

# Influência da Velocidade de Soldagem e Potência do Pré-Aquecimento Indutivo Localizado Sobre a Geometria de Juntas Soldadas

William Todendi Dutra, Ivan Guerra Machado, Arnaldo Ruben Gonzalez  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Laboratório de Soldagem & Técnicas Conexas,  
Porto Alegre, RS, Brasil,  
william.dutra@ufrgs.br

**RESUMO:** Este trabalho tem por objetivo avaliar, através de um Projeto de Experimentos 3k, a influência da velocidade de soldagem e da potência de pré-aquecimento indutivo localizado sobre a geometria de cordões de solda. O trabalho mostra que a penetração e largura do cordão de solda foram aumentadas com o aumento do pré-aquecimento, e reduziram com o aumento da velocidade de soldagem, sendo a velocidade de soldagem o fator com maior influência nas respostas.

**PALAVRAS-CHAVE:** Soldagem. Aquecimento indutivo localizado. Pré-aquecimento.

**ABSTRACT:** The purpose of this work is to evaluate the influence of welding speed and inductive localized preheating power on the geometry of a weld bead. The work shows that penetration and weld bead width increase with the increasing of the preheating and reduces with the increase in welding speed. The welding speed the factor with the greatest influence on the responses.

**KEYWORDS:** Welding. Inductive localized heating. Preheating.

## 1. INTRODUÇÃO

Em soldagem, a utilização de pré-aquecimento está intimamente ligada à redução das taxas de resfriamento da região soldada e, eventualmente, à diminuição da distorção. O pré-aquecimento é principalmente empregado em aços tratados termicamente ou termomecanicamente, ou naqueles que tendem a formar trinca induzida por hidrogênio, já que nesse caso são mantidas temperaturas onde as taxas de difusão do hidrogênio são significativamente maiores que aquelas em temperatura ambiente [1]. A necessidade de pré-aquecimento aumenta com o aumento da espessura do aço, com o maior nível de constrangimento da junta soldada e maior conteúdo de carbono/elemento de liga do aço, e por fim, da quantidade de hidrogênio difusível do metal de solda [2] [3].

Duas formas são as mais utilizadas para realizar o pré-aquecimento: uma com chama através de maçaricos para oxigás, e a outra pela utilização de mantas de aquecimento resistivo. Em ambos os casos, as áreas aquecidas são extensas, pois abrangem muito mais do que somente a área próxima ao cordão de solda. Esse problema pode ser contornado em alguns casos, utilizando-se uma máquina de aquecimento indutivo. Esse tipo de equipamento gera calor de forma rápida, uniforme e localizada, podendo ser focalizado através de concentradores de fluxo magnético (um dos princípios do funcionamento desse tipo de aquecimento) direta e somente na região a ser soldada.

Entretanto, o aquecimento localizado na junta também tem a função de auxiliar na fusão do metal base, fazendo com que este alcance temperaturas próximas à fusão do material. Esse pré-aquecimento pode favorecer o aumento da penetração do cordão de solda. Logo, em juntas de chapas mais espessas, pode ser descartada a usinagem de chanfro em alguns casos, e podem ser alcançadas maiores velocidades do processo de soldagem [4].

Com a função de auxiliar a fusão do material base, é proposta a utilização de um sistema de aquecimento indutivo, constituído por um indutor de formato adequado à aplicação do campo eletromagnético, e um concentrador de fluxo para concentrar as linhas do campo sobre a pequena área em que

se deseja soldar, montado em tandem com a tocha de soldagem. JONES [5] cita que a estratégia de usar um sistema composto visa reduzir, ou até eliminar distorções de soldagem e incrementar consideravelmente a produtividade.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Em um sistema de soldagem composto, os parâmetros de montagem também podem ter influência sobre a geometria do cordão de solda. Na Fig. 1 é mostrado o esquema de montagem do sistema composto de soldagem com pré-aquecimento (devido à direção da soldagem e posição de montagem dos elementos) indutivo localizado, evidenciando o indutor com concentrador de fluxo e os parâmetros de montagem, dti: distância tocha-indutor, dip: distância indutor-peça. O comprimento do indutor é fixo e representado pela cota li.

Em estudo anterior [6], foi determinado que os parâmetros de montagem 'dti' e 'dip' não afetam significativamente a geometria do cordão de solda, então se buscou entender melhor a participação da Velocidade de Soldagem (Vs) e Potência de Aquecimento Indutivo (Pind) sobre a geometria do cordão de solda. Na Fig. 2 são mostradas as cotas de medição da geometria do cordão avaliadas, tidas como a resposta à variação dos parâmetros de estudo, sendo: Pcs: penetração do cordão de solda e Lcs: largura do cordão de solda.

- Para efeito de determinação dos níveis dos parâmetros de controle e de análise, considerou-se que uma soldagem adequada é aquela avaliada quanto à qualidade visual, considerando como critérios de avaliação o aspecto, o formato e a ausência de irregularidades superficiais do cordão de solda. Portanto, determinaram-se os parâmetros que seriam mantidos constantes e os valores máximos e mínimos dos parâmetros variáveis que seriam analisados. As variáveis do processo mantidas constantes foram:
- Processo de soldagem MAG convencional.
- Fonte de energia: curva característica tensão constante.
- Eletrodo em corrente contínua polaridade positiva (CCEP).
- Tensão de soldagem: 30 V.

- Ângulo de deslocamento da tocha: neutro.
- Eletrodo AWS E70S-6 com diâmetro de 1,2 mm.
- Velocidade de alimentação do arame: 8,0 m/min. (correspondendo a intensidade de corrente de aproximadamente 245 A).
- Gás de proteção: argônio + 25% CO<sub>2</sub>, com vazão de 15 l/min.
- Distância do bico de contato à peça: 18 mm.
- Material base: chapas de aço AISI 1045 com 7,9 mm de espessura.

As dimensões das chapas são 76 mm de largura (aos pares) e 100 mm de comprimento, com a utilização de chapas postizas no início e fim do cordão de solda, com a finalidade de estabilização do arco antes de ele entrar na região a ser analisada. Estas condições de soldagem visaram estabelecer penetração menor do que 30% da espessura das chapas, com a finalidade de permitir uma melhor avaliação da variação da penetração frente aos outros parâmetros.

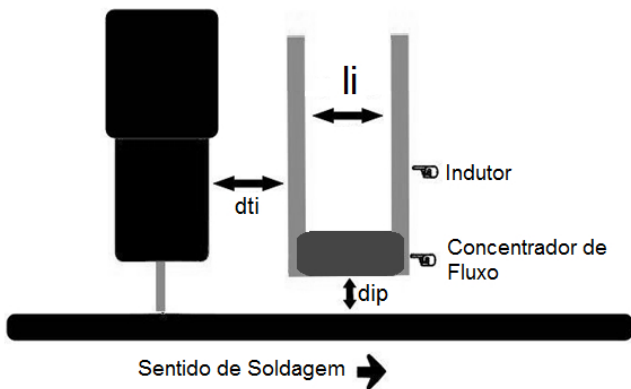


Fig. 1 - Esquema da montagem em tandem de um sistema de soldagem MIG/MAG com pré-aquecimento indutivo localizado.

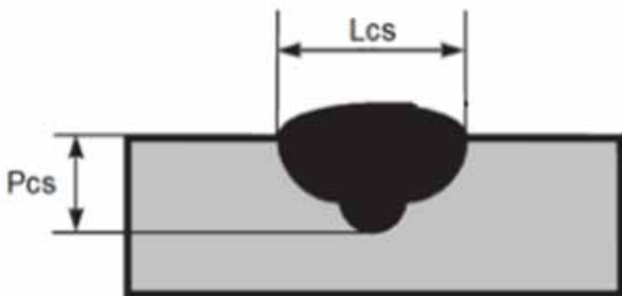


Fig. 2 - Parâmetros da geometria do cordão de solda avaliados. Pcs: penetração do cordão de solda e Lcs: largura do cordão de solda.

### 2.1. PRÉ-AQUECIMENTO INDUTIVO

Os princípios do aquecimento indutivo se baseiam na variação de um campo eletromagnético que induz uma corrente elétrica alternada a circular na peça a ser aquecida, de sentido oposto àquela que gerou o campo. Por sua vez, a corrente induzida na peça faz com que ela aqueça por efeito joule. Quanto maior a frequência da variação do campo eletromagnético, mais superficial é a concentração de corrente elétrica induzida e, por consequência, o aquecimento.

Foi utilizado um equipamento de aquecimento indutivo com capacidade de 15 kW de potência e frequência máxima de 200 kHz. Durante os experimentos, a frequência de operação foi de 111,1 kHz com potências de aquecimento

Pind= 6 kW e Pind=12 kW. As taxas de aquecimento, na superfície, alcançaram 30°C/s e 74°C/s para as respectivas potências, calculadas a partir da máxima temperatura e divididas pelo tempo de interação com o indutor durante o deslocamento.

### 2.2. Temperaturas de pré-aquecimento

A temperatura de pré-aquecimento localizado é um fator que depende tanto da potência ajustada no equipamento de aquecimento indutivo, tanto quando da velocidade relativa entre indutor e peça a ser aquecida. Portanto variando esses dois fatores pode-se obter temperaturas em uma ampla faixa. Com o intuito de estimar estas temperaturas, foi utilizado uma termo câmera para a aquisição apenas desta interação. Foram feitas combinações das máximas e mínimas velocidades e potências para estimar os limites de temperaturas encontradas nos experimentos. A Fig. 3 mostra um exemplo de imagem adquirida com este equipamento, com a escala do campo de temperaturas gerado pelo software que a acompanha.

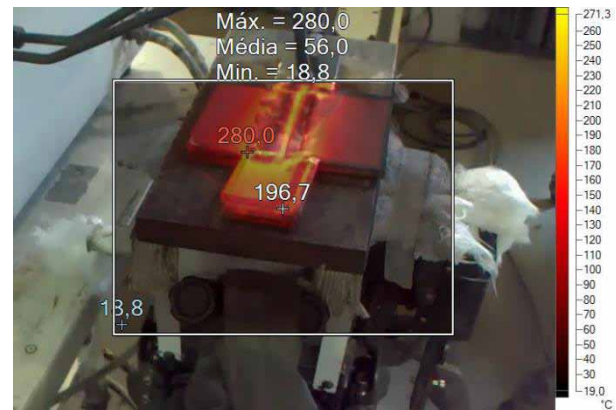


Fig. 3 - Imagem de peça aquecida indutivamente, adquirida com uma termo câmera.

A faixa de temperaturas superficiais de pré-aquecimento variou de aproximadamente 170°C para o caso de maior velocidade e menor potência, até 590°C para o de menor velocidade e maior potência de aquecimento. **Efeitos esperados para estas combinações de parâmetros.** Combinações intermediárias variaram em torno de 250°C a 420°C, conforme tabela 1.

### 2.3. Projeto de experimentos

Na elaboração do plano de estudo, utilizou-se o planejamento fatorial em três níveis, onde cada fator assume valor máximo, intermediário e mínimo. A utilização de planejamento de experimentos embasados em fundamentos estatísticos proporciona a obtenção de um número máximo de informações do sistema em estudo, a partir de um número mínimo de experimentos ou ensaios [7]. Os valores adotados para os níveis máximos, intermediários e mínimos encontram-se na Tabela 2.

Combinando-se esses níveis entre todos os fatores obtém-se N = 3k experimentos, onde k é o número de fatores analisados. Como foram analisados k = 2 fatores, o número de ensaios é N=9, somando uma repetição, totaliza-se 18 experimentos. A tabela 3 contém a combinação de fatores gerada pelo software Statistica®, em modo aleatório e replicado.

**Tabela 1 - Valores de temperaturas adquiridos para a combinação de potência de pré-aquecimento indutivo e velocidade de soldagem.**

Pot. (kW)	Velocidade (mm/s)	Temp. (°C)
12	6	590
12	12	418
6	6	253
6	12	167

**Tabela 2 - Níveis utilizados para os fatores estudados.**

Fator	Mínimo	Intermediário	Máximo
V <sub>s</sub> : velocidade de soldagem (mm/s)	6	9	12
P <sub>ind</sub> : potência do indutor (kW)	0	6	12

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Realizados os ensaios, os corpos de prova foram seccionados transversalmente ao cordão de solda, lixados e atacados quimicamente com reagente nital 10%. A seguir, com o auxílio de uma lupa estereoscópica avaliou-se P<sub>cs</sub> e L<sub>cs</sub>. Os resultados obtidos na aplicação do projeto fatorial, penetração e largura do reforço do cordão de solda, estão contidos nas 2 últimas colunas da Tabela 3.

A variação da penetração com os parâmetros avaliados se comportou como o previsto. Como adendo aos experimentos foi feita uma nova série de soldas na velocidade de soldagem de 3 mm/s para as diferentes potências de pré-aquecimento. Porém, esta série não foi utilizada no processamento dos resultados do projeto de experimentos, sendo somente analisada a penetração. A tabela 4 mostra os valores de penetração obtidos nas diferentes potências de pré-aquecimento para essa nova velocidade.

**Tabela 3 - Planejamento fatorial completo do experimento, e valores de penetração e largura do cordão de solda**

Ordem	Réplica	P <sub>ind</sub> (kW)	V <sub>s</sub> (mm/s)	P <sub>cs</sub> (mm)	L <sub>cs</sub> (mm)
13	2	6	6	4,0	14,5
11	2	0	9	2,9	10,5
9	1	12	12	3,1	10,2
17	2	12	9	3,5	12,2
7	1	12	6	4,3	15,4
16	2	12	6	4,6	15,4
2	1	0	9	3,3	10,6
18	2	12	12	2,7	9,0
3	1	0	12	2,8	9,2
6	1	6	12	2,6	9,1
15	2	6	12	3,2	9,4
12	2	0	12	2,3	8,6
14	2	6	9	3,2	11,3
5	1	6	9	3,7	11,8
8	1	12	9	3,2	12,0
1	1	0	6	3,1	12,3
4	1	6	6	3,7	14,6
10	2	0	6	3,4	12,8

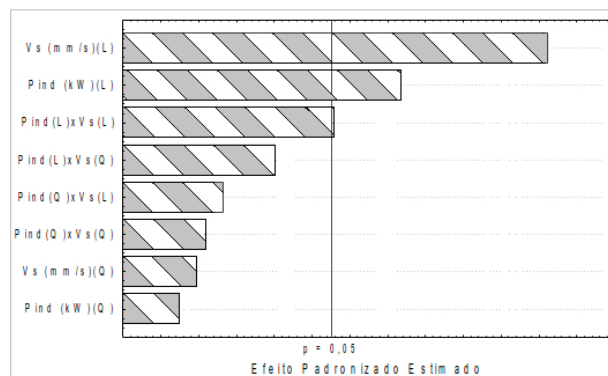
**Tabela 4 – Valores de penetração do cordão de solda para as diferentes potências de pré-aquecimento na velocidade de soldagem de 3 mm/s.**

Fator	Mínimo	Intermediário	Máximo
V <sub>s</sub> : velocidade de soldagem (mm/s)	6	9	12
P <sub>ind</sub> : potência do indutor (kW)	0	6	12

#### 3.1. Análise de variância (ANOVA)

Para avaliar de maneira mais consistente os efeitos dos fatores principais empregados e a interação linear e quadrática sobre as respostas observadas, estas foram aplicadas à análise de variância. Neste trabalho, considerou-se como critério de análise que um determinado fator de controle afetou estatisticamente uma resposta, quando o valor-p obtido foi inferior a 5%, ou seja, uma confiança estatística de 95%. Mediante a ANOVA para a resposta em penetração, foi determinado que apenas os fatores linear de potência, linear de velocidade e a interação destes dois foram significativos na penetração, sendo as participações individuais de aproximadamente 19%, 48% e 10%, respectivamente, na faixa de estudo.

A Fig. 4 mostra o gráfico de Pareto em termos da significância dos parâmetros V<sub>s</sub> e P<sub>ind</sub> normalizados, sobre a penetração, onde pode ser vista também a proximidade da significância escolhida (valor-p < 0,05). Observa-se que a penetração tem uma resposta linear à variação tanto de V<sub>s</sub> quanto de P<sub>ind</sub>.



**Fig. 4 – Diagrama de Pareto das interações lineares (L) e quadráticas (Q) dos parâmetros em relação à penetração do cordão de solda.**

Na ANOVA da largura do cordão de solda, novamente os fatores principais V<sub>s</sub> e P<sub>ind</sub>, e a interação linear desses dois fatores foi significativa na resposta. A participação da velocidade V<sub>s</sub> é predominante na variação da largura do cordão de solda, sendo de quase 85% a sua importância, valor maior que na análise da penetração. A potência de aquecimento tem uma menor participação (aproximadamente 10%) e a interação linear dos dois fatores tem uma contribuição de praticamente 3%.

#### 3.2. Análise da penetração do cordão de solda

Considerando todos os ensaios realizados é possível ver na Fig. 5(a) que ao aumentar a potência do aquecimento, e por consequência a temperatura do metal a ser soldado, a penetração teve aumento. Essa elevação de temperatura aproxima a fusão do material base, e assim o calor gerado pelo arco elétrico é usado primariamente para fusão do metal de adição [5]. Já na Fig. 5(b), a maior velocidade acarreta na redução da

penetração, isso ocorre, pois há menor energia por unidade de comprimento interagindo localmente para a fusão do material a ser soldado. Utilizando estes parâmetros, a penetração teve um aumento de 10% a 57% com o aumento da potência, e redução de 26% a 47% com o aumento da velocidade.

Na Fig. 6 é possível visualizar uma plotagem de curva de contorno da superfície de resposta da penetração para a interação entre potência e velocidade de soldagem. É possível notar a dominância da Vs sobre a Pind, ao passo que para maior velocidade (12 mm/s) a curva permanece sobre o mesmo campo para toda extensão de Pind. Ou seja, as superfícies têm uma tendência mais horizontal do que vertical.

A Fig. 7 mostra a penetração para todos os experimentos (incluindo a série adicional com velocidade igual a 3 mm/s), ressaltando a variação com a velocidade de soldagem, mostrada no eixo horizontal. É possível novamente visualizar a dominância da velocidade sobre a potência de pré-aquecimento pela tendência da penetração se igualar nas velocidades de soldagem mais altas.

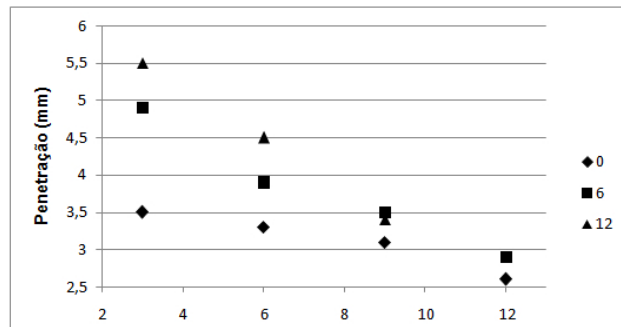


Fig. 7 – Penetração do cordão de solda em função da velocidade de soldagem para as diferentes potências de pré-aquecimento.

### 3.3. ANÁLISE DA LARGURA DO CORDÃO DE SOLDA

A largura aumentou com a elevação da potência do pré-aquecimento indutivo localizado, enquanto diminuiu com o aumento da velocidade de soldagem. A Pind influencia na medida em que, ao aquecer a superfície da peça, o metal de adição demora mais para solidificar e flui lateralmente por um tempo maior. A Fig. 8 mostra a variação da largura em função da potência de aquecimento e da velocidade de soldagem. Pode ser calculado a partir da Tabela 3 que o aumento da largura é de cerca de 19% na menor velocidade com o aumento da potência, enquanto na maior velocidade a variação é de aproximadamente 6%. Com o aumento da velocidade de soldagem, a redução da largura sem pré-aquecimento é de 13%. Porém, com pré-aquecimento, a redução é de 18% para as duas potências utilizadas.

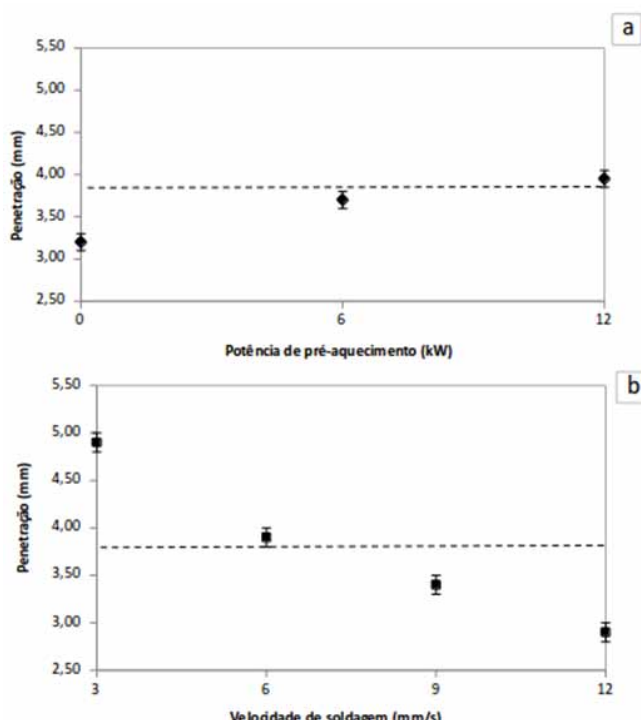


Fig. 5 - Penetração média do cordão de solda em função da potência de aquecimento indutivo (a) e velocidade de soldagem (b).

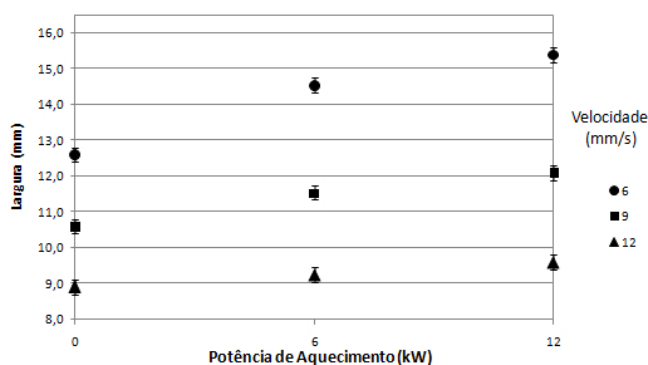


Fig. 8 - Relação da largura do cordão de solda com a potência de pré-aquecimento indutivo e velocidade de soldagem

Na Fig. 9 estão as curvas de nível de resposta da largura do cordão. Novamente é possível ver o caráter dominante da Vs sobre Pind através da horizontalidade das curvas. As figuras 7 e 8 também mostram a grande variação da largura em função dos parâmetros. Esta variação foi de cerca de 73% entre a de menor Vs com maior Pind, e a de maior Vs com menor Pind (sem pré-aquecimento).

A Fig. 10 mostra a relação entre os valores estimados e os observados, demonstrando relativamente boa aproximação do modelo com os valores obtidos experimentalmente.

Por fim, na Fig. 11 é possível ver macrografias de algumas das amostras, distribuídas de acordo com a velocidade de soldagem e potência de pré-aquecimento indutivo localizado utilizados em cada uma delas. É possível verificar o aumento de penetração e largura conforme mencionado.

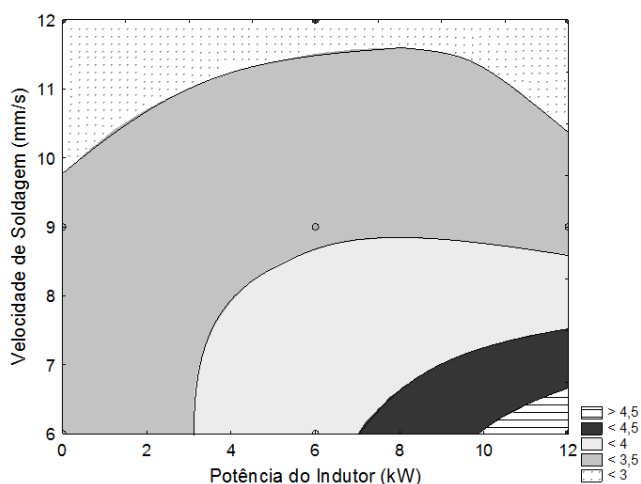


Fig. 6 - Curvas de contorno da superfície de resposta da penetração do cordão de solda para a interação velocidade de soldagem e potência de aquecimento indutivo.

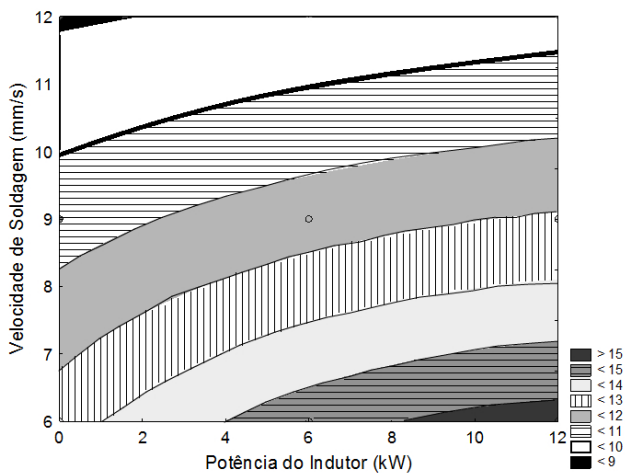


Fig. 9 - Curvas de contorno da superfície de resposta da largura do cordão de solda para a interação velocidade de soldagem e potência de aquecimento indutivo.

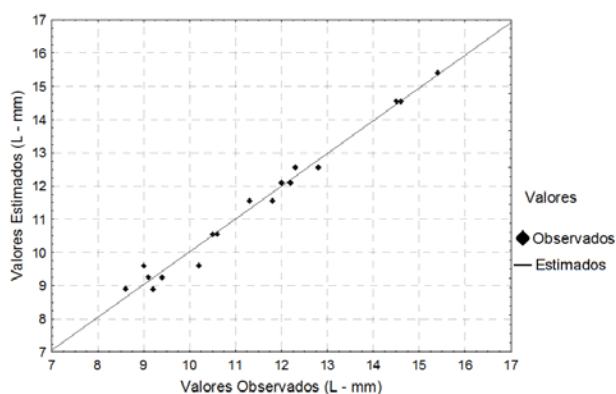


Fig. 10 - Relação entre valores estimados e observados na resposta da largura do cordão de solda.

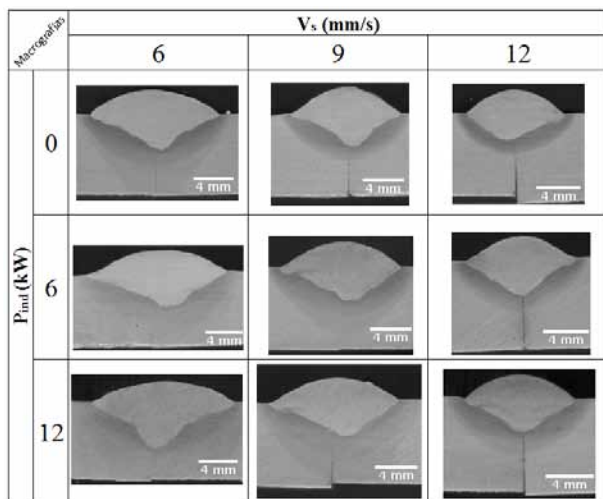


Fig. 11 - Macrografias da seção transversal dos cordões de solda distribuídos de acordo com a velocidade de soldagem e potência de pré-aquecimento indutivo localizado

## 4. CONCLUSÃO

Considerando os objetivos do trabalho, investigação de um sistema auxiliar de aquecimento indutivo localizado e do efeito dos parâmetros principais de aquecimento (potência do indutor) e de soldagem (velocidade de soldagem), sobre a geometria do cordão de solda, chega-se às seguintes conclusões:

Para todos os parâmetros de resposta, representada pela penetração e largura do cordão de solda, a velocidade de soldagem foi o parâmetro de maior significância entre os estudados, contribuindo de 48% a 84% na variação das respostas;

A potência de pré-aquecimento indutivo localizado teve efeito significativo sobre a variação da penetração e largura, sendo a sua participação de 10% a 18%, respectivamente.

Em maiores velocidades de soldagem, a tendência é a redução da variação das respostas, já que as temperaturas de pré-aquecimento são atenuadas pela menor energia por unidade de comprimento transferida pelo equipamento de indução;

A largura foi o parâmetro mais afetado, provavelmente devido à alta frequência de operação do equipamento de aquecimento indutivo, pois assim a concentração de calor é superficial e a penetração deste não chega a 5% da espessura das chapas soldadas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BS EN 1011-2: 2001: 'Welding. Recommendations for welding of metallic materials. Arc welding of ferritic steels', British Standards Institution, 2001.
- [2] EL RAYES, M., WALZ, C. e SEPOLD, G. The Influence of Various Hybrid Welding Parameters on Bead Geometry. *Welding Journal*, v. 83, n. 5, May 2004.
- [3] ALORAIER, A., IBRAHIM, R. e THOMSON P. FCAW Process to Avoid the Use of Post Weld Heat Treatment. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, v. 83, p. 394 – 398, 2006.
- [4] JONES, J.; RHOADES, V.L.; MADDEN, S.K. High Deposition Welding for Shipbuilding. Paper No. P44, 2012 Presentation, NSRP Joint Panel Meeting, PPPF Panel, Minneapolis, MN, EUA.
- [5] JONES, J. Hybrid Induction Arc Welding Reduces Weld Distortion And Boosts Productivity. *Advanced Materials and Processes*, Jan, 2015.
- [6] DUTRA, W.T.; MACHADO, I.G.; GONZALES, A.R. Soldagem a Arco Assistida por Aquecimento Indutivo Localizado. Congresso Nacional de Soldagem, ABS, Belo Horizonte, Brasil, 2016.
- [7] NETO, B.B.; SCARMÍNIO, I.S.; BRUNS, R.E., "Como fazer experimentos", Campinas, SP, Editora da Universidade Estadual de Campinas, 2007.