26	0,6	0,35	0,026	6238

Os dados da Tabela IV relacionando os resultados de porosidade, penetração e resistência à tração com os parâmetros de processo (corrente, tempo e lift) foram plotados e mostrados através dos gráficos das Figuras VA, VIA e VIIA, as quais mostram a influência do processo nas médias dos resultados obtidos, organizados de forma que no eixo das abcissas estão os valores referentes aos parâmetros de processo e, no eixo das ordenadas, os valores médios registrados durante as análises. Nestes gráficos, quanto maior a inclinação da reta (em relação ao eixo horizontal) e a dispersão de seus pontos, maior é a interferência do parâmetro do processo em relação aos resultados obtidos. As Figuras VB, VIB e VIIB mostram a interação entre os parâmetros do processo em relação aos resultados de penetração, porosidade e resistência à tração. Nestes casos, é desejável que as retas se cruzem e tenham inclinação em relação ao eixo horizontal.

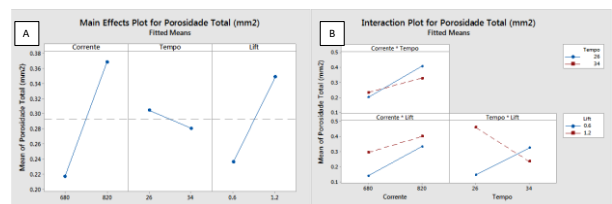


Figura V – Relação da (A) influência dos parâmetros do processo nos resultados de porosidade das soldas e a (B) interação entre ambos.

Na Figura VA, verifica-se que a presença dos poros é fortemente influenciada pela corrente de solda, seguido do lift e do tempo. Aplicação de corrente elevada faz aumentar a ocorrência de poros (média da área porosa) na região de fusão da solda, passando de aproximadamente 0,22mm² para 0,37mm² para corrente de 680 e 820A, respectivamente. Em relação ao tempo, é

Efeito dos parâmetros de soldagem sobre a microestrutura e a resistência à tração de juntas de pino m6 com chapa hot stamping utilizando o processo stud welding

possível observar que este fenômeno ocorre de forma inversa quando comparado aos parâmetros corrente e lift, onde para o tempo mais elevado, de 34ms, a área de poros é menor quando comparado ao tempo de 26ms. Neste caso, trata-se de um fenômeno desejável, visto que os poros atuam como concentradores de tensão, podendo reduzir a resistência mecânica do conjunto soldado.

O lift segue a mesma tendência da corrente, ou seja, quanto mais elevada é a distância do pino para chapa durante processo de soldagem, maior é a área média de poros na região de fusão, passando de 0,24 para 0,35mm² com lift de 0,6 e 1,2mm, respectivamente. Através da Figura VB é possível observar a interação entre os parâmetros de solda em relação a área média de porosidade na região de fusão. No gráfico, nota-se uma forte interação entre os parâmetros tempo/lift (retas se cruzam), mostrando que o lift de 1,2mm reduz a área média de poros quando aumenta o tempo de solda de 26 para 34ms. Em contrapartida, lift de 0,6mm faz aumentar a presença de poros com o aumento do tempo. Em menor magnitude, foi notado interação entre corrente/tempo, onde a elevação de ambos faz aumentar a área média de poros. Não foi evidenciado interação entre corrente/lift (as retas não se cruzam), havendo a mesma tendência entre os parâmetros.

Através da Figura VIA, é possível notar a forte influência dos parâmetros de solda nos resultados de penetração (fusão). A mudança de corrente de 680 para 820A faz a penetração média passar de aproximadamente 0,32mm para pouco mais 0,42mm. Os parâmetros tempo e lift seguem a mesma tendência, ou seja, quanto mais elevado o tempo e o lift maiores os valores de penetração da solda. Na Figura VIB foi verificado que não há interação entre os parâmetros de solda (as retas não se cruzam), onde as combinações tempo/corrente, corrente/lift e tempo/lift seguem a mesma tendência

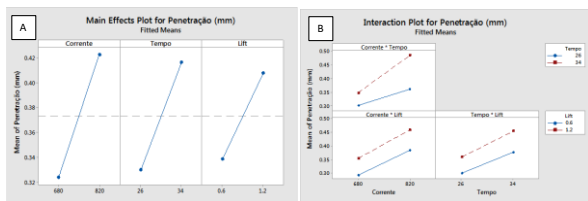


Figura VI – Relação da (A) influência dos parâmetros do processo nos resultados de penetração das soldas e a (B) interação entre ambos.

Através da Figura VIIA é possível observar que todos os parâmetros de processo apresentam influência em relação aos valores médio de força de extração da solda, onde a corrente apresenta maior relevância, seguido do tempo e lift. Através da corrente elevada (820A), é possível atingir valores médio de força de extração em torno de 6300N. Em contrapartida, o uso de baixa corrente reduz drasticamente esses valores, chegando a atingir aproximadamente uma média de 4500N, sendo especificado força superior à 4200N.

A Figura VIIB mostra que não há interação entre a combinação de parâmetro tempo de solda/corrente, ou seja, com tempos de 26 e 34ms as retas

do gráfico não se cruzam. Nas demais combinações, a corrente/lift e tempo/lift é possível observar as interações entre esses parâmetros (retas se cruzam). Neste último caso, foi observado que o lift de 1,2mm o tempo tem relevância, mas com lift em 0,6 mm o tempo não tem influência (reta paralela ao eixo horizontal).

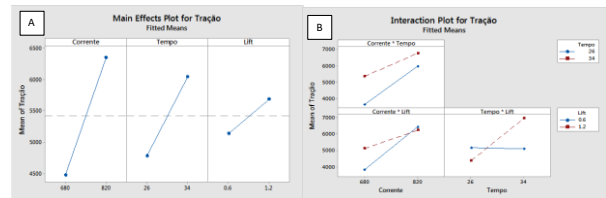


Figura VII – Relação da (A) influência dos parâmetros do processo nos resultados de resistência à tração das soldas e a (B) interação entre ambos.

Procurando otimizar o processo de soldagem, ou seja, reduzir a área de porosidade na região de fusão, elevar os valores médios de penetração e resistência a tração da solda, as três variáveis analisadas precisam estar na máxima condição de processo, com 820A de corrente, 34ms de tempo e 1,2mm de lift (ver Figura VIII).

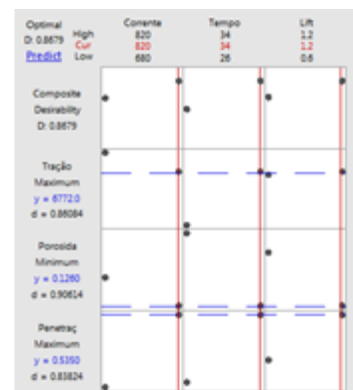


Figura VIII – Otimização do processo em relação aos parâmetros de soldagem com os resultados de resistência à tração, porosidade e penetração.

Conclusões

De acordo com as análises realizadas, foi verificado que:

- A menor porosidade encontrada na região de fusão da solda é uma área de apenas 0,016mm², com aplicação de corrente de 680A, tempo de 26ms e Lift de 0,6mm.
- Os valores de penetração de solda estão associados a elevadas aplicações de corrente durante o processo de soldagem, onde foi possível observar que correntes de 820A atingem penetração média de aproximadamente 0,42mm, contra 0,32mm para aplicação de corrente mais baixa (680A). Tempo mais longo e maior lift também resultam em maior penetração de solda, seguindo a mesma tendência da corrente. Esses parâmetros não apresentem interação entre si.
- Os valores médios de resistência à tração são fortemente influenciados pelos parâmetros de processo analisados, onde a corrente de soldagem tem maior

interferência na propriedade mecânica, seguida pelo tempo e lift.

Referências Bibliográficas

- [1] - Nishikawa, W. The principle and application field of stud welding, *Journal of the Japan Welding Society*, 71 (8), 575-580, 2003.
- [2] - Chabers, H. Principles and practices of stud welding. *PCI Journal*, 46 (5), 46-58, 2001.
- [3] - Huallpa, Edgar Apaza. Caracterização da transformação martensítica em temperaturas criogênicas [Dissertação]. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo; 2011.
- [4] - DIN EN 10083-3:2007-01, Steels for quenching and tempering –Part 3: Technical delivery conditions for alloy steels.
- [5] - BS EN 10263-2:2001, Steel rod, bars and wire for cold heading and cold extrusion – Part 2: Technical delivery conditions for steels not intended for heat treatment after cold working. Publication date: 15 August 2001, Edition: 2. Number of pages: 12.
- [6] - PS50003/04 - 2018, Welding: fastener, drawn arc. Publication date: 27 May 2014, Edition: 3. Number of pages: 13.
- [7] - ISO 6892-1:2016, Metallic materials -- Tensile testing -- Part 1: Method of test at room temperature. Publication date: 2016-07, Edition: 2. Number of pages: 79.
- [8] - ISO 6508-1:2015, Metallic materials -- Rockwell hardness test -- Part 1: Test method. Publication date : 2015-03, Edition: 3.
- [9] - ISO 6507-1:2005, Metallic materials - Vickers hardness test. Part 1: Test method. Publication date: 2005-12, Edition: 3.