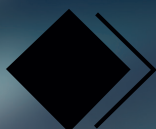


Oksana Kovalenko  
(Org.)



# PESQUISAS EM PROCESSAMENTO DE **METAIS**

SOLDAGEM, MANUFATURA ADITIVA, REVESTIMENTO E CORTE TÉRMICO



científica digital



## EDITORA CIENTÍFICA DIGITAL LTDA

Guarujá - São Paulo - Brasil

www.editoracientifica.com.br - contato@editoracientifica.com.br

|                    |                                          |
|--------------------|------------------------------------------|
| Diagramação e Arte | Edição © 2024 Editora Científica Digital |
| Equipe Editorial   | Texto © 2024 Os Autores                  |
| Imagens da Capa    | 1ª Edição - 2024                         |
| Adobe Stock - 2024 | Acesso Livre - Open Access               |

© COPYRIGHT - TODOS OS DIREITOS RESERVADOS. A editora detém os direitos autorais sobre a edição e o projeto gráfico, enquanto os autores mantêm os direitos autorais de seus respectivos textos. Esta obra está licenciada sob a Licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional, permitindo o download e compartilhamento integral ou parcial, desde que a fonte seja devidamente citada e os créditos atribuídos aos autores. É obrigatório que a obra permaneça em formato de Acesso Livre (Open Access), sem qualquer alteração. A catalogação em plataformas de acesso restrito ou com fins comerciais é estritamente proibida.



### Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

P474

Pesquisas em processamento de metais: soldagem, manufatura aditiva, revestimento e corte térmico / Organização de Oksana Kovalenko. – Guarujá-SP: Científica Digital, 2024.

Formato: PDF  
Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader  
Modo de acesso: World Wide Web  
Inclui Bibliografia  
ISBN 978-65-5360-849-8  
DOI 10.37885/978-65-5360-849-8

1. Engenharia de materiais. I. Kovalenko, Oksana (Organizador). II. Título.

CDD 669

Elaborado por Janaína Ramos – CRB-8/9166

Índice para catálogo sistemático:

I. Engenharia de materiais

E-BOOK

ACESSO LIVRE ON LINE - IMPRESSÃO PROIBIDA

2024

Oksana Kovalenko  
(Org.)

**Pesquisas em Processamento de  
Metais: Soldagem, Manufatura Aditiva,  
Revestimento e Corte térmico**

1ª EDIÇÃO



científica digital

**2024 - GUARUJÁ - SP**

# CONSELHO EDITORIAL

Prof. Dr. André Cutrim Carvalho  
Prof. Dr. Antônio Marcos Mota Miranda  
Prof<sup>a</sup>. Ma. Auristela Correa Castro  
Prof. Dr. Carlos Alberto Martins Cordeiro  
Prof. Dr. Carlos Alexandre Oelke  
Prof<sup>a</sup>. Dra. Caroline Nóbrega de Almeida  
Prof<sup>a</sup>. Dra. Clara Mockdece Neves  
Prof<sup>a</sup>. Dra. Claudia Maria Rinhel-Silva  
Prof<sup>a</sup>. Dra. Clecia Simone Gonçalves Rosa Pacheco  
Prof. Dr. Cristiano Marins  
Prof<sup>a</sup>. Dra. Cristina Berger Fadel  
Prof. Dr. Daniel Luciano Gevehr  
Prof. Dr. Diogo da Silva Cardoso  
Prof. Dr. Ernane Rosa Martins  
Prof. Dr. Everaldo dos Santos Mendes  
Prof. Dr. Fabricio Gomes Gonçalves  
Prof<sup>a</sup>. Dra. Fernanda Rezende  
Prof. Dr. Flávio Aparecido de Almeida  
Prof<sup>a</sup>. Dra. Francine Náthalie Ferraresi Queluz  
Prof<sup>a</sup>. Dra. Geuciane Felipe Guerim Fernandes  
Prof. Dr. Humberto Costa

Prof. Dr. Joachin Melo Azevedo Neto  
Prof. Dr. Jónata Ferreira de Moura  
Prof. Dr. José Aderval Aragão  
Prof. Me. Julianno Pizzano Ayoub  
Prof. Dr. Leonardo Augusto Couto Finelli  
Prof. Dr. Luiz Gonzaga Lapa Junior  
Prof. Me. Marcelo da Fonseca Ferreira da Silva  
Prof<sup>a</sup>. Dra. Maria Cristina Zago  
Prof<sup>a</sup>. Dra. Maria Otília Zangão  
Prof. Dr. Mário Henrique Gomes  
Prof. Dr. Marcus Fernando da Silva Praxedes  
Prof. Dr. Nelson J. Almeida  
Prof. Dr. Pedro Afonso Cortez  
Prof. Dr. Reinaldo Pacheco dos Santos  
Prof. Dr. Rogério de Melo Grillo  
Prof<sup>a</sup>. Dra. Rosenery Pimentel Nascimento  
Prof. Dr. Rossano Sartori Dal Molin  
Prof. Me. Silvio Almeida Junior  
Prof<sup>a</sup>. Dra. Thays Zigante Furlan Ribeiro  
Prof. Dr. Wescley Viana Evangelista  
Prof. Dr. Willian Carboni Viana  
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme

Acesse a lista completa dos Membros do Conselho Editorial em [www.editoracientifica.com.br/conselho](http://www.editoracientifica.com.br/conselho)

## Parecer e revisão por pares

Os textos que compõem esta obra foram submetidos à avaliação do Conselho Editorial e Revisados por Pares Externos (Peer Review), recebendo a devida recomendação para publicação.

**Nota:** Esta obra é uma produção colaborativa, tornando-se uma coletânea com reservas de direitos autorais para os autores. Alguns capítulos podem ser derivados de outros trabalhos já apresentados em eventos acadêmicos, todavia, os autores foram instruídos ao cuidado com o autoplágio. A responsabilidade pelo conteúdo de cada capítulo, bem como por sua originalidade e pela integridade das informações publicadas, recai exclusivamente sobre os respectivos autores e autoras, não representando, necessariamente, a opinião da editora, dos organizadores ou dos membros do conselho editorial.

# APRESENTAÇÃO

Esta obra é fruto de um processo colaborativo envolvendo professores, estudantes e pesquisadores que se destacaram e enriqueceram as discussões neste espaço formativo. Ela também resulta de movimentos interinstitucionais e ações de incentivo à pesquisa, congregando especialistas de diversas áreas do conhecimento e de diferentes Instituições de Educação Superior, públicas e privadas, com abrangência nacional e internacional.

O objetivo principal desta obra é integrar ações interinstitucionais, tanto nacionais quanto internacionais, com redes de pesquisa dedicadas a fomentar a formação continuada de profissionais da educação. Isso é realizado por meio da produção e disseminação de conhecimentos em várias áreas do saber.

Expressamos nossa gratidão aos autores pelo empenho, disponibilidade e dedicação no desenvolvimento e conclusão desta obra. Esperamos que ela se torne um instrumento didático-pedagógico valioso para estudantes, professores de todos os níveis de ensino, e demais interessados na temática.

**Oksana Kovalenko**

# SUMÁRIO

## Capítulo 01

### ANALYSIS OF MACHINING FORCES IN FRONTAL MILLING OF ABNT 1045 STEEL WITH MQF APPLICATION OF BABASSU OIL

Jean Robert Pereira Rodrigues; Sebastião Raimundo de Jesus Belém Leitão Filho; Wellington de Assunção; Fernando Lima de Oliveira; Keyll Carlos Ribeiro Martins; Sonia Rocha Santos Sousa; Jorge Bertoldo Junior; Moises dos Santos Rocha; Reginaldo Nunes da Silva; Ozéias Rodrigues Lobato Filho

 10.37885/241017971 ..... 7

## Capítulo 02

### AVALIAÇÃO DE ARAMES METAL CORED PARA SOLDAGEM ROBOTIZADA EM AÇO CARBONO COM ALTA DEPOSIÇÃO

Juliano Neves Panão; Marcello Ferrari; Edgar de Souza Dutra

 10.37885/241118317 ..... 19

## Capítulo 03

### AVALIAÇÃO DA ZONA TERMICAMENTE AFETADA EM AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO SUBMETIDO AO PROCESSO DE CORTE PLASMA

Rafael Henrique Ribeiro Escotenisce; Pedro Henrique Aquino Oliveira; Gustavo José Corrêa Gonçalves; Fernando Sabino Fonteqe Ribeiro

 10.37885/241018008 ..... 38

## Capítulo 04

### FIXAÇÃO DE TERMOPARES POR DESCARGA CAPACITIVA PARA MONITORAMENTO DA TEMPERATURA EM SOLDAGEM A LASER

Claudio Abilio da Silveira; Luiz Eduardo dos Santos Paes; Jhonattan Gutjahr; Milton Pereira; Walter Lindolfo Weingaertner

 10.37885/241018048 ..... 55

## Capítulo 05

### SOLDAGEM DE PASSE DE RAIZ COM USO DE COBREJUNTAS

Iaroslav Skhabovskyj; Oksana Kovalenko

 10.37885/241118240 ..... 73

**SOBRE A ORGANIZADORA** ..... 88

**ÍNDICE REMISSIVO** ..... 89

## **ANALYSIS OF MACHINING FORCES IN FRONTAL MILLING OF ABNT 1045 STEEL WITH MQF APPLICATION OF BABASSU OIL**

**Jean Robert Pereira Rodrigues**

Universidade Federal do Maranhão (UFMA)  
Universidade Estadual do Maranhão (UEMA)

**Sebastião Raimundo de Jesus Belém  
Leitão Filho**

Universidade Estadual do Maranhão (UEMA)

**Wellington de Assunção**

Universidade Estadual do Maranhão (UEMA)

**Fernando Lima de Oliveira**

Universidade Estadual do Maranhão (UEMA)

**Keyll Carlos Ribeiro Martins**

Instituto Federal do Maranhão (IFMA)

**Sonia Rocha Santos Sousa**

Instituto Federal do Maranhão (IFMA)

**Jorge Bertoldo Junior**

Instituto Federal do Maranhão (IFMA)

**Moises dos Santos Rocha**

Universidade Estadual do Maranhão (UEMA)

**Reginaldo Nunes da Silva**

Universidade Estadual do Maranhão (UEMA)

**Ozéias Rodrigues Lobato Filho**

Instituto Federal do Maranhão (IFMA)

# ABSTRACT

Several aspects characterize the machinability of a material, among them the required cutting power, surface finish and tool life, being these parameters improved using cutting fluids. The objective of this work is to evaluate the effect of the application of refined babassu oil (*Orbignya oleifera*), when used as cutting fluid with minimum amount of fluid (MQF) technique, in the machining forces of ABNT 1045 during frontal milling process. The methodology consisted of the application of babassu oil, comparing its performance with the commercial cutting fluid LB 2000, both in the MQF technique, and with the dry condition. It was carried out an Experimental Planning - DOE factorial  $2^5$ , having as variables the cutting speed, feed speed, cutting depth and cutting fluid at various MQF flow rates, being analyzed the cutting forces, feed force and passive force. The babassu oil used as a cutting fluid demonstrated results close to those of the LB 2000 fluid and outperformed dry conditions, indicating its potential as a viable substitute for other machining fluids.

**keywords:** machining forces; cutting fluid; machinability; cutting parameters.

## INTRODUCTION

Machining forces are important in evaluating the effect of machining parameters. The machining force is resultant of forces acting on the cutting edge, and the determination of such is also important for the design of the machining equipment, tools and devices (Iturbe *et al.*, 2017). Several works (Lee *et al.*, 2017; El Hakim *et al.*, 2015) have been carried out in the sense of using cutting force as a way to evaluate the machining process. These works have different approaches, where the cutting forces are correlated with parameters ranging from roughness, tool wear, to microstructure and mechanical properties (Binder & Doeblener, 2017; Qiu *et al.*, 2017). In general, the direction and way of the machining force ( $F$ ) are difficult to determine, therefore it is decomposed into components. The components of  $F$  are identified by indices: " $c$ " for the main cutting direction, " $f$ " for the feed direction and " $p$ " for the passive direction (perpendicular to the work plane). The cutting force " $F_c$ " has the same direction and way of the cutting speed " $V_c$ ". It is responsible for most of the cutting power. The feed force " $F_f$ " has the same direction and way of the feed speed " $V_f$ ", causing tool deflection. The passive force " $F_p$ " is the component of  $F$  perpendicular to the working plane  $P_f$ . Figure 1 shows the direction of the components of the machining forces.

**Figure 1** - Decomposition of the force in its components, and



Source: CIMM (2024).

In order to reduce machining forces, improve tool's life, surface finishing, improve dimensional accuracy, improve the breakage and transport of chips,

as well as to protect the machined surface and tools from oxidation, the use of cutting fluids play important role (Machado *et al.*, 2009). The cutting fluids have several functions in the machining processes, such as acting as cooler for the cutting region (notably at high cutting speeds) and/or lubrication (notably at low speeds and at high cutting stresses).

The discard of cutting fluids is an undesirable process, mainly because it is a pollutant and requires complex and costly prior treatment. Regarding to the destination of these products, environmental legislation establishes criteria according to the characteristics of the liquid reject, which take into account parameters such as sedimentable residues, pH, dissolved oxygen, chemical and biochemical demands of oxygen, temperature, oils and greases and the presence of microorganisms (Shokoohi *et al.*, 2015).

Many aspects of environmental problems associated with cutting fluids can be avoided or minimized by investing in research to develop new types of fluids and less aggressive methods of application, as well as promoting trainings leading to a better understanding of the impacts caused by the undisciplined use of the cutting fluids and promote environment-friendly practices. The introduction of the series of environmental legislation, OSHA (American Occupational Safety and Health Administration) and other international regulatory authorities have made the manufacture industry to reduce the consumption of mineral oil as cutting fluid for machining work, with great potential for the use of vegetable oils as cutting fluids for the sector (Burton *et al.*, 2014).

Several works are underway to develop environmentally correct cutting fluids based on various vegetable oils, most of the work reported put in evidence soybean oils, sunflower oils and canola oils. Currently, many groups are involved in the development of vegetal-based oils as cutting fluids (Shyha *et al.*, 2015; Shashidhara & Jayaram, 2010). The use of the Minimal Quantity of Fluid (MQF) has proved to be a very advantageous alternative in regards to abundant application of fluid in the machining, especially in the milling process. This technique consists in the use of a small amount of lubricating oil, which is sprayed into the cutting region. This way, the consumption of cutting fluid is significantly lower. For the MQF technique, the fluids used are generally vegetal-based with incorporated additives, and may also be of mineral-base. Figure 2 shows an example of milling process with the fluid spraying over the cutting region.

**Figure 2 -** Milling process using MQF technique.



The objective of this work is to verify the influence of the babassu oil (*Orbignya oleifera*, Figures 3 and 4) when used as cutting fluid through MQF in the cutting forces for ABNT 1045 steel during front milling process. This work aims to contribute mainly to the dissemination and use of ecologically correct cutting fluids that can be used in the machining processes. Babassu seed oil has properties similar to palm oil, with a high content of lauric acid, being also suitable to several applications like cosmetic industry, food, soaps, detergents, lubricants, among others.

**Figure 3 -** Babassu seeds.



**Source:** Own work (2024).

**Figure 4 -** Babassu palm.



**Source:** Own work (2024).

## MATERIALS AND METHODS

The methodology for the development of this work consisted of application of the vegetal-based cutting fluid (babassu oil), comparing its performance with the commercial oil LB 2000 (also vegetal-based, indicated for machining of ferrous metals, produced by ITW Chemical Products Ltda.) and with dry condition. An Experiment Planning – Factorial  $2^5$  was prepared, where the input variables were the cutting speed ( $V_c$ ) of 165 and 210 m/min, the feed rate ( $f_z$ ) of 0.15 and 0.3 mm/tooth, cut depth ( $a_p$ ) of 1 and 2 mm, and pre-determined MQF flow rates (10, 50, 100 and 200 ml/h). The measured output variables were cutting force ( $F_x$ ), feed force ( $F_y$ ) and passive force ( $f_z$ ). Table 1 highlights the planning.

**Table 1** - Planning matrix for machining forces analysis.

| Input Variables or Input Factors                                                                                                                                                                           |                    |               |        | Output Variables/Process Responses |                      |   |   |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|---------------|--------|------------------------------------|----------------------|---|---|
| Material of part: ABNT 1045 steel; Cutting tool: Frontal cutter Coromil 345 with carbide-coated inserts (MW 4240) - Sandvik Coromant; Machine Tool: Discovery 560 (Romi); Working penetration (ae): 62 mm. |                    |               |        |                                    |                      |   |   |
| Expt. N°.                                                                                                                                                                                                  | Cutting Conditions |               |        | Flow rate MQF (ml/h)               | Machining forces (N) |   |   |
|                                                                                                                                                                                                            | vc (m/min)         | fz (mm/tooth) | p (mm) |                                    | x                    | y | z |
| 01 to 04                                                                                                                                                                                                   | 165                | 0.15          | 1      | 10                                 |                      |   |   |
|                                                                                                                                                                                                            |                    |               |        | 50                                 |                      |   |   |
|                                                                                                                                                                                                            |                    |               |        | 100                                |                      |   |   |
|                                                                                                                                                                                                            |                    |               |        | 200                                |                      |   |   |
| 05 to 08                                                                                                                                                                                                   | 210                | 0.15          | 1      | 10                                 |                      |   |   |
|                                                                                                                                                                                                            |                    |               |        | 50                                 |                      |   |   |
|                                                                                                                                                                                                            |                    |               |        | 100                                |                      |   |   |
|                                                                                                                                                                                                            |                    |               |        | 200                                |                      |   |   |
| 09 to 12                                                                                                                                                                                                   | 165                | 0.30          | 1      | 10                                 |                      |   |   |
|                                                                                                                                                                                                            |                    |               |        | 50                                 |                      |   |   |
|                                                                                                                                                                                                            |                    |               |        | 100                                |                      |   |   |
|                                                                                                                                                                                                            |                    |               |        | 200                                |                      |   |   |
| 13 to 16                                                                                                                                                                                                   | 210                | 0.30          | 1      | 10                                 |                      |   |   |
|                                                                                                                                                                                                            |                    |               |        | 50                                 |                      |   |   |
|                                                                                                                                                                                                            |                    |               |        | 100                                |                      |   |   |
|                                                                                                                                                                                                            |                    |               |        | 200                                |                      |   |   |
| 17 to 20                                                                                                                                                                                                   | 165                | 0.15          | 2      | 10                                 |                      |   |   |
|                                                                                                                                                                                                            |                    |               |        | 50                                 |                      |   |   |
|                                                                                                                                                                                                            |                    |               |        | 100                                |                      |   |   |
|                                                                                                                                                                                                            |                    |               |        | 200                                |                      |   |   |

| Input Variables or Input Factors                                                                                                                                                                           |                    |                  |           | Output Variables/Process Responses |                      |   |   |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|------------------|-----------|------------------------------------|----------------------|---|---|
| Material of part: ABNT 1045 steel; Cutting tool: Frontal cutter Coromil 345 with carbide-coated inserts (MW 4240) - Sandvik Coromant; Machine Tool: Discovery 560 (Romi); Working penetration (ae): 62 mm. |                    |                  |           |                                    |                      |   |   |
| Expt. N°.                                                                                                                                                                                                  | Cutting Conditions |                  |           | Flow rate MQF<br>(ml/h)            | Machining forces (N) |   |   |
|                                                                                                                                                                                                            | vc<br>(m/min)      | fz<br>(mm/tooth) | p<br>(mm) |                                    | x                    | y | z |
| 21<br>to<br>24                                                                                                                                                                                             | 210                | 0.15             | 2         | 10                                 |                      |   |   |
|                                                                                                                                                                                                            |                    |                  |           | 50                                 |                      |   |   |
|                                                                                                                                                                                                            |                    |                  |           | 100                                |                      |   |   |
|                                                                                                                                                                                                            |                    |                  |           | 200                                |                      |   |   |
| 25<br>to<br>28                                                                                                                                                                                             | 165                | 0.30             | 2         | 10                                 |                      |   |   |
|                                                                                                                                                                                                            |                    |                  |           | 50                                 |                      |   |   |
|                                                                                                                                                                                                            |                    |                  |           | 100                                |                      |   |   |
|                                                                                                                                                                                                            |                    |                  |           | 200                                |                      |   |   |
| 29<br>to<br>32                                                                                                                                                                                             | 210                | 0.30             | 2         | 10                                 |                      |   |   |
|                                                                                                                                                                                                            |                    |                  |           | 50                                 |                      |   |   |
|                                                                                                                                                                                                            |                    |                  |           | 100                                |                      |   |   |
|                                                                                                                                                                                                            |                    |                  |           | 200                                |                      |   |   |

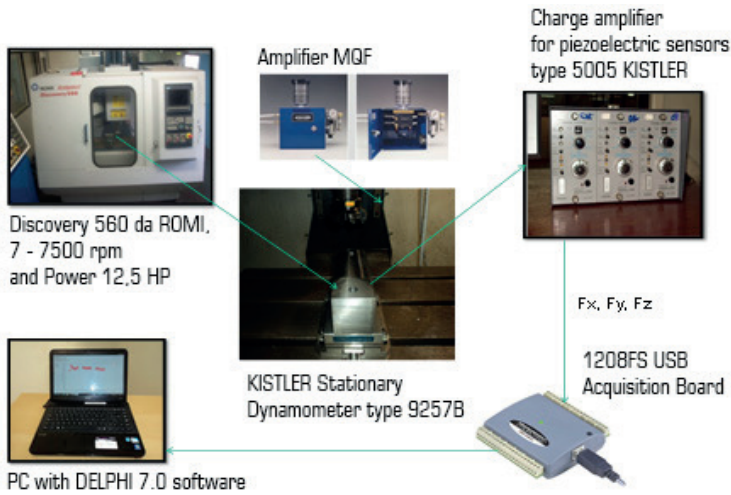
Source: Own work (2024) .

## Machining Force Measurement System

In order to avoid systematic errors, the manufacture and fixation of the pieces were standardized, being previously machined in a rectangular prism format with final dimensions of 180 mm length, 77 mm height and 62 mm width. Two holes of 15.25 mm (5/8") diameter each were made in order to fix the piece in the stationary dynamometer.

To acquire the machining forces, a Kistler 9257-B dynamometer was used attached to the machining central bus. The acquired signals are sent to a load amplifier and to an analog-digital conversion board (Measurement Computing USB 1208SF model, 1.25 MS/s). A computer using Delphi 7.0 software manages the signal. The methodology for capturing the force signal is shown in Figure 5:

**Figure 5** - Machining forces acquisition system.



**Source:** Own work (2024).

## Tooling Characterization

The tools used for the front milling process are the following: Milling tool 345 - 080Q27 - 13M (Sandvik - Coromant) - Diameter of 80 mm and capacity for 6 inserts (only one insert was used in order to save materials and tools); Insert 345r - 1305M - PM 4220 (Sandvik - Coromant); and Cone 52.33.527 (Sandvik - Coromant).

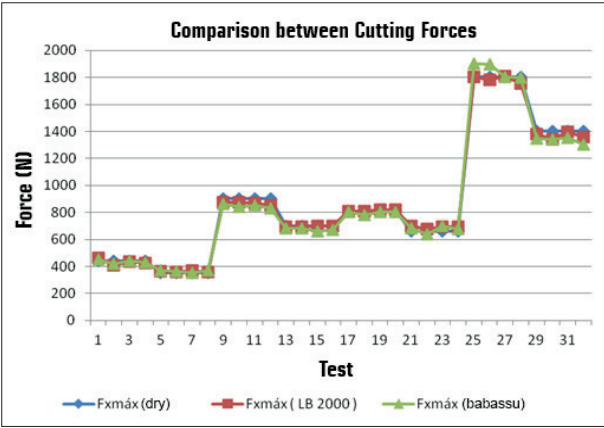
## RESULTS AND DISCUSSIONS

The results obtained during the experiments show that, depending on the machining conditions adopted during frontal milling, there was a significant difference between them by varying the cutting speed ( $V_c$ ), feed rate ( $f_z$ ), cutting depth ( $a_p$ ), cutting fluid application (babassu oil and LB 2000) and method (MQF), at the determined flow rates and dry condition.

Through machining parameters was observed a moderate influence of the vegetal-based fluids application, by the slight reduction of the cutting forces in comparison with dry milling. Also is noticed a balance between the two cutting fluids applications, with their values of machining forces very close, practically in

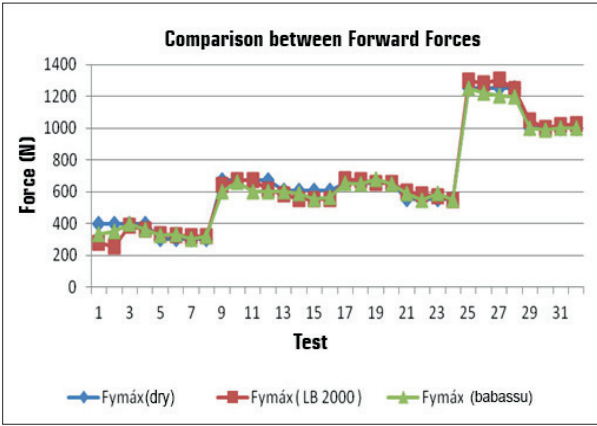
line. These results are presented in Graphs 1, 2 and 3. The machining conditions are those shown on Table 1.

**Graph 1** - Comparison of cutting forces ( $F_{x_{max}}$ ) under different conditions.



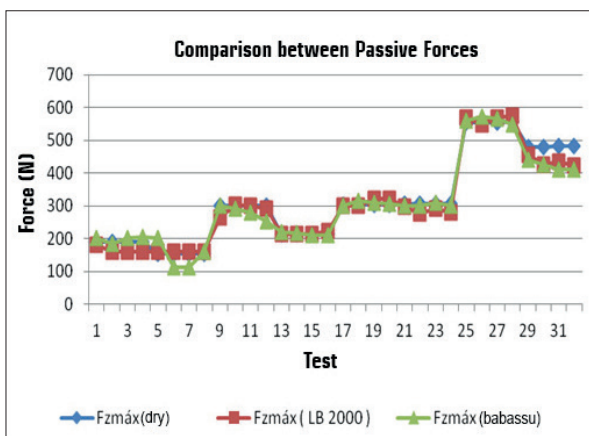
Source: Own work (2024).

**Graph 2** - Comparison of the feed forces ( $F_{y_{max}}$ ) under different conditions.



Source: Own work (2024).

**Graph 3 - Comparison of the passive forces ( $F_{zmax}$ ) under different conditions.**



**Source:** Own work (2024) .

By comparing the three results presented, is verified that the participation of the cutting fluids during the tests allowed a small reduction of machining forces. In the tests from 09 to 12 and from 29 to 32, with the variation of the cutting speed ( $V_c$ ) and the depth of cut ( $a_p$ ) at the same feed rate ( $f_z$ ), there was a reduction in cutting forces ( $F_x$ ); for the tests ranging from 01 to 04 and 13 to 16, with feed rate variation ( $f_z$ ), for a same cutting speed ( $V_c$ ) and depth of cut ( $a_p$ ), there was a reduction in the feed forces ( $F_y$ ); also there was a reduction of the passive force ( $f_z$ ) in the tests of 29 to 32, for the most critical conditions of  $V_c f_z$  and  $a_p$ .

In the results quoted above, the effect of the cutting fluids (applied by the MQF technique) on machining forces is observed, that is, its lubricant-cooling function minimizes the effect of temperature fluctuation in the tool during the cutting process.

The analysis of variance (ANOVA) of the results indicates that, with a confidence interval of 95% and an alpha significance level of 0.05, the lubrication condition has a significant influence on the reduction of the machining forces, as shown on Table 2.

**Table 2** - Experiment analysis with two factor levels 2 \*\* (4 - 0).

| Variable | P - Value | Variable         | P - Value | Variable         | P - Value |
|----------|-----------|------------------|-----------|------------------|-----------|
| Dry      |           | LB 2000<br>Fluid |           | Fluid<br>Babassu |           |
| Fx       | > 0.05    | Fx               | 0.000220  | Fx               | 0.000315  |
| Fy       | > 0.05    | Fy               | 0.000438  | Fy               | 0.000494  |
| Fz       | > 0.05    | Fz               | 0.00326   | Fz               | 0.00716   |

**Source:** Own work (2024) .

## CONCLUSIONS

The results presented allowed some conclusions, considering the testing conditions:

The cutting forces were greater for the critical condition, where the maximum cutting conditions were used ( $V_{cmax}$ ,  $F_{xmax}$  and  $a_{pmax}$ );

The babassu oil used as cutting fluid presented similar results to LB 2000 fluid and better performance when compared to dry conditions, which leads us to believe that it can become a potential substitute for other machining fluids.

## Acknowledgments

The authors are grateful to Coordination for the Improvement of Higher Education personnel (CAPES Brazil) for the financial assistance, to Federal University of Uberlândia (UFU) for the technical guidance and Federal Institute of Maranhao (IFMA) for the materials and machines support to carry out this work.

## REFERENCES

- Binder, M., Klocke, F., & Doeblener, B. (2017). An advanced numerical approach on tool wear simulation for tool and process design in metal cutting. **Simulation Modelling Practice and Theory**, v. 70, p. 65-82.
- Burton, G., Goo, C. S., Zhang, Y., & Jun, M. B. G. (2014). Use of vegetable oil in water emulsion achieved through ultrasonic atomization as cutting fluids in micro-milling. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 16, Issue 3, p. 405-413.
- CIMM - **Center for Metalworking Information**, 2024. Accessed at: [https://www.cimm.com.br/portal/material\\_didatico/4863-forcas-no-fresamento#](https://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/4863-forcas-no-fresamento#).

El Hakim, M. A., Shalaby, M. A., Veldhuis, S. C., & Dosbaeva, G. K. (2015). Effect of secondary hardening on cutting forces, cutting temperature, and tool wear in hard turning of high alloy tool steels. **Measurement**, v. 65, p. 233-238.

Iturbe, A., Giraud, E., Hormaetxe, E., Garay, A., Germain, G., Ostolaza, K., & Arrazola, P. J. (2017). Mechanical characterization and modelling of Inconel 718 material behavior for machining process assessment. **Materials Science and Engineering: A**, v. 682, p. 441-453.

Lee, W., Kim, S. H., Park, J., & Min, B. K. (2017). Simulation-based machining condition optimization for machine tool energy consumption reduction. **Journal of Cleaner Production**, v. 150, p. 352-360.

Machado, A.R., Coelho, R.T., Abrão, A.M, & Da Silva, M.B. (2009). Teoria da Usinagem dos Materiais. **Ed. Edgard Blücher**, São Paulo, p. 384.

Qiu, K., Ming, W., Shen, L., An, Q., & Chen, M. (2017). Study on the cutting force in machining of aluminum honeycomb core material. **Composite Structures**, v. 164, p. 58-67.

Shashidhara, W. M., & Jayaram, S. R. (2010). Vegetable oils as a potential cutting fluid—An evolution. **Tribology International**, v. 43, Issues 5–6, p. 1073-1081.

Shyha, I., Gariani, S., & Bhatti, M. (2015). Investigation of Cutting Tools and Working Conditions Effects when Cutting Ti-6Al-4V using Vegetable Oil-Based Cutting Fluids. **Procedia Engineering**, v. 132, p. 577-584.

Shokoohi, Y., Khosrojerdi, E., & Shiadhi, B. H. R. (2015). Machining and ecological effects of a new developed cutting fluid in combination with different cooling techniques on turning operation. **Journal of Cleaner Production**, v. 94, p. 330-339.

## **AVALIAÇÃO DE ARAMES METAL CORED PARA SOLDAGEM ROBOTIZADA EM AÇO CARBONO COM ALTA DEPOSIÇÃO**

**Juliano Neves Panão**

Universidade Estadual Paulista (UNESP)  
Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula  
Souza (FATEC-SP)  
Lincoln Electric do Brasil

**Marcello Ferrari**

Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula  
Souza (FATEC-SP)

**Edgar de Souza Dutra**

Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula  
Souza (FATEC Itaquera)

# RESUMO

**Objetivo:** Avaliar o desempenho de dois arames Metal Cored, conforme especificações AWS A5.18 e A5.28, em soldagem robotizada de chapas ASTM A36 pelo processo GMAW-P. O estudo teve como foco comparar a eficiência em altas taxas de deposição, as propriedades mecânicas das juntas soldadas e a resistência ao impacto (tenacidade) após tratamento térmico de alívio de tensões (TTAT).

**Métodos:** Foram realizados testes práticos em uma célula robótica, utilizando os arames E70C-GM H4 e E70C-6M H4 em chapas ASTM A36 com espessura de 50 mm. A soldagem foi submetida a parâmetros rigorosos de deposição e alto aporte térmico. Os ensaios incluíram, radiografia, análise química, ensaios de tração, impacto Charpy e ensaios macrográficos para verificar a sanidade das juntas.

**Resultados:** Ambos os arames demonstraram soldabilidade satisfatória e atenderam aos critérios de resistência à tração e alongamento. O arame «A» apresentou maior tenacidade e desempenho superior no ensaio de impacto, destacando-se em aplicações que requerem propriedades mecânicas rigorosas após TTAT. O arame «B», apesar de sua boa soldabilidade, não atendeu ao requisito de impacto. **Conclusão:** O arame «A» é mais adequado para aplicações industriais críticas, garantindo alta taxa de deposição e integridade mecânica em soldagem de chapas espessas ASTM A36 pelo processo Gas Metal Arc Welding pulsado (GMAW-P), atendendo aos requisitos técnicos de projetos avançados.

**Palavras-chave:** soldagem robotizada; Metal Cored; GMAW-P; ASTM A36; taxa de deposição.

## INTRODUÇÃO

O processo de soldagem Gas Metal Arc Welding (GMAW) robotizado é empregado comumente no segmento automotivo em que se deseja atingir aumento na produção e repetibilidade de peças de fabricação seriada, o que não significa dizer ser este o único segmento em que este processo é explorado, pois a cada dia que passa a aplicação robotizada deste processo de soldagem no segmento de máquinas pesadas se torna mais comum em função das demandas atuais e emergentes, com vistas a se atingir maiores índices de produtividade para a garantia da competitividade.

As maiores dificuldades na aplicação deste processo no segmento de máquinas pesadas estão nas dimensões, espessuras e os tipos de materiais envolvidos na fabricação das peças, o que muitas vezes para se atingir os objetivos esperados de produtividade e viabilidade econômica não é tão simples, sendo necessária a exploração de avanços tecnológicos em equipamentos e consumíveis de soldagem, aliados ao pleno conhecimento dos processos e da metalurgia da soldagem (JACKSON *et al.*, 1978) [6].

Como avanço tecnológico do processo GMAW podemos citar o processo GMAW-P, no entanto, em uma célula robótica pode-se considerar este tipo de avanço como “básico” para aplicações de alto desempenho, daí surge a necessidade da busca dos recursos avançados do processo GMAW-P embarcados nos equipamentos de soldagem, em que podemos citar curvas sinérgicas avançadas dedicadas e indicadas para os diferentes tipos de aplicação / segmentos.

Sobre os consumíveis de soldagem, visando o aumento da produtividade e a melhoria do processo em uma aplicação avançada que já utiliza o processo GMAW-P, é inevitável a utilização de arames metal cored, uma vez que estes proporcionam resultados excelentes por se tratar de um material de alta performance. Mesmo assim, este tipo de arame possui algumas limitações que devem ser levadas em consideração, como a faixa operacional indicada pelo fabricante para cada arame em função do seu diâmetro e faixa de corrente de soldagem para a garantir as propriedades mecânicas especificadas por norma.

Atualmente, já existem soluções recomendadas por alguns fabricantes em que é possível o alcance de taxas de deposição acima de 12 kg/h utilizando o processo GMAW-P avançado com arames do tipo metal cored, porém, devem

ser analisadas as características e requisitos da aplicação, além da validação preliminar do arame de soldagem, pelo fato deste ser o elemento fundamental para garantir a integridade da solda e, este fato justifica o estudo de caso realizado a ser apresentado neste trabalho.

Os testes comparativos apresentados a seguir foram realizados com o aço estrutural ASTM A36 [1], soldado com elevadas taxas de deposição e submetido a um tratamento térmico de alívio de tensões após a soldagem.

## MÉTODOS

### Metal de base

O metal de base (MB) empregado neste trabalho foi o aço carbono estrutural especificado pela norma ASTM A36 [1] na condição “como laminado”, compreendendo-se por uma junta de topo com chanfro  $\frac{1}{2}$  "V" e ângulo de 45°, apresentando espessura de 50 mm. A Tabela 1 mostra a composição química e as propriedades mecânicas de acordo com esta especificação e os valores reais encontrados na chapa utilizada.

**Tabela 1** - Composição química e propriedades mecânicas da chapa de testes.

|                        | Elementos (%) |             |       |       |             | Propriedades Mecânicas |          |           |
|------------------------|---------------|-------------|-------|-------|-------------|------------------------|----------|-----------|
|                        | C             | Mn          | P     | S     | Si          | TR (Mpa)               | LE (Mpa) | Along.(%) |
| <b>ASTM A36</b>        | 0,26          | 0,80 a 1,20 | 0,03  | 0,03  | 0,15 a 0,40 | 400 a 550              | 250 mín. | 20 mín.   |
| <b>Análise Química</b> | 0,13          | 1,09        | 0,019 | 0,012 | 0,28        | 478                    | 293      | 32        |

**Fonte:** Adaptado da especificação ASTM A36 (2019) [1].

### Metais de adição testados

Neste teste comparativo foram utilizados dois diferentes arames do tipo metal cored no diâmetro de 1,6 mm, conforme as especificações do comitê A5 da American Welding Society (AWS) (Committee on Filler Metals and Allied Materials) sendo, o primeiro (A) seguindo a especificação AWS A5.28 [2] sob a classificação E70C-GM H4 e o segundo (B) seguindo a especificação AWS A5.18 [3] sob a classificação E70C-6M H4, conforme tabela abaixo:

**Tabela 2** - Composição química arames de solda conforme certificado.

| Metais de adição |               |               | Composição Química (%) |      |      |       |       |      |      |      |      |      |
|------------------|---------------|---------------|------------------------|------|------|-------|-------|------|------|------|------|------|
|                  | Especificação | Classificação | C                      | Mn   | Si   | P     | S     | Ni   | Cr   | Mo   | V    | Cu   |
| A                | AWS A5.28     | E70C-G H4     | 0,034                  | 0,89 | 0,46 | 0,013 | 0,019 | 2,96 | 0,03 | .... | .... | .... |
| B                | AWS A5.18     | E70C-6M H4    | 0,04                   | 1,42 | 0,66 | 0,01  | 0,013 | 0,42 | 0,04 | 0,01 | .... | 0,05 |

**Fonte:** Certificado de qualidade do lote dos arames "A" e "B"(2023).

A especificação AWS A5.18 [3] classifica arames maciços e metal cored para a soldagem dos aços ao carbono e a especificação AWS A5.28 [2] classifica arames maciços e metal cored para a soldagem de aços de baixa liga. Como a especificação AWS A5.28 [2] trata de consumíveis para a soldagem de aços de baixa liga, não existe a restrição para os teores de elementos de liga conforme indicado acima. Esta especificação também proporciona a possibilidade da classificação "G" (geral - de acordo com as necessidades da aplicação / cliente), desta forma, o arame "A" foi escolhido por ser da mesma classe de resistência requerida para a soldagem do aço ASTM A36 [1] e com um teor de níquel maior, buscando a garantia das propriedades (Tabela 3) em função do tratamento térmico de alívio de tensões pós soldagem (TTAT) de 8 horas.

**Tabela 3** - Propriedades mecânicas arame "A".

|                                  | Limite de escoamento<br>Mpa (ksi) | Res. mínima a tração Mpa (ksi) | Alongamento (%) | Charpy V-Notch - J (°C) |
|----------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|-----------------|-------------------------|
| Requisito AWS A5.28 E70C-GM H4   | G                                 | 490 (70) min                   | G               | G                       |
| Resultados típicos (normalizado) | 393                               | 493                            | 32              | 57 (-50 °C)             |

**Fonte:** Certificado de qualidade do lote do arame "A" (2023).

Já a especificação AWS A5.18 [3], o teor dos elementos Ni, Cr, Mo e V não podem ultrapassar 0,50% e desta forma, o arame "B" foi um dos arames escolhidos para este trabalho devido ao seu percentual de Níquel próximo do limite máximo da classificação, sendo este elemento (Ni) benéfico para o alcance do requisito de impacto na condição de TTAT, conforme Tabela 4.

**Tabela 4 - Propriedades mecânicas arame "B".**

|                                          | Limite de escoamento<br>Mpa (ksi) | Res. mínima a tração<br>Mpa (ksi) | Alongamento (%) | Charpy V-Notch J (°C) |
|------------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------|-----------------------|
| <b>Requisito AWS A5.18 E70C-6M H4</b>    | 400 (58) min                      | 490 (70) min                      | 22 min          | 27 min (-30°C)        |
| <b>Resultados típicos (como soldado)</b> | 450-510 (65-75)                   | 510-590 (75-85)                   | 26-30           | 40-75 (-40 °C)        |

**Fonte:** Certificado de qualidade do lote do arame "B" (2023).

Pela aplicação em questão requerer TTAT e ter requisito de impacto a ser alcançado, sugere-se que seja utilizado um consumível de soldagem que possua elementos de liga capazes de proporcionar condições para que sejam alcançados tais requisitos. Altos aportes de calor podem formar microestruturas frágeis em que a tenacidade ao impacto pode ser ainda mais prejudicada após o TTAT.

Para o aço ASTM A36 [1] a recomendação para a escolha de um consumível deste tipo para a soldagem seria o AWS A5.18 [3], porém não existem materiais nesta especificação recomendados para aplicações com TTAT de acordo a aplicação em questão. Já na especificação AWS A5.28 [2], como trata de consumíveis para aços de baixa liga, existe a possibilidade de enquadramento de materiais ligados para o atendimento de condições mais severas, mesmo que com baixa resistência.

### **Definição do pré-aquecimento**

A temperatura de pré-aquecimento foi definida de acordo com a norma Petrobras N-133 Rev. N [4] de acordo com o cálculo do carbono equivalente (CE) e consulta à Tabela 2 da referida norma.

A análise da composição química do material utilizado neste trabalho conforme mostrada na Tabela 1, foi Obtida por meio de espectroscopia ótica de emissão, onde o valor encontrado de carbono equivalente foi de 0,37, sendo recomendada e adotada a temperatura de pré-aquecimento de 75 °C.

### **Tratamento térmico de alívio de tensões pós soldagem (TTAT)**

O tratamento térmico de alívio de tensões tem como principal objetivo reduzir as tensões residuais que ficam acumuladas em uma estrutura devido aos processos de fabricação. É importante diferenciar esse procedimento do

tratamento térmico de alívio de tensões pós-soldagem (TTAT). Enquanto o primeiro foca exclusivamente no alívio das tensões, o TTAT busca também conferir à estrutura propriedades metalúrgicas específicas ou características desejáveis, além de reduzir as tensões residuais (BAILEY, 1981) [5].

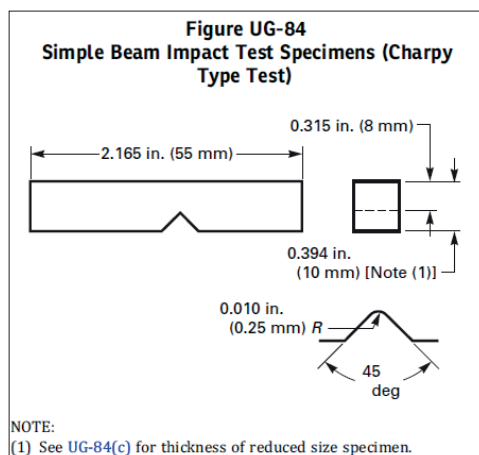
É comum que a maioria das soldas em materiais ferríticos passe TTAT para aumentar a tenacidade à fratura nas zonas afetadas pelo calor (ZAC) (ASM, 1991) [7].

Neste trabalho, o TTAT foi realizado de acordo com ASME Seção VIII Div. 1 [9], que estabelece no item UCS-56 as diretrizes para a realização deste tratamento. A recomendação para o início e final de controle da temperatura é de 425 °C com temperatura de patamar mínima de 595 °C (600 °C adotado), a taxa de aquecimento de 100 °C/h e de 140 °C/h para o resfriamento foram as adotadas para este controle. O tempo de patamar adotado foi de 8 horas para a garantia de 2 ciclos de TTAT para espessuras de até 200 mm.

## Ensaio de impacto Charpy

O ensaio de impacto Charpy será realizado de acordo com o código ASME Seção VIII Div. 1 [9] onde os corpos de prova deverão ser removidos do metal de solda a 1,5 mm da superfície e entre  $\frac{1}{4}$  e  $\frac{1}{2}$  da superfície na zona fundida. Neste trabalho não foi realizado o teste de impacto na zona afetada pelo calor (ZAC) por ainda se tratar de um teste preliminar de soldabilidade e avaliação da performance do arame de soldagem.

**Figura 1** - Corpo de prova para ensaio de impacto Charpy de acordo com ASME Seção VIII Div.1.



**Fonte:** (ASME BPVC Seção VIII Div.1 – 2015). [9]

Para cada região e temperatura a ser avaliada, foi removido um “set” constituído por cinco corpos de prova, sendo descartados o menor e o maior valor e a média encontrada deverá ser superior a 27 Joules nas temperaturas avaliadas. Para aprovação do teste de impacto, nenhum valor dentre os 3 utilizados para o cálculo da média pode ser inferior a 20 Joules. As temperaturas de ensaio avaliadas foram a 0°C e a +20°C.

### **Célula robótica de soldagem**

A célula de robótica utilizada na soldagem das peças de testes avaliadas neste trabalho apresenta dimensões de 2946 x 2387 x 2514 mm, com uma área útil de 2438 x 914 mm. A estrutura é composta por uma mesa fixa, um robô Fanuc Arc Mate 120iC [8] e uma fonte de soldagem Lincoln Powerwave S700 [10], capaz de operar com 44 V e 700 A a 100% do ciclo de trabalho (Figura 2).

**Figura 2** - Célula Lincoln AUTO-MATE® SS e Robô Fanuc Arc Mate 120iC e fonte PW S700.



**Fonte:** (<http://www.lincolnelectric.com.br/equipamentos/sistemas-automatizados/>).

### **Justificativa para a realização dos testes práticos para avaliação dos arames**

Já existem soluções recomendadas por alguns fabricantes em que é possível o alcance de taxas de deposição acima de 15 kg/h utilizando um arame do tipo metal cored de 1,6 mm em soldagem GMAW, mas ainda existem algumas limitações sobre as classes de materiais a serem soldados e os requisitos a serem atingidos, por serem totalmente dependentes dos tipos de consumíveis de soldagem existentes e da aplicação a ser desenvolvida.

Os desafios postos para se alcançar os requisitos desejados de propriedades mecânicas do material do projeto em conjunto com o requisito adicional

de resistência ao impacto acima de 27 J a + 20 °C após um TTAT a 600°C/ 8 h, estavam principalmente em alcançar a taxa de deposição esperada, sendo necessária realização da soldagem em correntes de soldagem acima de 500 A.

Para garantir o preenchimento da junta em função dos parâmetros e da velocidade de soldagem elevados, o aporte de calor médio imposto na junta foi de 2,5 kJ/mm. Um alto aporte de calor promoveria a formação de estruturas grosseiras, afetando de forma deletéria o comportamento da junta diante das solicitações mecânicas. Deste modo, o correto balanceamento do aporte de calor torna-se fundamental para garantir propriedades mecânicas e de tenacidade aceitáveis para a junta soldada, especialmente para estruturas onde há requisitos de impacto (FERRARI, 2019) [11].

Apesar do teste de impacto não ser mandatário para a especificação ASTM 36 [1], algumas normas europeias adotam o requisito de impacto como mandatário em algumas classificações, como na EN 10025-2 S235JR [12], similar ao ASTM A36 [1], em que o valor mínimo de energia absorvida no teste de impacto deve ser acima de 27 J na temperatura de +20 °C, sendo este o valor adotado nos testes realizados como critério de aceitação e também ser um material do mesmo grupo (P1Gr.1) de acordo com o código ASME Seção IX [13], norma a ser adotada para a qualificação do procedimento de soldagem após a validação do arame a ser empregado.

## **Testes práticos para avaliação dos arames**

Os testes práticos foram realizados em célula robótica composta por um robô de 6 eixos modelo Fanuc Arc Mate 120iC [8] e fonte de soldagem Lincoln Powerwave S700 [10]. Para facilitar o alcance dos melhores resultados de taxa de deposição x controle do aporte de calor, foram feitos vários testes preliminares com diferentes tipos de curvas (programações) sinérgicas e não sinérgicas do equipamento de soldagem com o objetivo de encontrar a melhor condição de soldagem, mantendo a melhor estabilidade de arco e o mínimo de turbulências, uma vez que a condição de soldagem imposta se encontraria em uma faixa operacional atípica.

## Resumo da soldagem com o arame "A" (MC 420N-H)

A soldagem com este arame proporcionou excelente soldabilidade e ampla faixa operacional de parâmetros, sendo que mesmo fora da faixa recomendada pelo fabricante, nenhuma solda apresentou porosidade. Escória vítrea foi gerada durante a soldagem, sendo removida a cada passe para evitar a ocorrência de defeitos.

A mistura gasosa utilizada foi de 80% Ar + 20% CO<sub>2</sub> com uma vazão de 25 l/min e distância bico peça de 32 mm, alguns passes soldados com os parâmetros mais altos foram esmerilhados para verificar a existência de porosidade interna, porém este defeito não foi encontrado em nenhum cordão.

A partir da quinta camada trabalhou-se com os parâmetros de soldagem mais elevados (750 IPM WFS; 570 – 610 A; 39,6 – 40,0 V e velocidade de soldagem entre 45,0 e 55,0 cm/min), sendo mantida excelente estabilidade de arco. Notou-se que os parâmetros de soldagem mais elevados citados poderiam ter sido utilizados a partir da terceira camada nesta junta.

De acordo com o acompanhamento da soldagem através do sistema de monitoramento do equipamento, a taxa de deposição mínima foi de 7,7 kg/h; a média de 14,5 kg/h e máxima de 16,9 kg/h, seguido dos parâmetros de soldagem médios de 515 A e 37,4 V. A variação de aporte de calor entre 2,2 e 2,8 kJ/mm também foi verificada. Para o cálculo da taxa de deposição, foram realizados testes preliminares em ambos os arames para o levantamento da densidade de cada um, dado necessário para inclusão no sistema de monitoramento do equipamento de soldagem.

Para o enchimento total da junta com este arame (Figura 4), foram realizados 37 passes em 11 camadas proporcionando um depósito de solda na junta de 6,3 kg.

**Figura 4** - Peça soldada com o arame "A" (MC420N-H) finalizada.



**Fonte:** Autores (2023).

## Resumo da soldagem com o arame “B” (MC-70 XLS)

A soldagem com este arame também proporcionou excelente soldabilidade e ampla faixa operacional. Com relação ao arame testado anteriormente, apesar do melhor acabamento e aspecto visual, durante a soldagem percebeu-se maior sensibilidade à variação dos parâmetros de tensão de arco e velocidade de soldagem.

Outro ponto que chamou a atenção foi o volume de escória vítrea baixíssimo em relação ao arame testado anteriormente.

As soldas foram realizadas com uma mistura gasosa de 80% Ar + 20% CO<sub>2</sub>, vazão de 25 l/min e distância bico peça entre 32 e 35 mm. Esta peça foi soldada procurando se trabalhar com os parâmetros mais altos desde a terceira camada com o objetivo de realmente se definir os limites, percebeu-se que o controle da velocidade de soldagem foi fundamental para o alcance dos melhores resultados.

Nesta junta (Figura 5), taxa de deposição mínima de 8,52 kg/h; média de 11,95 kg/h e a máxima de 16,2 kg/h, seguido de 439 A e 35,5 V médios. O maior aporte de calor registrado foi próximo de 2,8 kJ/mm, enquanto o menor foi de aproximadamente 1,8 kJ/mm.

**Figura 5** - Peça soldada com o arame “B” (MC-70 XLS™) finalizada.



**Fonte:** Autores (2023).

## RESULTADOS

Este trabalho foi desenvolvido com base em um estudo de caso alinhado ao referencial teórico, com o objetivo de realizar testes práticos para avaliar dois tipos de arames metal cored. A proposta buscou verificar se tanto o desempenho do arco elétrico quanto os resultados obtidos atenderiam às exigências de alta taxa de deposição e às propriedades mecânicas necessárias para atender aos requisitos das juntas soldadas, visando sua aplicação no segmento de máquinas pesadas.

## Testes realizados

Após o término das soldas, foram realizados os testes conforme abaixo:

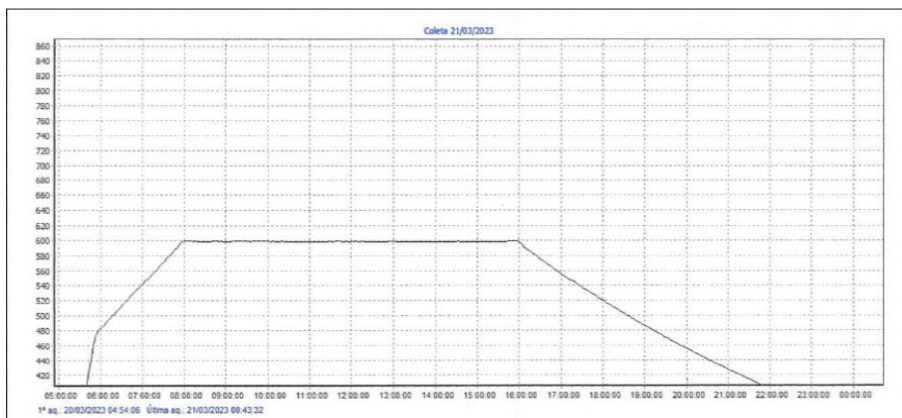
- Radiografia;
- TTAT;
- Análise química;
- Tração do metal de solda à metade da espessura de depósito;
- Impacto Charpy nas temperaturas de +20°C e a 0°C, com os corpos de prova retirados a 1,5 mm da superfície e entre ¼ e ½ da superfície;
- Ensaio macrográfico.

O TTAT e os ensaios mecânicos foram realizados em laboratórios credenciados pelo INMETRO.

## Tratamento térmico de alívio de tensões pós soldagem (TTAT)

O TTAT das duas chapas de teste foi realizado em uma única carga. O processo seguiu o ciclo apresentado na Figura 6, garantindo uniformidade nas condições aplicadas.

**Figura 6** - Gráfico TTAT chapas de testes MC420N-H e MC-70 XLS.



**Fonte:** Laboratório credenciado (2023).

Na Tabela 5, são comparadas as condições especificadas para o tratamento térmico com as efetivamente observadas, destacando eventuais diferenças e seus impactos no resultado.

**Tabela 5** - Especificado / realizado TTAT chapas de testes MC420N-H e MC-70 XLS™

|                                         | Especificado | Encontrado |
|-----------------------------------------|--------------|------------|
| Temperatura de início de controle (°C)  | 425          | 425        |
| Taxa máxima de aquecimento (°C)         | 100          | 88         |
| Temperatura de tratamento (°C)          | 600          | 600        |
| Tempo de tratamento (min)               | 480          | 480        |
| Taxa máxima de resfriamento (°C)        | 140          | 35         |
| Temperatura de término de controle (°C) | 425          | 125        |

**Fonte:** Adaptado do Laboratório credenciado (2023).

### Análise química

A análise química do metal de solda não diluído nas amostras foi realizada utilizando espectrometria de emissão óptica para determinar os elementos químicos presentes.

A preparação das amostras foi realizada seguindo a especificação ASTM A751: 2020 [14] e o método de ensaio ASTM E415: 2021 [15].

Os resultados encontrados de análise química estão de acordo com os certificados dos materiais testados (Tabela 6), as divergências apontadas em alguns elementos podem ser consideradas normais em função das diferenças de energia de soldagem empregados no teste de lote, equipamentos de medição e testes.

**Tabela 6** - Comparativo análises químicas certificado x realizado

| Metais de adição    |             | Composição Química (%) |      |      |       |       |      |      |      |       |       |
|---------------------|-------------|------------------------|------|------|-------|-------|------|------|------|-------|-------|
| Classificação       | Fonte       | C                      | Mn   | Si   | P     | S     | Ni   | Cr   | Mo   | V     | Cu    |
| <b>A</b> E70C-G H4  | Certificado | 0,034                  | 0,89 | 0,46 | 0,013 | 0,019 | 2,96 | 0,03 | .... | ....  | ....  |
|                     | Laboratório | 0,033                  | 1,09 | 0,53 | 0,009 | 0,018 | 2,87 | 0,04 | 0,01 | 0,003 | 0,047 |
| <b>B</b> E70C-6M H4 | Certificado | 0,04                   | 1,42 | 0,66 | 0,01  | 0,013 | 0,42 | 0,04 | 0,01 | ....  | 0,05  |
|                     | Laboratório | 0,05                   | 1,55 | 0,64 | 0,005 | 0,013 | 0,38 | 0,02 | 0,01 | 0,04  | 0,021 |

**Fonte:** Autores (2023).

## Ensaio de tração

Os ensaios de tração para a obtenção das propriedades indicadas abaixo foram realizados à temperatura ambiente de 23°C.

Os corpos de prova para este ensaio, em ambas as peças foram retirados após o TTAT do centro da solda e foram preparados seguindo a especificação ASTM A370: 2022 (Figura 4) , bem como o método de ensaio que seguiu a mesma especificação citada.

Os critérios de aceitação seguiram as especificações AWS A5.28 [2] e AWS A5.18 [3] onde os resultados são apresentados abaixo:

**Tabela 7** - Requisitos mecânicos atingidos na peça de teste soldada com o arame "A".

|                             | Especificado | Encontrado |
|-----------------------------|--------------|------------|
| Limite de escoamento (Mpa)  | G            | 517        |
| Limite de resistência (Mpa) | 490          | 615        |
| Alongamento (%)             | G            | 22         |

Fonte: Autores (2023).

**Tabela 8** - Requisitos mecânicos atingidos na peça de teste soldada com o arame "B"

|                             | Especificado | Encontrado |
|-----------------------------|--------------|------------|
| Limite de escoamento (Mpa)  | 400          | 473        |
| Limite de resistência (Mpa) | 490          | 592        |
| Alongamento (%)             | 22           | 22         |

Fonte: Autores (2023).

## Ensaio de impacto

O ensaio de impacto, utilizado para analisar a quantidade de energia absorvida na zona fundida, foi conduzido nas temperaturas de +20 °C e 0 °C. Para atender aos critérios de aprovação, os corpos de prova foram retirados das peças após o TTAT, posicionados a 1,5 mm e entre 1/4 e 1/2 da espessura em relação à superfície (transversais à solda), feito isso foram preparados seguindo a especificação ASTM A370 [16] (Figura 1), bem como o método de ensaio que seguiu a mesma especificação citada.

A temperatura de +20 °C para a realização do teste de impacto foi definida em função do projeto de construção da peça, sendo que para aprovação, a energia mínima absorvida deve ser de no mínimo 27 J. Já a temperatura de 0 °C para este

teste foi definida com o objetivo de avaliar se haveria diferença significativa de resultados em função desta diferença de temperatura.

As especificações AWS A5.18 [3] e AWS A5.28 [2] estabelecem o critério de aceitação para o teste de impacto, no qual o maior e o menor valores obtidos nos cinco ensaios devem ser desconsiderados no cálculo da tenacidade. Dois dos três valores restantes devem ser iguais ou superiores ao valor referente ao requisito da classificação avaliada, no nosso caso 27 J. Um dos três valores restantes pode ser inferior a 27 J, mas não inferior a 20 J e a média dos três valores considerados não deve ser inferior à energia absorvida especificada, em nosso caso 27 J.

O item 7.6.5 da norma AWS B4.0: 2016 [17] define que quando for necessária uma avaliação do metal base ou ZAC (zona afetada pelo calor) ou ambos, a localização do corpo de prova e a localização do entalhe devem ser especificadas. Como nos testes realizados a área de interesse é a zona fundida, neste caso a orientação do entalhe não foi relevante para a realização do ensaio, os resultados obtidos são mostrados na Tabela 9.

**Tabela 9 - Resultados ensaio de impacto Charpy.**

| Arame | Especificação | Classificação | Localização             | Temperatura (°C) | Energia (J) |
|-------|---------------|---------------|-------------------------|------------------|-------------|
| A     | AWS A5.28     | E70C-GM       | 1,5 mm da superfície    | +20              | 125         |
|       |               |               | de 1/4 a 1/2 superfície | +20              | 115         |
|       |               |               | 1,5 mm da superfície    | 0                | 85          |
|       |               |               | de 1/4 a 1/2 superfície | 0                | 116         |
| B     | AWS A5.18     | E70C-6M       | 1,5 mm da superfície    | +20              | 29          |
|       |               |               | de 1/4 a 1/2 superfície | +20              | 30          |
|       |               |               | 1,5 mm da superfície    | 0                | 12          |
|       |               |               | de 1/4 a 1/2 superfície | 0                | 22          |

**Fonte:** Autores (2023).

O arame “A” foi aprovado no teste de impacto após TTAT 600 °C por 8 horas tanto na temperatura de +20 °C quanto na temperatura de 0 °C. Este material foi desenvolvido para atender o tratamento térmico de normalização realizado a 900 °C por 4 horas, garantindo um valor típico acima de 50 J de energia absorvida a temperatura de -50 °C, utilizando-se uma mistura gasosa de 80% Ar + 20% CO<sub>2</sub>,

porém não havia nenhuma evidência sob a condição de TTAT realizado a uma temperatura de 600 °C por 8 horas.

Na temperatura de ensaio de +20 °C, conforme apresentado na Tabela 10, as médias dos valores de energia absorvida ficaram próximas ou acima de 27 J. No entanto, em ambos os casos, um dos corpos de prova apresentou valores inferiores a 20 J.

Esses resultados não atendem aos critérios estabelecidos pela especificação AWS A5.18 [3], que exige que, em um “set” de cinco corpos de prova, o maior e o menor valor sejam descartados e a média dos três valores restantes deve ser superior a 27 J, sendo que nenhum dos valores utilizados para o cálculo da média pode ser inferior a 20 J.

**Tabela 10** - Resultados teste de impacto arame “B” a 20°C.

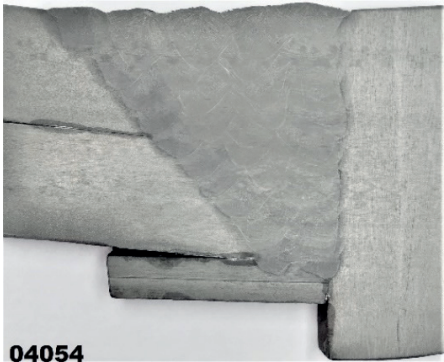
| Localização             | Temperatura de ensaio (°C) | Energia absorvida (J) |      |      |       |
|-------------------------|----------------------------|-----------------------|------|------|-------|
|                         |                            | CP1                   | CP2  | CP3  | média |
| 1,5 mm da superfície    | 20°C                       | 34,1                  | 13,7 | 40,1 | 29,3  |
| de 1/4 a 1/2 superfície | 20°C                       | 31,0                  | 14,8 | 44,2 | 30,0  |

**Fonte:** Autores (2023).

**Macrografias**

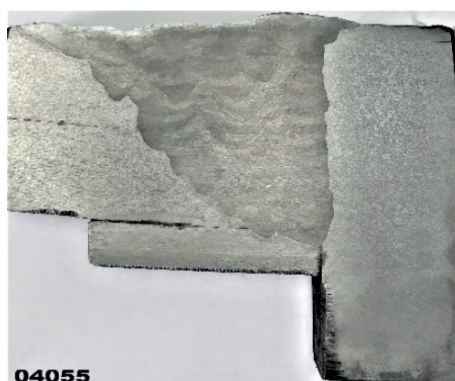
A macrografias das juntas soldadas com ambos os arames (“A” MC420N-H” e “B” MC-70 XLS™), demonstraram-se isentas de descontinuidades nas zonas fundidas conforme demonstradas respectivamente nas Figuras 7 e 8, evidenciando a sanidade delas.

**Figura 7** - Macrografia solda realiza da com o arame “A” (MC420N-H)



**Fonte:** Laboratório credenciado (2023).

**Figura 8** - Macrografia solda realizada com o arame "B" (MC-70 XLS™)



Fonte: Laboratório credenciado (2023).

## DISCUSSÕES

### Influência da Composição Química

O arame "A", com maior teor de níquel, demonstrou desempenho superior, especialmente no ensaio de impacto. O níquel contribuiu para a tenacidade da junta soldada, mesmo após o tratamento térmico de alívio de tensões, enquanto o arame "B" apresentou limitações devido à composição química menos favorável.

### Impacto do Tratamento Térmico

O ciclo térmico empregado no TTAT foi eficaz na mitigação de tensões residuais, mas impôs desafios às propriedades mecânicas, particularmente para o arame "B". O desempenho inferior deste arame reforça a necessidade de consumíveis adaptados a condições severas.

### Taxas de Deposição e Estabilidade de Arco

O arame "A" apresentou maior estabilidade operacional em altas taxas de deposição, alcançando uma média de 14,5 kg/h e máxima de 16,9 kg/h, enquanto o arame "B" mostrou-se mais sensível às variações de parâmetros, limitando sua aplicação em condições críticas (Figuras 4 e 5).

## **Implicações Práticas**

Os resultados mostraram que o arame "A" é adequado para aplicações que exigem alta taxa de deposição e propriedades mecânicas rigorosas, como soldagem de chapas espessas ASTM A36 pelo processo GMAW. A escolha correta do consumível é essencial para atender aos requisitos técnicos do projeto e otimizar a produtividade.

## **CONCLUSÃO**

Os testes realizados permitiram comparar de forma detalhada o desempenho de dois tipos de arames metal cored, ambos adequados para a soldagem de chapas espessas de aço ASTM A36 [1] pelo processo GMAW-P. Essa análise demonstrou que, embora ambos os arames atendam aos requisitos básicos de soldabilidade, taxas de deposição, resistência à tração e alongamento, o arame "A" destacou-se por sua superioridade em relação à tenacidade, especialmente após o TTAT a 600 °C por 8 horas.

A composição química, com maior teor de níquel no arame "A", foi um fator determinante para os resultados superiores, evidenciando a importância de um consumível alinhado às exigências específicas do projeto. Este arame também mostrou excelente estabilidade de arco e alta eficiência em condições críticas, sendo capaz de atingir taxas de deposição superiores a 15 kg/h, sem comprometer as propriedades mecânicas das juntas soldadas.

Conclui-se que o arame "A" é a escolha mais indicada para aplicações que demandam elevada produtividade e propriedades mecânicas rigorosas, como a soldagem de chapas espessas em contextos industriais críticos. Esse estudo reforça a relevância da seleção criteriosa de consumíveis no desenvolvimento de soluções avançadas em soldagem, promovendo confiabilidade e eficiência em projetos de alta exigência técnica.

## **Agradecimentos**

Agradecemos à Lincoln Electric do Brasil por ter apoiado todo este desenvolvimento e a realização deste trabalho, disponibilizando toda a infraestrutura em

equipamentos e consumíveis de soldagem, células robóticas e demais insumos necessários para a realização, além do patrocínio dos testes realizados.

## REFERÊNCIAS

- [1] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **A36/A36M: Specification for carbon structural steel**. ASTM, 2014.
- [2] AMERICAN WELDING SOCIETY. **A5.28: Specification for low-alloy steel electrodes and rods for gas shielded arc welding**. AWS, 2020.
- [3] AMERICAN WELDING SOCIETY. **A5.18: Specification for carbon steel electrodes and rods for gas shielded arc welding**. AWS, 2017.
- [4] PETRÓLEO BRASILEIRO S.A. **N-133 Ver. N: Soldagem**. Petrobras, 2017.
- [5] BAILEY, N. The metallurgical effects of residual stresses. *In*: RESIDUAL STRESSES. **The Welding Institute**, 1981. p. 28-33.
- [6] JACKSON, C. E.; *et al.* **Metallurgy and weldability of steels**. Welding Research Council, 1978.
- [7] AMERICAN SOCIETY FOR METALS. **Metal handbook: heat treating**. v. 4. 1991.
- [8] LINCOLN ELECTRIC. **Célula Lincoln Auto-Mate SS-DS**. Disponível em: <http://www.lincolnelectric.com.br/equipamentos/sistemas-automatizados/>. Acesso em: 06 jul. 2023.
- [9] AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **ASME Section VIII Div. 1: Design and fabrication of pressure vessels – Boiler and Pressure Vessel Code**. ASME, 2015.
- [10] LINCOLN ELECTRIC. **Recursos avançados: Fonte de soldagem Powerwave S700 – Welding Technology**. Disponível em: <https://powerwave.lincolnelectric.com/>. Acesso em: 06 jul. 2023.
- [11] FERRARI, M.; NEVES, M. D. M.; PANÃO, J. N. **Análise das propriedades mecânicas de juntas de aço carbono estrutural soldadas pelo processo arco submerso com os arcos simples e duplo (Tandem-Arc)**. *Soldagem & Inspeção*, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0104-9224/SI2304.07>. Acesso em: 06 jul. 2023.
- [12] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN EN 10025-2: Standard hot rolled products of structural steels – Part 2: Technical delivery conditions for non-alloy structural steel**. DIN, 2004.
- [13] AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **ASME Section IX: Qualification standard for welding and brazing procedures, welders, brazers and welding and brazing operators – Boiler and Pressure Vessel Code**. ASME, 2019.
- [14] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **A751/A751M: Standard test methods and practices for chemical analysis of steel products**. ASTM, 2020.
- [15] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **E415/E415M: Standard test method for analysis of carbon and low-alloy steel by spark atomic emission spectrometry**. ASTM, 2021.
- [16] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **A370/A370M: Standard test methods and definitions for mechanical testing of steel products**. ASTM, 2022.
- [17] AMERICAN WELDING SOCIETY. **B4.0: Standard methods for mechanical testing of welds**. AWS, 2016.

## **AVALIAÇÃO DA ZONA TERMICAMENTE AFETADA EM AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO SUBMETIDO AO PROCESSO DE CORTE PLASMA**

**Rafael Henrique Ribeiro Escotenisce**  
Centro Universitário das Faculdades Integradas de  
Ourinhos (Unifio/FEMM)

**Pedro Henrique Aquino Oliveira**  
Centro Universitário das Faculdades Integradas de  
Ourinhos (Unifio/FEMM)

**Gustavo José Corrêa Gonçalves**  
Centro Universitário das Faculdades Integradas de  
Ourinhos (Unifio/FEMM)

**Fernando Sabino Fontequê Ribeiro**  
Centro Universitário das Faculdades Integradas de  
Ourinhos (Unifio/FEMM)

# RESUMO

O artigo apresenta um estudo sobre o corte a plasma em aplicações industriais, destacando tópicos fundamentais como o funcionamento do corte a plasma, tipos de máquinas, parâmetros de corte e suas influências no acabamento e nas características da peça cortada. A pesquisa incluiu revisão bibliográfica em artigos científicos e teses, além de experimentos práticos com uma máquina de corte HyperTherm HPR130 em aço inoxidável AISI-304. O estudo avaliou os parâmetros de corte e a Zona Termicamente Afetada (ZTA), concluindo que o corte a plasma é eficiente e a ZTA gerada é pequena, não interferindo significativamente nas propriedades da peça. Os resultados indicam que o processo de corte a plasma é ideal para aço inoxidável devido à sua precisão e baixa distorção microestrutural, sendo compatível com processos subsequentes, como soldagem.

**Palavras-chave:** plasma; parâmetro de corte; aço.

## INTRODUÇÃO

O processo de corte a plasma surgiu aproximadamente em 1995 e vem passando por melhorias de seu processo, e hoje é uma tecnologia muito utilizada. Segundo Mougo *et al.* (2018) a velocidade de corte em chapas metálicas finas apresentada pelo processo de corte a plasma supera o processo de oxicorte, aliando essa característica ao preço dos equipamentos de plasma cada vez mais baratos. De acordo com Mesquita e Rugani (1997), o corte plasma tem aplicações na espessura de 3mm a 25mm, sendo possível aplicá-lo em espessuras de até 80mm com velocidades de corte e custo operacional mais atrativos do que as outras tecnologias.

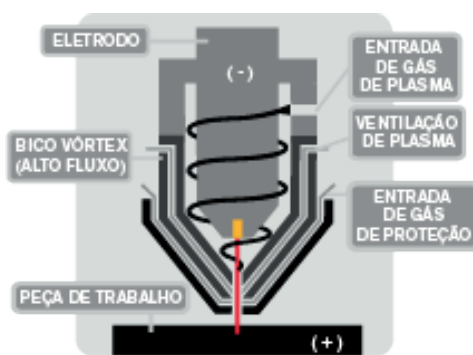
O processo de abertura do arco acontece através de um ignitor de alta frequência ou de um arco-piloto. Este arco piloto pode ser obtido por meio de um circuito de alta frequência ligado a um circuito de alta potência. Já o processo de aquecimento do metal ocorre com o auxílio do arco elétrico, que provoca em uma coluna de gás um aumento suficiente de sua temperatura para gerar impactos entre as moléculas que causarão um certo grau de dissociação e ionização. Esse gás ionizado irá passar por um orifício de parede fria, onde sofrerá um gradiente de temperatura entre o centro e a sua parte de fora, fazendo com que a densidade no centro diminua favorecendo o aumento de energia dos elétrons que agora terão energia suficiente para ionizar outros átomos. Este fenômeno acarreta um aumento do grau de ionização e da temperatura do arco, levando a um aumento da taxa de energia transferida para a peça (Wainer; Brandi; Mello, 2010).

Segundo Pimenta (2013), o corte pode ser manual ou mecanizado, com velocidade elevada e pode ser iniciado em qualquer ponto da peça. O jato de plasma funde e elimina o metal de base com grande eficiência, derivando em uma superfície com excelente acabamento, precisão dimensional, pequena distorção. Existem vários modelos de equipamentos que utilizam o corte a plasma, e pode-se citar os seguintes:

- Plasma convencional de fluxo único: Geralmente este processo usa um único gás (normalmente ar ou nitrogênio) que tanto produz quanto resfria o plasma (Hypertherm, 2023);

- Plasma de fluxo duplo (sem proteção): Este processo utiliza dois gases: um para o plasma e outro como um gás de proteção. Em sistemas menores (menos de 125 A), o ar comprimido é geralmente usado como gás de proteção e de plasma. Os sistemas de gás duplo sem proteção têm um bico exposto e não devem ser usados no corte por arrasto;
- Plasma de fluxo duplo (com proteção): Esse processo utiliza dois gases, um gás de plasma e um gás de proteção. Em sistemas com menos de 125 A, o ar geralmente é usado como gás de plasma e proteção. A vantagem da tecnologia de bocal é que ela isola eletricamente o bico do contato com o escape de metal derretido da perfuração, e também permite o corte por arrasto em aplicações manuais (Hypertherm, 2023). Como ilustrado na Figura 1.
- Plasma de alta definição: Nesse processo, um design específico de bico estreita o arco e aumenta a densidade de energia. Por causa da maior energia do arco, o plasma de alta definição alcança uma qualidade de corte superior em materiais de até 50 mm com angularidade superior de borda de corte, kerf mais estreito e maiores velocidades de corte do que a tecnologia de corte a plasma convencional. Não é incomum esses sistemas conseguirem uma precisão de peça cortada na faixa de +/- 0,25 mm (Hypertherm, 2023);

**Figura 1**



**Fonte:** Hypertherm, (2023).

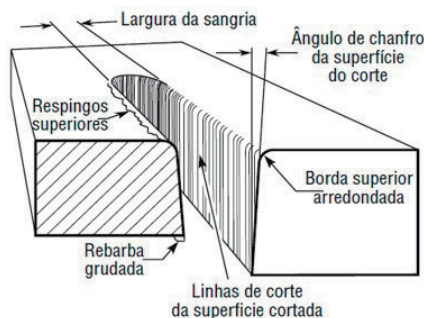
Uma máquina de corte a plasma, é composta por vários equipamentos, dentro eles os mais importantes são: uma fonte de energia, tocha, fonte de gases e unidades de controle.

As tochas podem ser para corte manual ou mecanizado, auxiliado por um comando numérico computadorizado (CNC), as tochas são o suporte para o consumível de corte, que são: eletrodo, distribuidor de gás, bico e capa, podendo ter outros consumíveis dependendo da qualidade de tecnologia da tocha. O distribuidor de gás é constituído por material isolante e tem como função fornecer um sentido rotacional ao gás. Esse sentido é necessário pois dessa forma aumenta-se a constrição do arco e consequentemente aumenta-se a sua temperatura. O bico tem como função constriuir o plasma e então guiá-lo até o elemento a ser cortado. O eletrodo tem como principal função conduzir corrente elétrica, para que ocorra a emissão dos elétrons e assim gerar o plasma. E a capa tem as funções de manter os componentes alinhados e isolar a parte elétrica do bocal frontal (Lima, 2006). A Figura 5, apresenta os consumíveis de uma tocha com regulador de gás manual, com corrente de 130A do modelo HPR130XD. Essa tocha consiste em um plasma de alta definição.

O processo de corte a plasma, assim como qualquer técnica ou tecnologia de corte, é necessário seguir parâmetros de corte já conhecidos, visto que, as peças cortadas no processo de plasma, podem ser utilizadas logo após a conclusão do corte, já que esse tipo de tecnologia não exige um processo de acabamento das peças, mas esse resultado só é obtido se o corte seguir os parâmetros adequados para cada tipo e espessura de material. Independente da utilização, é importante que as superfícies geradas sejam livres de descontinuidades para evitar a necessidade de uma operação secundária de limpeza, como usinagem ou lixamento (Mougo *et al.*, 2018).

A qualidade da superfície cortada por plasma é função dos ajustes e dos parâmetros de corte como a altura do bocal até a superfície da peça, do ângulo de inclinação da tocha, da velocidade de corte, do fluxo de gás e da habilidade do operador (Mougo *et al.*, 2018). Quando tratado de uma máquina de corte auxiliada por CNC, o operador fica restrito ao posicionamento da tocha em relação a chapa. A Figura 2, apresenta as principais descontinuidades macroscópicas.

Figura 2 - Principais descontinuidades macroscópicas.



Fonte: Mougo et al. (2018).

Dependendo do tipo de tocha, a direção de corte pode influenciar no acabamento superficial da peça cortada. A distância do bocal e da peça varia entre 6 e 16 mm. Menores velocidades de corte resultam na maioria das vezes em superfícies com melhor acabamento (Marques; Modenesi; Bracarense, 2011). O Quadro 1, apresenta valores de velocidades teóricas utilizadas em corte a plasma CNC.

Quadro 1 - Velocidade teórica de corte a plasma CNC.

| Material       | Espessura (mm) | Corrente (Ampéres) | Velocidade de corte (mm/min) |
|----------------|----------------|--------------------|------------------------------|
| Aço Carbono    | 0,50           | 25                 | 10540                        |
|                | 1,50           | 40                 | 5600                         |
|                | 3,00           | 60                 | 5400                         |
|                | 6,00           | 80                 | 2700                         |
|                | 12,00          | 100                | 1500                         |
|                | 19,00          | 100                | 660                          |
|                | 25,00          | 100                | 460                          |
| Aço Inoxidável | 0,50           | 25                 | 10400                        |
|                | 1,50           | 40                 | 6200                         |
|                | 3,00           | 60                 | 4500                         |
|                | 6,00           | 80                 | 2600                         |
|                | 12,00          | 100                | 1320                         |
|                | 19,00          | 100                | 640                          |
|                | 25,00          | 100                | 390                          |

| Material | Espessura (mm) | Corrente (Ampéres) | Velocidade de corte (mm/min) |
|----------|----------------|--------------------|------------------------------|
| Alumínio | 0,50           | 25                 | 10000                        |
|          | 1,50           | 40                 | 4400                         |
|          | 3,00           | 60                 | 3300                         |
|          | 6,00           | 80                 | 2400                         |
|          | 12,00          | 100                | 1000                         |
|          | 19,00          | 100                | 840                          |
|          | 25,00          | 100                | 540                          |

**Fonte:** Pimenta (2013).

É necessário compreender que corte externo e corte interno devem ser considerados parâmetros diferentes, principalmente quando tratado cortes de diâmetros, ou seja, furação. A maior dificuldade encontrada atualmente está quando o diâmetro se aproxima da espessura da chapa, por isso deve ser considerado alguns parâmetros. Segundo Caló (2013), para plasma de alta definição, chapas acima de 3mm, utiliza-se 1,5 vezes a espessura do material. Para o plasma convencional, chapas de 3mm a 12mm utilizar, 1,5 vezes a espessura do material. Outro fator importante, é o sentido de corte. De acordo com Caló (2013), quando se trata de diâmetros internos no corte plasma e os mesmos devem ser feitos no sentido anti-horário para um melhor controle do arco, desta forma o lado chanfrado do corte vai ficar no miolo, ou seja, sucata.

Como o processo de corte a plasma, é gerado uma concentração de calor por parte do arco elétrico durante o corte, é notado que, as regiões básicas formadas pela entrada de calor na peça no processo de corte são: Zona Termicamente Afetada (ZTA), que é a região do metal não fundida pelo calor, mas que teve sua microestrutura e/ou propriedades alteradas; e o Metal Base (MB), que é a região mais afastada do ponto onde ocorre o processo e que não é afetada por ele (Marques; Modenesi; Bracarense, 2011). A ZTA varia suas características de acordo com o tipo de metal base e do ciclo térmico do processo de corte. A ZTA possui três regiões: região de crescimento de grão, refino de grão e região Inter crítica (Wainer; Brandi; Mello, 2010).

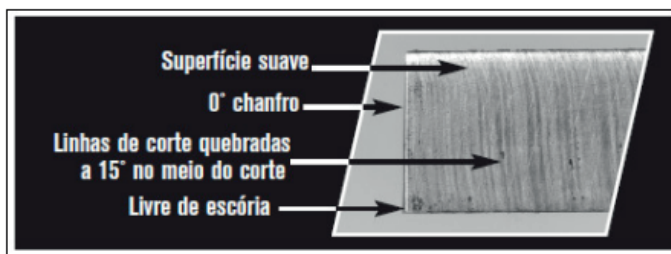
A região de crescimento de grão é a região que se encontra mais próxima de onde ocorreu o processo, em que a temperatura chegou a cerca de 1200°C. Neste local, a austenita sofre um grande crescimento de grão. A estrutura final dependerá da quantidade de carbono e de elementos de liga, da velocidade de

resfriamento e do tamanho do grão austenítico, geralmente sendo composta por ferrita em placas na presença de bainita. Grãos maiores dificultam a transformação durante o resfriamento, aumentando a possibilidade de formação de martensita, isto é, aumentando a temperabilidade do aço. Para condições de corte que apresentam um resfriamento mais rápido e aços com maior teor de carbono ou elementos de liga, pode-se resultar em uma formação completa de martensita nesta região (Marques; Modenesi; Bracarense, 2011).

A região de refino de grão é a região onde a temperatura chega entre 900 e 1200°C. Após o processo, essa região geralmente apresenta uma estrutura fina de ferrita e perlita (Marques; Modenesi; Bracarense, 2011). A região Inter crítica é a região que a temperatura mais alta varia entre 727°C onde ocorre a transformação parcial do metal base, pois somente uma parte do metal base é austenitizado (Marques; Modenesi; Bracarense, 2011).

Para avaliar as peças cortadas termicamente, deve-se embasar-se em normas, desta forma consegue-se determinar os limites de aceitação do processo e assim definir as tolerâncias admissíveis. Para este processo aplica-se a norma Standard Em ISO 913. Os fatores mais considerados para avaliar a qualidade de corte são: o desvio angular e a rugosidade. Outros fatores que podem também ser considerados na qualidade do corte, são as linhas de arraste e formação de escória (Caló, 2013). Na Figura 3 estão representadas regiões típicas do acabamento do corte plasma.

**Figura 3** - Regiões típicas de acabamento.



**Fonte:** CALÓ, 2013.

Ferreira (2017), pesquisou em seu trabalho as variações dos parâmetros de corte e quais eram suas influencias na qualidade de corte. Desde modo investigou que a velocidade de corte é um parâmetro que influencia não somente na ZTA

da peça, mas também na superfície cortada e na formação de rebarba. Onde conclui-se que velocidades superiores geram menos rebarbas e linhas de arraste com inclinações mais intensas na região. Obteve também que, quanto menor a velocidade de corte, e o valor da corrente de corte influencia também na ZTA, visto que estes parâmetros são responsáveis pelo aporte da temperatura da peça.

O objetivo deste trabalho é avaliar a microestrutura da região mais próxima do corte (ZTA), na qual está exposta a uma elevada temperatura, e verificar se essa exposição é suficiente para alterar as características físicas do material aço inoxidável AISI-304.

## **MATERIAL E MÉTODOS**

Para a realização deste trabalho, foram determinados alguns tópicos influentes para a caracterização do corte a plasma no cenário industrial. Desta forma, os resultados visam a destacar os seguintes tópicos.

- Funcionamento do corte a plasma;
- Modelos de máquinas e aplicações;
- Vantagens e desvantagens;
- Parâmetros de corte;
- Acabamento do corte;
- Características da peça afetada pelo corte.

Durante o levantamento bibliográfico, foram realizadas pesquisas no âmbito de artigos científicos, dissertações de mestrado e teses de doutorado.

O corte a plasma é muito utilizado devido a sua velocidade de corte e não tem a necessidade de um acabamento após o corte, pois seu acabamento alinhado com os ajustes adequados, a peça saíra pronta após o corte.

Algumas das desvantagens do corte a plasma, é o custo de máquina. Já que está pode ser desde manual até controlada por CNC (comando numérico computadorizado), onde dividisse em 4 tipos de máquinas mais conhecidas.

Os parâmetros de corte estão diretamente ligados aos tipos de máquinas, e o acabamento da peça cortada. Existem vários consumíveis e variáveis existente no corte a plasma que deve ser conhecido pelo operador.

## RESULTADOS

### Escolha da máquina de corte a plasma

Para a avaliação dos resíduos gerados durante o corte, foi necessário definir alguns parâmetros de base para a execução, e pode-se dividir em 3 estágios: Escolha da máquina, corpo de prova, ensaios metalográficos.

A máquina adotada para o estudo é de uma indústria metalúrgica da região de Ourinhos, que tem em seu chão de fábrica, o plasma de alta definição da HyperTherm modelo: HPR130

### Parâmetros de corte

No Quadro 02 é apresentado os parâmetros de pré-corte, ou seja, antes de iniciar o processo de corte, o operador ajustar conforme o material e espessura. Esse modelo de máquina HPR130, ela contém um console de gás manual, então é necessária regular as pressões de pré-fluxo e de corte, além selecionar os gases que são ser utilizado.

Quadro 02- Parâmetros de pré-corte.

English

| Select Gases   |        | Set Preflow |        | Set Cutflow |        | Material Thickness | Arc Voltage | Torch-to-Work Distance | Cutting Speed | Initial Pierce Height |          | Pierce Delay Time |     |
|----------------|--------|-------------|--------|-------------|--------|--------------------|-------------|------------------------|---------------|-----------------------|----------|-------------------|-----|
| Plasma         | Shield | Plasma      | Shield | Plasma      | Shield | in                 | Volts       | in                     | ipm           | in                    | factor % | seconds           |     |
| O <sub>2</sub> | Air    | 35          | 40     | 80          | 35     | .135               | 124         | 0.100                  | 240           | 0.200                 | 200      | 0.1               |     |
|                |        |             |        |             |        | 3/16               | 126         | 0.110                  | 190           | 0.220                 |          | 0.2               |     |
|                |        |             |        |             |        | 1/4                | 127         |                        | 150           |                       |          | 0.3               |     |
|                |        |             |        |             | 28     | 3/8                | 130         | 0.120                  | 110           | 0.240                 |          | 0.300             | 0.5 |
|                |        |             |        |             |        | 1/2                | 132         | 0.130                  | 80            | 0.260                 |          |                   | 0.7 |
|                |        |             | 5/8    |             |        | 135                | 0.150       | 60                     | 190           | 1.0                   |          |                   |     |
|                |        |             | 3/4    |             |        | 138                |             | 45                     |               | 1.8                   |          |                   |     |
|                |        |             | 1      |             |        | 141                | 0.160       | 20                     | Edge start    |                       |          |                   |     |
|                |        |             | 65     |             | 1-1/4  | 160                | 0.180       | 15                     |               |                       |          |                   |     |
|                |        |             |        |             |        | 1-1/2              |             | 167                    |               | 10                    |          |                   |     |

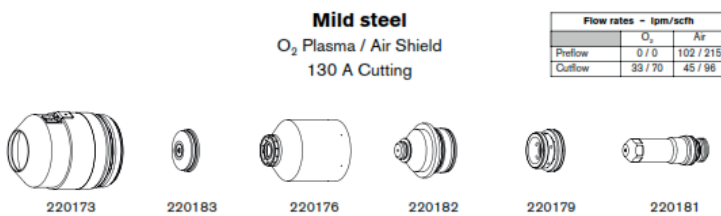
Fonte: Hypertherm, 2015.

Os parâmetros de pré-corte consistem em:

- Select gases: seleção de gases;
- Set Preflow: Pressão de pré-fluxo;
- Set Outflow: Pressão de corte;
- Material Thickness: Espessura do material;
- Arc Voltage: Voltagem do arco (V);
- Torch-to-Work Distance: Distância da tocha para a peça (antes de abrir o arco elétrico);
- Cutting Speed: Velocidade de corte;
- Initial Pierce Height: Altura inicial de perfuração;
- Pierce Delay time: Tempo de retardo de perfuração.

Para o estudo, será utilizado uma corrente de 130A, na qual é utilizado para espessuras acima de 6mm. As imagens a seguir contêm os ajustes de preparação da máquina, como seleção de gases e dos consumíveis. A Figura 4 refere-se a tabela de seleção de consumíveis.

**Figura 4 - Consumíveis HPR 130A.**



Fonte: Hypertherm, 2015.

## Elaboração do corpo de prova

O material do corpo de prova que foi selecionado, é o AISI INOX-304, que é uma liga de aço muito empregada em equipamentos, pela sua alta resistência a corrosão e a oxidação. Com as dimensões de 100mm de comprimento, 50mm de largura e espessura de #1/2" (12,7mm).

### Corte do corpo de prova

Para o corte do corpo de prova, foi selecionado os seguintes parâmetros (Quadro 3):

**Quadro 3** - Parâmetros utilizados para o corte do corpo de prova.

| Teste-01                 |      |
|--------------------------|------|
| Velocidade de corte      | 1500 |
| Voltagem (A):            | 137  |
| Altura de início (mm):   | 3    |
| Recuo de start (mm):     | 10   |
| Tempo de perfuração (s): | 0,8  |

Fonte: Autoral.

Todos os cortes dos corpos de provas, foram utilizados consumíveis novos, original Hypertherm. Figura 5 mostra a execução do corte do corpo de prova.

**Figura 5** - Corte do corpo de prova.



Fonte: Autoral.

Após o corte a peça foi resfriada rapidamente no tanque de água da máquina. Essa é uma prática comum em máquinas de corte a plasma, devido ao grande volume de peças cortadas em uma única chapa, as peças naturalmente caem no tanque de água.

### Embutimento e lixamento do corpo de prova

O embutimento do corpo é necessário para a realização da análise metalográfica, devido ao limite de espaço da máquina embutidora, teve-se que cortar o

corpo de prova com dimensões de 15mmx10mm. O corte foi feito na serra policorte com refrigeração por óleo solúvel.

Após o corte, foi embutido os corpos de provas, como apresentado na Figura 6.

**Figura 6** - Corpo de prova embutido.



**Fonte:** Autoral.

Depois das peças embutidas, iniciou o processo de acabamento manual realizado por meio de lixas com granulometria variando de 150 a 1200. Fixadas nos suportes com sistema de refrigeração a água. O lixamento deve garantir que cada lixa removeu todos os riscos da lixa anterior. Isto é alcançado com a rotação de 90º entre as lixas.

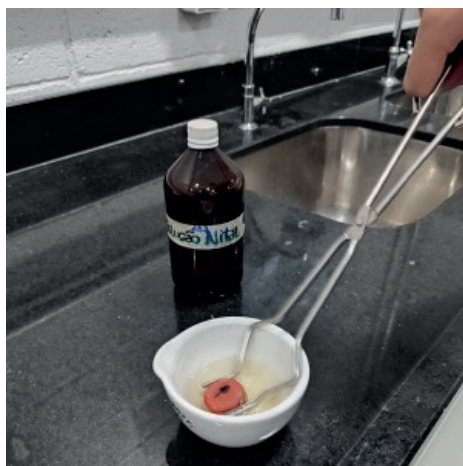
A disposição se deu em um aumento gradativo da granulometria das lixas na seguinte sequência de granulometria: 150, 180, 220, 320, 400, 600, 800 e 1200.

### **Polimento e ataque químico**

Concluído o lixamento, foi realizado o polimento no politriz rotativa com pasta de diamante e refrigerada com água. No processo de polimento é comum encontrar falhas na superfície e é necessário realizar o processo de lixamento novamente até obter uma superfície sem riscos ou falhas no acabamento.

Com o polimento concluído, foi feito o ataque químico com o Nital a 10% é composta de ácido nítrico concentrado e álcool etílico (Figura 7).

**Figura 7** - Ataque químico com Nital 10%.

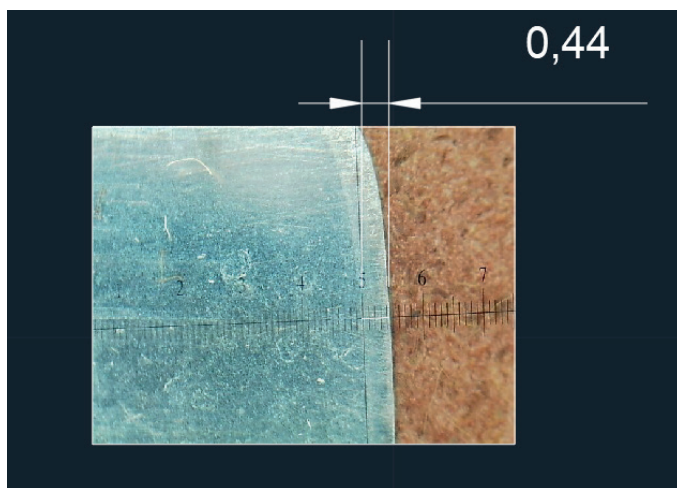


Fonte: Autoral.

### **Análise por macrografia.**

Na macrografia (Figura 8) foi possível enxergar a ZTA (zona termicamente afetada) causada pelo corte. E após fotografar com a câmera do macroscópio, mediu-se a ZTA com o auxílio do software.

**Figura 8** - ZTA observada através do macroscópio.



Fonte: Autoral.

A ZTA é o resultado da concentração de calor durante o corte, pode-se observar que resulta em aproximadamente 3% da largura do corpo de prova.

O material do corpo de prova é uma liga inoxidável austenítico, que de acordo com Neto (2015) não podem ser endurecidos por tratamento térmico. Tendo o nível de teor de carbono restrito, os aços austeníticos contêm um balanço de cromo e níquel, permitindo em temperatura ambiente um arranjo atômico cúbico de face centrado que é também não magnético (ou seja, tem uma baixa permeabilidade magnética), estabilizando assim a austenita em temperatura ambiente. Desta forma, a presença de alterações microestruturais apresentada na ZTA pode possivelmente ter alterado as condições de resistência do material, porém não de maneira severa, haja visto a impossibilidade de aumento de dureza por meio de rápido resfriamento.

A alteração das características mecânicas poderia ser avaliada por meio de ensaios de microdureza ou então por ensaios mecânicos, como ensaio de tração. Todavia, através destas observações experimentais, é possível determinar a presença da ZTA.

## CONCLUSÕES

Os resultados apresentados nesse relatório puderam demonstrar os procedimentos e resultados de ensaios metalográficos realizados em laboratório, sendo possível avaliar a zona termicamente afetada pelo corte a plasma no aço inoxidável AISI-304.

O resultado da macrografia comprovou que a face do corpo de prova mais próximo do bico de corte tem uma ZTA originada pelo funcionamento do plasma, resultando em aproximadamente 3% da largura do corpo de prova.

Tendo em vista que os aços inoxidáveis austeníticos não são tratados termicamente para aumento de dureza, é possível determinar que o resultado do rápido resfriamento gerado pelo corte plasma não seja responsável por um aumento de dureza localizado na ZTA. No entanto, análises adicionais como microdureza e ensaios de tração poderiam dar mais indicativos sobre a qualidade final do componente em termos de resistência mecânica.

Considerando que a tecnologia de corte a plasma é importante nos processos de fabricação, tendo uma ampla aplicabilidade em diversas ligas de

aço, como no aço inoxidável 304, recomenda-se que futuros trabalhos explorem mais condições experimentais dos processos de corte a plasma, gerando maior volume de informação específica aos engenheiros e demais profissionais da indústria metalmeccânica.

## REFERÊNCIAS

ABINOX, Austeníticos. Conheça as famílias do aço inoxidáveis. Disponível em: <https://abinox.org.br/austenitico/> > Acesso em: 01/12/2024.

CALÓ, E. H. Estudo comparativo da eficiência entre os processos de corte plasma e laser nos materiais ASTM A36 na espessura de 12mm. Monografia apresentada ao curso de Pós Graduação em engenharia de soldagem da escola de Engenharia Mauá do Centro Universitário do Instituto Mauá da tecnologia para obtenção do título de especialista. São Caetano do Sul, 2013.

FERREIRA, M. S. Corte a plasma; avaliação do efeito da variação dos parâmetros no processo e na qualidade de corte. Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação de Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Belo Horizonte, BH. CEFET-MG, 2017.

HYPERTHERM. HyPerformance Plasma, HPR130XD manual gás, revisão 3. 2015. Disponível em: < <https://www.hypertherm.com/Download?fileId=HYP136504&zip> > Acesso em: 21/02/2023.

HYPERTHERM. Tipos de plasma. Disponível em: <<https://www.hypertherm.com/pt/solutions/technology/plasma-technology/types-of-plasma/>>. Acesso em: 20/02/2023.

LIMA, E. Corte a Plasma. Revista Soldagem ABS, Ano 2, número 9. 2006.

MARQUES, P. V., MODENESI, P. J., BRACARENSE, A. Q. Soldagem Fundamentos e Tecnologia (2ª ed.). Belo Horizonte: UFMG, 2011.

MESQUITA, Eduardo Luiz Alvares; RUGANI, Léo Lucas. Conformação dos aços inoxidáveis. Apostila ACESITA, p. 39, 1997.

MOUGO, CAMPOS, SILVA E ARYDES, 2018. Estudo da qualidade do corte a plasma automatizado para o aço Aisi 304. Disponível em: < [https://www.researchgate.net/profile/Felipe-Arydes/publication/329264428\\_ESTUDO\\_DA\\_QUALIDADE\\_DO\\_CORTE\\_A\\_PLASMA\\_AUTOMATIZADO\\_PARA\\_O\\_ACO\\_AISI\\_304/links/5e27652aa6fdcc70a140b953/ESTUDO-DA-QUALIDADE-DO-CORTE-A-PLASMA-AUTOMATIZADO-PARA-O-ACO-AISI-304.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Felipe-Arydes/publication/329264428_ESTUDO_DA_QUALIDADE_DO_CORTE_A_PLASMA_AUTOMATIZADO_PARA_O_ACO_AISI_304/links/5e27652aa6fdcc70a140b953/ESTUDO-DA-QUALIDADE-DO-CORTE-A-PLASMA-AUTOMATIZADO-PARA-O-ACO-AISI-304.pdf)>. Acesso em: 22/02/2023.

NETO, Benedito Vieira Cesar. COMPARAÇÃO DE JUNTA SOLDADA AÇO CARBONO/ AÇO INOX UTILIZANDO COMO METAL DE ADIÇÃO AÇO CARBONO E AÇO INOX – Trabalho de Conclusão de Curso - Engenharia mecânica, Unesp Guaratinguetá, 2015.

NEMCHINSKY, V., & SEVERANCE, S. (2006). JOURNAL OF PHYSICS. What we know and what we do not know about plasma arc cutting.

PIMENTA, S. W. Estudo Comparativo Entre os Processos de Corte Plasma e Jato D'água para chapa de Aço Inoxidável de 1" Utilizado na Construção de Máquinas Especiais. 49 f. TCC (Pós Graduação) -Engenharia de Soldagem, Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, São Caetano do Sul, SP, 2013.

WAINER, E., BRANDI, S. D., & MELLO, F. (2010). Soldagem Processos e Metalurgia. São Paulo: Blucher.

## **FIXAÇÃO DE TERMOPARES POR DESCARGA CAPACITIVA PARA MONITORAMENTO DA TEMPERATURA EM SOLDAGEM A LASER**

**Claudio Abilio da Silveira**  
Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC)

**Luiz Eduardo dos Santos Paes**  
Universidade Federal de Uberlândia (UFU)

**Jhonattan Gutjahr**  
The Welding Institute

**Milton Pereira**  
Universidade Federal de Uberlândia (UFU)

**Walter Lindolfo Weingaertner**  
Universidade Federal de Uberlândia (UFU)

# RESUMO

**Objetivo:** o objetivo deste trabalho foi desenvolver e avaliar uma metodologia para o posicionamento manual de termopares em corpos de prova, visando o monitoramento da temperatura durante processos de soldagem a laser. A metodologia proposta busca superar as dificuldades associadas à alta concentração de energia do feixe laser, que podem levar ao superaquecimento e danos aos termopares quando posicionados muito próximos à zona de soldagem. **Métodos:** a metodologia desenvolvida envolveu as etapas de posicionamento manual dos termopares, estabelecendo técnicas e procedimentos para fixação nos pontos de interesse do corpo de prova. Em seguida, os corpos de prova foram submetidos à soldagem a laser e a temperatura foi monitorada durante o processo. **Resultados:** a metodologia proposta demonstrou ser eficaz para o monitoramento da temperatura durante a soldagem a laser. A fixação por descarga capacitiva proporcionou uma união segura dos termopares aos corpos de prova, evitando o superaquecimento e a perda dos sensores. No entanto, foram identificadas algumas fontes de perturbação nas medições de temperatura, como o erro de posicionamento dos termopares e a influência do ambiente de soldagem. **Conclusão:** a técnica de posicionamento manual e fixação de termopares por descarga capacitiva mostrou-se adequada para o monitoramento dos ciclos térmicos durante a soldagem autógena a laser.

**Palavras-chave:** aquisição de sinais; ciclos térmicos; temperatura; termopar tipo k.

## INTRODUÇÃO

Dentre as principais grandezas físicas envolvidas na soldagem, a temperatura é considerada a mais importante. A resistência mecânica da junta soldada depende, dentre outros fatores, das transformações microestruturais que ocorrem na zona termicamente afetada, que por sua vez são consequência dos ciclos térmicos, compostos pelas taxas de aquecimento e resfriamento em função do tempo. Na soldagem por arco elétrico a maior energia necessária para efetuar a soldagem tem como consequência um resfriamento mais lento, enquanto que processos de soldagem por laser, em decorrência do aporte de energia para uma região menor, tem como consequência um resfriamento mais rápido. Para entender os fenômenos envolvidos, é necessário monitorar a temperatura na região da soldagem. Diversos princípios de medição podem ser adotados para este fim.

A utilização de pirômetros e câmeras termográficas com os respectivos dispositivos ópticos de focalização e de gravação exigem investimentos significativos. Tanto os pirômetros como as câmeras termográficas devem ser calibradas para cada aplicação, pois são dependentes de variáveis, como emissividade dos materiais, transmitância do meio e radiação refletida, esta última de difícil controle e repetitividade (NASCIMENTO, 2017). Além dos ajustes, são necessários cuidados com a exposição de componentes sensíveis e o processamento de grandes volumes de dados. Uma alternativa com um melhor custo-benefício é a medição da temperatura com transdutores baseados em medição por contato, dentre os quais se destacam os termopares.

Os termopares se baseiam no princípio físico da corrente elétrica que se estabelece em um circuito constituído de dois metais distintos, quando uma das juntas é aquecida e a outra é mantida fria. Quando o circuito é aberto e medido, obtém-se uma diferença de potencial proporcional à diferença de temperatura entre a junta quente e a junta fria. Os termopares são formados por fios ou folhas de metais distintos. Os termopares são caracterizados pela robustez de operação, sendo utilizados em ambientes submetidos a altas temperaturas e pressões por longos períodos de tempo, como, por exemplo, em reatores nucleares (BISWAL, 2014).

A utilização de termopares no monitoramento dos processos de soldagem é vantajosa devido à sua ampla faixa de medição. O tamanho reduzido de alguns termopares permite posicionar vários transdutores nas regiões de interesse.

Segundo Manninen (2015), o uso de mais de um ponto de medição permite reconhecer e eliminar erros aleatórios, como os advindos do desprendimento dos transdutores, além de possibilitar a análise da condução de calor ao longo do corpo de prova. Para obter um resultado confiável o posicionamento dos termopares deve ser bem definido, principalmente quando há elevados gradientes de temperatura durante o processo a ser monitorado.

Na aquisição de ciclos térmicos no processo de soldagem TIG (Tungsten Inert Gas), Betini *et al.* (2017) descrevem a fixação de termopares perpendicularmente ao eixo do cordão de soldagem, sendo a menor distância entre um transdutor e o eixo da linha de soldagem de 8 mm. Esta distância é limitada pela largura do cordão de soldagem e pode ser reduzida em um processo de soldagem de LBW (Laser Beam Welding), no qual a energia é entregue de forma mais concentrada, resultando em um cordão de solda mais estreito, com menor ZTA (Zona Termicamente Afetada).

Para estabelecer uma distância adequada, que confira boa sensibilidade à variação de temperatura sem destruir o termopar durante o processo de soldagem foram preparados corpos de prova nos quais os termopares foram fixos em distâncias variadas do eixo do cordão de soldagem. Para os termopares empregados o limite de temperatura indicado pelo fabricante é de 1350 °C. Na soldagem de aço a poça líquida atinge temperaturas em torno de 1500 °C, de forma que os termopares devem ser fixos no corpo de prova em distâncias adequadas. Valores próximos ou acima desta temperatura limite são indicativos da proximidade excessiva entre o termopar e a fonte de calor.

Carrasco-González *et al.* (2016) mostraram em seus experimentos que a passagem do cordão sobre o termopar provoca leituras de 1200 °C. Acima destas condições, a integridade dos transdutores é comprometida, ocasionando medições incorretas devido a destruição dos termopares. Por outro lado, distâncias excessivamente grandes entre o transdutor e o eixo do cordão de soldagem implicam em uma defasagem temporal grande entre a realização do cordão e a obtenção da temperatura. Também são inseridos erros de medição devido as perdas por irradiação e troca térmica com o meio ambiente até que a frente de calor atinja os termopares, dificultando a análise do processo investigado.

Com o objetivo de proteger os termopares Amine *et al.* (2014), embutiram os termopares no corpo de provas em orifícios, mantendo o ponto de contato com

o transdutor à 1 mm da superfície aquecida. Neste caso em particular, o processo a laser empregado acumulava elevada quantidade de calor devido ao prolongado tempo de processamento, justificando o emprego da fixação em orifícios. Apesar das vantagens, a medição é dificultada pela fixação inadequada dos termopares nos furos e o estabelecimento de um contato perfeito entre termopar e o corpo de provas no interior do furo (CARRASCO-GONZÁLEZ, 2016).

A fixação do termopar à superfície do substrato ou corpo de provas do qual se deseja monitorar a temperatura deve garantir um contato com boa troca térmica durante toda a duração do processo. Métodos de fixação por resinas, pastas condutoras de calor e fitas adesivas são comprometidos devido às elevadas temperaturas. A fixação por grampos aparafusados, embora mecanicamente satisfatória, configura acréscimo de massa e volume ao substrato, modificando as características de distribuição do calor. Levando isto em consideração, os termopares de fios dissimilares foram soldados ao substrato por soldagem por descarga capacitiva.

Na soldagem por descarga capacitiva, é utilizado um banco de capacitores carregados eletricamente, que possui um polo conectado ao substrato e outro conectado ao termopar. Quando a extremidade livre do termopar se aproxima do substrato a uma distância em que a rigidez elétrica suportada pelo dielétrico (no caso o ar atmosférico) é superada pela diferença de potencial de carregamento do capacitor uma descarga elétrica se estabelece. Durante a descarga ocorre a fusão de material na extremidade do termopar e da região de descarga no substrato. Em decorrência da aproximação continuada da extremidade do termopar à superfície do substrato, quando a descarga cessa as duas regiões fundidas se encontram e solidificam, formando a união entre o termopar e o substrato.

O presente trabalho apresenta uma metodologia de posicionamento para fixação de termopares de materiais dissimilares no substrato, mediante soldagem por descarga capacitiva. Para obter uma informação significativa do processo de soldagem, a posição ótima do termopar seria o centro do cordão de soldagem. No entanto nesta posição o termopar seria destruído durante a soldagem. Para evitar a destruição (fusão) do termopar optou-se por um afastamento mínimo em relação ao eixo de cordão de soldagem de 2 mm. A decisão acerca da distância apropriada é embasada por resultados obtidos em um ensaio com afastamento gradual dos termopares ao cordão. Após os ensaios de soldagem é

realizada uma verificação da posição efetivamente ocupada pelo termopar, por processamento de imagens. Também são apresentados aspectos relacionados à influência do gás de proteção e dos respingos sobre a temperatura obtida.

## MÉTODOS

Nesta seção são descritos os métodos para a soldagem por descarga capacitiva dos termopares e para o monitoramento de temperatura em uma aplicação de soldagem autógena a laser. São apresentados dois tipos de ensaios: com afastamento variado e com afastamento constante de uma série de termopares em relação ao centro do cordão.

O circuito empregado para soldagem por descarga capacitiva dos termopares é composto por um banco de dois capacitores, totalizando 17.400  $\mu\text{F}$ . A energia armazenada para soldagem é de 2,94 J. Os capacitores são carregados por uma fonte de corrente contínua de 20 V. Após o carregamento dos capacitores a fonte é desconectada do circuito. Um dos polos do banco de capacitores é conectado ao substrato e o outro é conectado ao termopar através de uma garra metálica.

Os termopares utilizados neste trabalho são do tipo K, cuja faixa de medição está entre -270 °C e 1350 °C segundo o fabricante. O diâmetro do termopar é de aproximadamente 250  $\mu\text{m}$ . Para os ensaios realizados a junção dos termopares foi obtida pelo trançamento dos fios dissimilares. Nesta condição a junção apresenta maior inércia de resposta se comparada a junção no formato de esfera originada pela fusão dos fios.

O sistema de medição da diferença de potencial decorrente das temperaturas é composto por uma placa de aquisição de sinais NI USB 6218 e um computador. A taxa de aquisição é de 10 Hz. Os valores coletados são armazenados em um arquivo para processamento posterior.

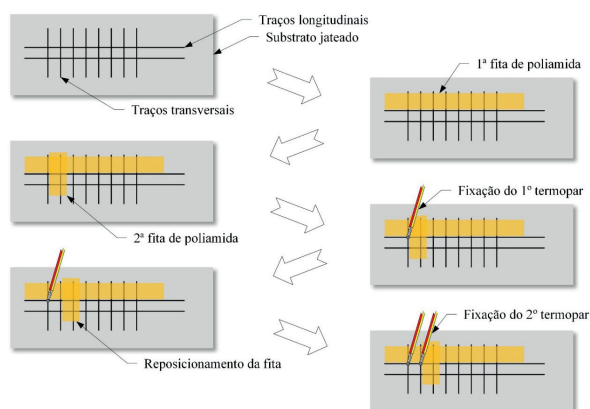
O material do substrato é o aço SAE 1020, com dimensões de 9,5 mm x 31 mm x 207 mm. Sua superfície é preparada por jateamento abrasivo, para garantir que esteja isenta de oxidação e outros detritos. Os substratos são manuseados com luvas e, após o jateamento abrasivo, são armazenadas em cubas de vidro evacuadas contendo sílica gel como secador, objetivando a minimização da formação de óxidos e exposição a outras formas de contaminação.

O processo de soldagem autógena utiliza como fonte de calor um laser de fibra de Itérbio IPG Photonics®, com comprimento de onda de 1064 nm e potência máxima de saída de 10 kW. Todos os ensaios descritos a seguir foram realizados utilizando argônio como gás de proteção (vazão de 15 l/min), velocidade de avanço de 50 mm/s e foco do laser (diâmetro teórico) de 800  $\mu$ m posicionado sobre a superfície do substrato. Três potências de laser foram empregadas: 3 kW, 6 kW e 9 kW.

## Metodologia para posicionamento dos termopares

Para o posicionamento dos termopares e indicação para trajetória de execução do cordão de soldagem, são riscados traços de referência sobre a superfície do substrato. Paralelo aos traços são coladas fitas de poliamida com elevada rigidez dielétrica, para a referência de posicionamento dos termopares, conforme a Figura 1. A primeira fita é aplicada paralela a um dos traços longitudinais para definir a distância do termopar em relação a linha de referência para execução do cordão. A distância entre a fita e seu respectivo traço é determinada pelo tamanho da ponta do termopar. Seguindo o mesmo critério, a segunda fita é aplicada paralela a um traço transversal. O encontro das laterais das duas fitas define o centro do termopar sobre a intersecção dos dois traços de referência.

**Figura 1** - Etapa de posicionamento das fitas de poliamida e termopares.



**Fonte:** autores (2024).

Para a realização da soldagem por descarga capacitiva o substrato é ligado à um terminal do banco de capacitores e o termopar ao outro terminal. Tanto o substrato, quanto o termopar são isolados eletricamente, para evitar descargas indevidas. Após o carregamento do banco de capacitores, a extremidade do termopar é posicionada sobre a fita de poliamida e deslizada na direção do ponto de referência. O isolamento da fita garante que o termopar deslize sobre o substrato sem que ocorra a descarga elétrica. Quando a extremidade do termopar atinge a posição da intersecção da borda da fita (e por consequência, a intersecção dos traços), a rigidez dielétrica diminui e ocorre a descarga elétrica que funde a extremidade do termopar e uma pequena região sobre a superfície do substrato. Com a continuidade do movimento a extremidade fundida do termopar entra em contato com a superfície fundida do substrato, quando as duas regiões solidificam, formam a ligação mecânica entre as duas partes.

Após a fixação de um termopar, as fitas são reposicionadas (ou substituídas) com o intuito de estabelecer a posição de soldagem de outro termopar, e assim sucessivamente, de acordo com o número de termopares a serem fixados. Caso as posições para fixação ocorram sobre um traço comum (caso da figura anterior) é necessário o reposicionamento de apenas uma das fitas. Para termopares fixados em pontos com variadas coordenadas longitudinais e transversais pode ser necessário o emprego de mais reposicionamentos de fitas. Esta metodologia foi aplicada para fixar uma série de termopares a determinadas distâncias do cordão a ser executado, estes ensaios são descritos a seguir.

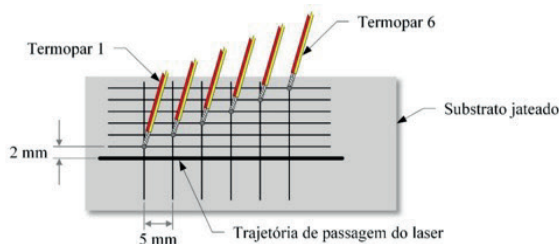
## **Ensaios com afastamento variado dos termopares em relação a soldagem**

Variações nos níveis de potência, diâmetro do feixe e velocidade de avanço são exemplos de parâmetros que afetam diretamente a energia aplicada no processo. Em virtude da variação da densidade de energia e do tempo de exposição da amostra ao calor a intensidade da temperatura alcançada no centro do cordão é alterada. Para estabelecer de forma quantitativa uma distância favorável à fixação, sem riscos de destruição, mas com exposição às temperaturas, foi realizado um ensaio com variação do afastamento entre transdutores e o eixo longitudinal do cordão.

Esta etapa consiste na variação progressiva da posição em que o termopar é fixado em relação a linha correspondente a trajetória a ser executada pelo feixe laser. Assim, é possível observar o aumento obtido na temperatura em função da maior proximidade do transdutor em relação ao cordão. Eventualmente, pode haver a danificação ou destruição da junção dos termopares situados excessivamente próximos ao ponto de passagem do laser. Este ensaio se mostra uma ferramenta útil para determinar a melhor posição dos termopares quando um modelo computacional ou dados prévios compatíveis com a situação não estão disponíveis para prever uma região segura para fixação.

Neste trabalho, foi estabelecida uma configuração de ensaio com afastamento variado conforme ilustrado na Figura 2. Seis termopares foram posicionados progressivamente espaçados, com incrementos de 2 mm em relação à linha de trajetória do laser. Em tal configuração, o termopar mais próximo está a 2 mm e o mais afastado a 12 mm do centro do cordão obtido na soldagem autógena a laser. O espaçamento longitudinal entre um transdutor e outro corresponde a 5 mm. A potência de laser para realização deste ensaio foi definida em 9 kW, buscando representar a condição com maior geração de calor.

**Figura 2** - Esquemático de fixação com afastamento variado dos termopares em relação a soldagem.



Fonte: autores (2024).

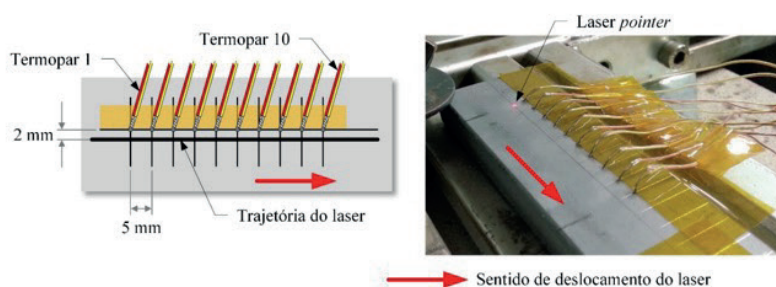
### Ensaio com afastamento constante dos termopares em relação a soldagem

Para verificar a confiabilidade e regularidade da obtenção dos valores da temperatura um substrato com uma série de termopares fixos sobre uma linha paralela foi submetido ao aquecimento por um feixe de laser, simulando uma condição de soldagem autógena.

Foram fixados 10 termopares no substrato à uma distância de 2 mm do eixo longitudinal do cordão de soldagem e espaçados 5 mm entre si. A Figura

3 apresenta uma representação esquemática e uma imagem da disposição dos termopares. Na imagem o ponto vermelho sobre o início da linha de soldagem é referente ao laser de orientação (laser pointer). O laser empregado para o processamento do material possui comprimento de onda na faixa infravermelha e é invisível ao ser humano. Além disto, sua menor potência possível de ser regulada ainda é nociva para o operador, o que exige a utilização deste laser de orientação para ajustar o posicionamento do substrato sob o cabeçote de soldagem. O laser de orientação utiliza o mesmo caminho óptico do laser de processamento.

**Figura 3 -** Fixação dos termopares no corpo de provas.



**Fonte:** autores (2024).

Neste ensaio o acionamento do laser que dá início ao cordão coincide com a posição do termopar 1, e o final, com a posição do termopar 10. Para minimizar os efeitos de aceleração dos eixos e transitórios do fluxo do gás de proteção, a movimentação e o fluxo de gás de proteção são iniciados em uma posição 20 mm antes do ponto de acionamento do laser e cessados 35 mm após o desligamento do laser. O objetivo é garantir um fluxo de gás de proteção uniforme sobre o substrato e manter as condições de contorno do experimento. Para realização dos ensaios com afastamento constante dos termopares em relação a soldagem foram definidos os patamares de 3 kW, 6 kW e 9 kW.

### **Avaliação do posicionamento dos termopares**

Embora a metodologia de fixação dos termopares apresentada busque uma condição de posicionamento com boa repetibilidade, há incertezas por se tratar de um procedimento manual. Para determinar a posição efetivamente ocupada pelos termopares é necessário obter as suas coordenadas de fixação sobre o

substrato e assim permitir uma avaliação do seu posicionamento em relação ao cordão gerado pela soldagem autógena a laser.

Após a realização dos ensaios os termopares são removidos, a posição de fixação destes, no entanto, permanece visível, devido ao material aderido sobre a superfície do substrato. Estas aderências correspondem à posição ocupada pelo termopar. É obtida uma imagem da vista superior. Os traços de referência para a soldagem dos termopares permitem estabelecer o fator de escala e tratar a imagem em verdadeira grandeza em um software, por meio de uma relação pixel/mm. O software utilizado para esta etapa foi o ImageJ (NATIONAL INSTITUTES OF HEALTH, 2018).

A obtenção da distância correta entre o termopar e o centro do cordão resultante é de fundamental importância para interpretação das temperaturas alcançadas. Para corrigir eventuais erros no alinhamento do substrato durante o ensaio de soldagem, o eixo do cordão de soldagem serve como referência, e não necessariamente coincide com o traço que serviu de referência para a soldagem. Em decorrência de o início e o fim do cordão de soldagem também não ser absolutamente definido, esta posição real também é obtida pelo processamento da imagem.

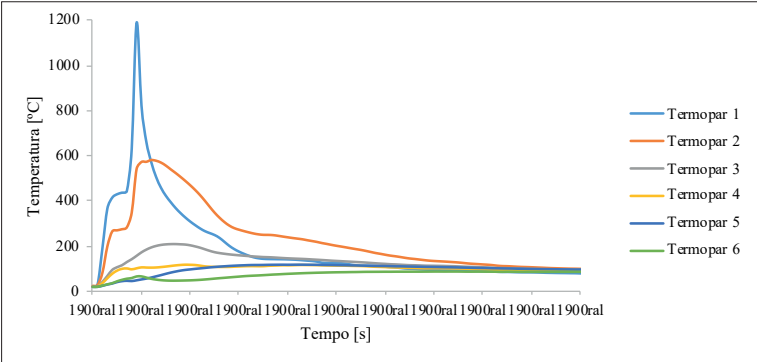
## **RESULTADOS**

A seguir, são apresentados os resultados de temperatura para ensaios com afastamento variado e afastamento constante dos termopares em relação ao cordão.

### **Ensaio com afastamento variado dos termopares em relação a soldagem**

Na Figura 4 são apresentadas as curvas de temperatura para os seis termopares utilizados no ensaio com afastamento variado destes em relação a trajetória descrita pelo laser. O valor corrigido de potência laser aplicada foi 8,96 kW (inicialmente definida como 9 kW), conforme indicação do sistema de supervisão da própria fonte laser.

**Figura 4 -** Curvas de temperaturas obtidas no ensaio com afastamento variado e potência de 8,96 kW.

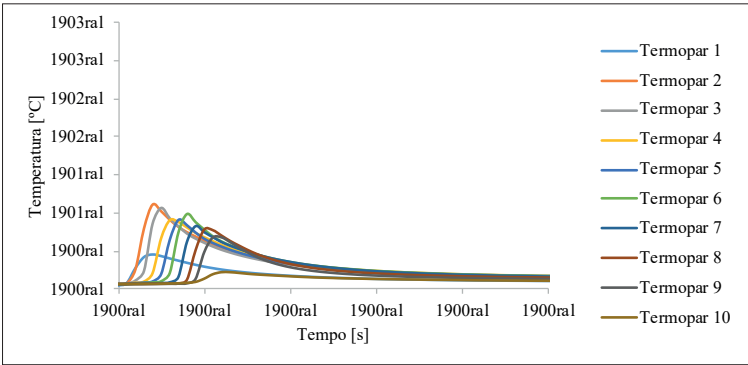


Fonte: autores (2024).

**Ensaio com afastamento constante dos termopares em relação a soldagem**

Para a realização deste ensaio os 10 termopares foram distanciados 5 mm entre si e a 2 mm do centro do cordão desejado. A Figura 5 apresenta dos resultados de temperatura obtidos para o ensaio com potência laser de 2,99 kW. Para efeito comparativo, os gráficos mostrados na sequência deste trabalho são apresentados na mesma escala.

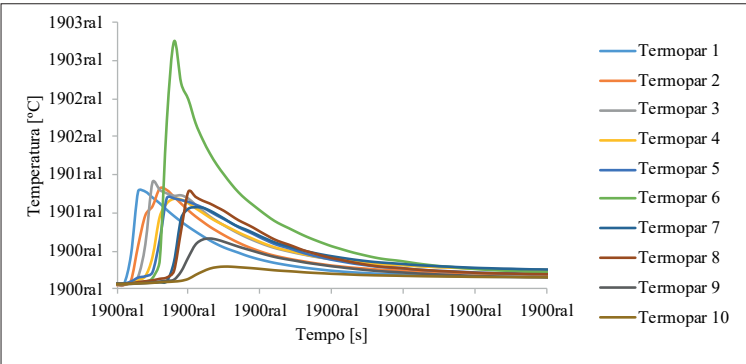
**Figura 5 -** Curvas de temperatura para ensaio com afastamento constante e potência de 2,99 kW.



Fonte: autores (2024).

A Figura 6 apresenta os valores de temperatura obtidos quando a condição de potência do laser é elevada para 5,97 kW durante o ensaio com termopares fixados a uma distância constante da soldagem.

**Figura 6** - Curvas de temperatura para ensaio com afastamento constante e potência de 5,97 kW.



Fonte: autores (2024).

Os ensaios realizados com termopares posicionados a uma distância constante de 2 mm em relação ao centro do cordão apresentaram resultado de temperatura fortemente influenciados pelo intempéries do processo, não sendo apresentado gráfico para este ensaio.

**DISCUSSÃO**

A seguir, são discutidos os resultados obtidos e casos onde perturbações causaram incoerências nos valores de temperatura obtidos.

**Ensaio com afastamento variado dos termopares em relação a soldagem**

No ensaio com termopares afastados gradativamente do centro do cordão de soldagem são encontradas curvas distintas. Como apresentado anteriormente na Figura 4, os termopares situados a 2 mm (termopar 1) e a 4 mm (termopar 2), como esperado, acusaram os maiores valores de temperatura durante o ensaio, próximos a 1200 °C e 600 °C, respectivamente. Para estes também se observa um comportamento no qual ocorre uma elevação da temperatura, seguida de uma estagnação e, por fim, nova elevação. Esse efeito ocorreu como resultado da inércia de movimentação dos eixos, que é elevada se comparada ao tempo de resposta para emissão da fonte laser. Neste ensaio, o laser foi ligado ao mesmo tempo em que iniciou o movimento dos eixos da máquina.

Com o início da emissão, prontamente o laser atingiu a peça e criou um ponto de concentração de calor que, por condução, atingiu os termopares e gerou os patamares de temperatura próximos a 425 °C e 270 °C. A partir do momento em que o deslocamento do laser passa a ser efetivo, a frente de calor avança em direção aos termopares, o que induziu a segunda elevação de temperatura. A elevação considerável da temperatura do termopar 1, que atingiu o valor de cerca de 1200 °C, também pode ser atribuída à exposição às intempéries do processo. Na posição de maior proximidade, o transdutor experimenta maior susceptibilidade aos resíduos aquecidos presentes na poça fundida e no próprio gás aquecido que é expelido pelo processo.

O termopar 6, situado a 12 mm do cordão, apresenta um comportamento inesperado. A temperatura adquirida exibe uma ligeira elevação, seguida por uma redução. Contudo, a curva de aquecimento se recupera após o instante de 2 s, como apresentado anteriormente no gráfico da Figura 4. No instante da recuperação de temperatura, a emissão do laser já foi finalizada, e não há outras fontes de calor presente que pudessem levar a um segundo aumento da temperatura. A primeira diminuição de temperatura acusada pelo termopar pode ser explicada pela sua exposição ao fluxo de gás de proteção no final do ensaio. O fluxo de gás promoveu o arrefecimento do termopar e, ao cessar o fornecimento direcionado de gás, a temperatura do transdutor buscou equilibrar-se com o substrato ainda aquecido. Os termopares 4 e 5 são menos afetados pelo arrefecimento do fluxo, pois em sua posição, mais próxima ao cordão, o calor presente no substrato se sobrepõe ao efeito do resfriamento pelo gás.

O resultado deste ensaio demonstra, como esperado, que na condição de maior proximidade com o cordão há maior sensibilidade à variação de temperatura. Nas demais posições, as condições se tornam facilmente influenciadas por fatores como o fluxo remanescente de gás de proteção. Considerando que o ensaio foi realizado no valor mais elevado de potência (9 kW), consequentemente na condição mais crítica, e que é de interesse a maior sensibilidade possível, optou-se por definir a distância entre os transdutores e o cordão em 2 mm para os ensaios seguintes.

## Ensaio com afastamento constante dos termopares em relação a soldagem

A seguir, são apresentados os principais fatos, que permitem destacar, de forma prática, situações normais de aquisição esperada, ou situações anormais, como indicativos de interferência e até mesmo a destruição dos transdutores durante o processo.

O fornecimento de energia da fonte de calor na soldagem por unidade de comprimento é constante. Portanto, é de se esperar que a temperatura ao longo de um cordão com comprimento infinito seja estável. No caso prático, o comprimento do cordão é limitado e não pode ser considerado constante. No início do cordão tem-se um percurso do deslocamento em que a temperatura se estabiliza e posteriormente atinge-se um percurso no qual, em decorrência da baixa velocidade de expansão da frente das isothermas em relação à velocidade de deslocamento da fonte de calor, o comportamento da temperatura entra em regime. No final do cordão novamente espera-se ter um comportamento instável, devido a diminuição do fornecimento de calor por unidade de comprimento.

No ensaio realizado com potência de laser de 2,99 kW, as temperaturas registradas pelos termopares estão situadas abaixo de 450 °C, como ilustrado anteriormente na Figura 5. Observa-se, neste caso, que o termopar 1 é menos sensibilizado que os imediatamente subsequentes, assim como ocorre com o último termopar. Devido ao acionamento do laser em velocidade constante, estes transdutores das extremidades têm menos tempo de exposição à fonte de calor, ao contrário de seus vizinhos, que experimentam a aproximação, passagem e afastamento do laser por completo.

A posição ao longo do tempo para os picos de temperatura varia à medida que o laser avança sobre o substrato, sensibilizando os termopares em sua sequência de posicionamento. Entretanto, a variação da amplitude destes picos de temperatura passa a ser influenciada fortemente pela posição real entre o termopar e o cordão de solda.

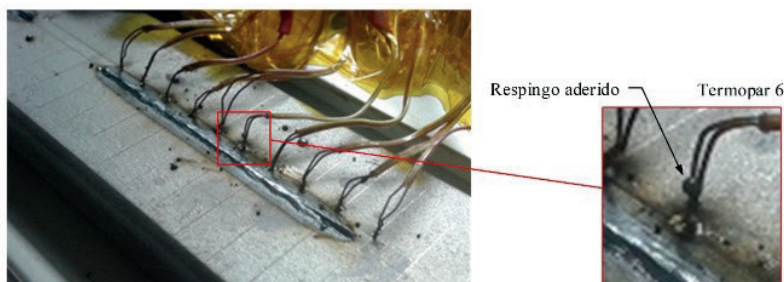
A temperatura média indicada pelos termopares antes da emissão de laser foi de 22,3 °C. Para obter uma leitura relativa mais precisa, é recomendado aguardar que ocorra o equilíbrio térmico entre o substrato e o ambiente, permitindo que a indicação inicial de temperatura de cada termopar se estabilize. Variações podem ocorrer devido à constante manipulação manual. O tempo total de aquisição por ensaio depende do

interesse do usuário pela análise do período de arrefecimento do substrato. Neste caso, utilizando-se uma condição sem resfriamento forçado, o tempo necessário para o retorno do substrato à temperatura média inicial foi de aproximadamente 9,5 minutos. Entretanto, o tempo principal da passagem da onda de calor pelos termopares, como pode ser visto nos gráficos de temperatura, é na ordem de segundos. Este fato reforça a importância de uma escolha adequada da taxa de aquisição dos valores de temperatura durante o ensaio em função do objeto de estudo.

Quando a condição de potência do laser é elevada para 5,97 kW, os patamares mais comuns de temperatura se situam em torno de 520 °C, como apresentado anteriormente na Figura 6. Diferentemente da condição anterior, o primeiro termopar apresenta um valor máximo de temperatura similar aos demais. Com base na avaliação de posicionamento posterior ao ensaio, nota-se que o ponto de início definido ocorreu antes da linha de fixação do termopar 1. Nesta condição, o transdutor permaneceu por mais tempo exposto à fonte de calor. De forma análoga, o termopar 10, cujo final do cordão se antecipou em relação à sua posição, foi o transdutor menos sensibilizado pelo calor gerado.

Contudo, o comportamento que mais se destaca é o do termopar 6, que apresenta uma expressiva taxa de elevação da temperatura, culminando no valor máximo de 1303 °C. Tal desproporcionalidade no valor atingido por um único transdutor expõe claramente uma incoerência nesta medição. Após inspecionar o experimento, verificou-se que o termopar 6 apresentou um respingo aderido nas proximidades da sua junção, como detalhado a seguir na Figura 7. A adesão deste ponto metálico expelido a alta temperatura durante o processo causou a elevação abrupta de temperatura do transdutor.

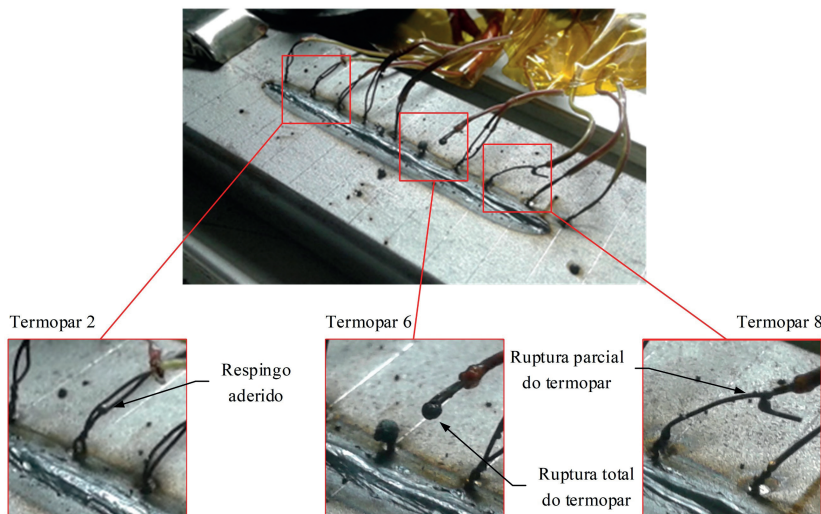
**Figura 7** - Cordão obtido na soldagem autógena laser com potência de 5,97 kW.



**Fonte:** autores (2024).

Na condição anterior, a elevação pronunciada foi um indício para suspeitas sobre a qualidade dos dados adquiridos em relação à temperatura do substrato. Como, para determinados casos, a variação pode ser sutil, recomenda-se sempre uma inspeção visual após o ensaio. Para casos extremos, a interferência pela dinâmica do processo poderá não somente influenciar o valor da medição, mas também destruir os transdutores, , como exposto na Figura 8 a seguir.

**Figura 8** - Danificação de termopares na soldagem autógena laser com uma potência de 8,96 kW.



**Fonte:** autores (2024).

No ensaio realizado com termopares soldados à uma distância de 2 mm do eixo do cordão, para uma potência efetiva do laser de 8,96 kW, verificam-se instabilidades e grande dispersão nos resultados de medição da temperatura. O comportamento da temperatura explicita que em decorrência dos defeitos provocados pela soldagem a laser sobre os termopares, estes foram danificados, rompidos, ou mostraram aderências de respingos em sua superfície.

Devido a estas falhas o resultado da medição de temperatura não pode ser aproveitado. Para a potência de 8,96 kW a distância de fixação dos termopares deve ser aumentada, de forma que a temperatura do cordão não atinja os limites críticos, nem os termopares sejam destruídos pelos respingos ou a irradiação da fonte de calor.

## CONCLUSÃO

A técnica de soldagem por descarga de capacitores demonstrou ser uma ferramenta eficaz para a fixação de termopares em substratos metálicos, permitindo a obtenção de dados de temperatura precisos e confiáveis durante a soldagem a laser. A utilização de uma fita de poliamida para delimitar a área de soldagem simplificou o processo e garantiu resultados consistentes. Os resultados obtidos indicam que a posição de soldagem dos termopares em relação ao cordão de soldagem é crucial para a qualidade das medições, sendo necessário ajustar a distância de fixação em função da potência do laser.

## Agradecimentos

Os autores agradecem ao Laboratório de Mecânica de Precisão (LMP - LASER), à Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e à Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) na realização deste trabalho.

Capítulo representa o artigo apresentado em **XLIV CONSOLDA – Congresso Nacional de Soldagem Uberlândia, MG – de 10 a 13 de Setembro de 2018**

## REFERÊNCIAS

- AMINE, T. *et al.* **Numerical simulation of the thermal history multiple laser deposited layers.** The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 73, no. 9-12, pp. 1625-1631, Aug 2014.
- BETINI, E. G. *et al.* **Effect of post-weld heat treatment on thermal diffusivity in UNS S32304 duplex stainless steel welds.** Archives of Materials Science and Engineering, Article vol. 2, no. 88, pp. 49-58, 2017.
- BISWAL, R. *et al.* **Standardization of laser welding parameters for attachment of thermocouple to pressurized capsule for on-line creep rupture studies.** Procedia Engineering, 2014, vol. 86, pp. 560-566.
- CARRASCO-GONZÁLEZ, L. A. *et al.* **Evaluation of distortion in welding unions of 304 stainless steel with elliptic trajectory using a welding robot.** Characterization of Metals and Alloys, 2016, pp. 217-227.
- MANNINEN, M. *et al.* **Effect of Pulse Length on Engraving Efficiency in Nanosecond Pulsed Laser Engraving of Stainless Steel.** Metallurgical and Materials Transactions B, Article vol. 46, no. 5, pp. 2129-2136, 2015.
- NASCIMENTO, L. A. *et al.* **Avaliação da Influência do Regime Térmico em Ambos os Lados da Junta na Soldagem Orbital.** Soldagem & Inspeção, vol. 21, no. 4, pp. 456-468, 2017.
- NATIONAL INSTITUTES OF HEALTH. ImageJ, Image Processing and Analysis in Java. (2018). Disponível em: <https://imagej.nih.gov/ij/index.html>

## **SOLDAGEM DE PASSE DE RAIZ COM USO DE COBREJUNTAS**

Iaroslav Skhabovskyi  
Universidade Federal de Uberlândia (UFU)

Oksana Kovalenko  
Universidade Federal de Uberlândia (UFU)

# RESUMO

A soldagem de passe de raiz é uma etapa importante na união de metais, particularmente em tubulações, onde a integridade estrutural da solda inicial é determinante para a realização das etapas subsequentes. Contudo, a literatura técnica carece de informação sobre a função, os tipos e o funcionamento dos dispositivos conhecidos como cobrejuntas, empregados para assegurar a precisão e a qualidade de primeiro passe. A revisão tem como objetivo realizar a análise dos diferentes tipos de cobrejuntas, seu funcionamento e aplicações, incluindo as cobrejuntas convencionais e construídas por cordões de ancoramento, que atuam como suporte para a poça de fusão. A pesquisa visa contribuir para o avanço do conhecimento técnico, auxiliando profissionais do setor a otimizar *seus métodos de soldagem de passe de raiz, resultando em soldas com maior qualidade.*

**Palavras-chave:** soldagem a arco elétrico; passe de raiz, cobrejuntas.

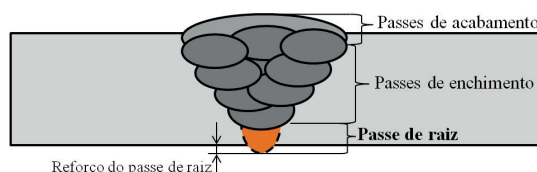
## INTRODUÇÃO

O consumo de energia em todas as suas formas cresce e duplica a cada 10 anos, proveniente de fontes renováveis e não renováveis. Enquanto as fontes renováveis, como solar e eólica, são instáveis, o petróleo e o gás continuam sendo as principais e mais eficazes fontes de energia.

A indústria do petróleo é extremamente complexa e abrange várias áreas além da exploração, como a fabricação de tubulações para oleodutos e gasodutos, que são essenciais para o transporte de petróleo e seus derivados. A produção dessas tubulações é um desafio significativo que requer a integração de múltiplas disciplinas e o esforço conjunto de diversos profissionais. Na soldagem, o objetivo é desenvolver um processo eficiente que aumente a produtividade e a confiabilidade, reduzindo defeitos e a necessidade de reparos nas tubulações.

Na soldagem, diferentes espessuras de metal base determinam o processo, a posição de soldagem e o nível de energia necessários. A soldagem pode ser realizada com um único passe ou múltiplos passes, podendo ser um passe por camada ou vários passes por camada. A escolha do tipo de junta (de topo, em ângulo ou em T) exige preparações específicas do chanfro e ângulos de abertura da raiz. A estrutura e a acessibilidade da junta influenciam se a solda será executada de um lado ou de ambos os lados. Independentemente do método, todas as juntas começam com um passe de raiz, seguido pelos passes de enchimento e acabamento (Figura 1).

**Figura 1** - Esquematização dos passes em uma junta de topo.

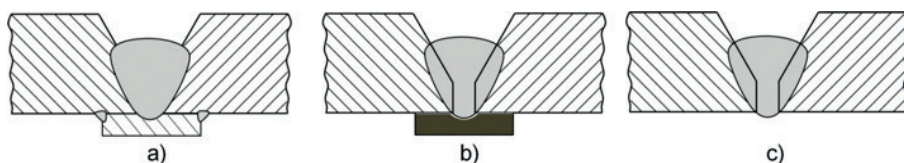


Desta forma, o passe de raiz é início da criação de uma união soldada, entre elas a soldagem de tubos entre si, para fabricação de uma linha de dutos. Ele pode ser por si só, independente, satisfazendo a necessidade de uma junta de pequena espessura, ou servir como base para passes seguintes. Deve provocar

a fusão total nas laterais, apresentar um pequeno reforço externo na parte de baixo e possuir uma espessura suficiente para não perfurar sob a energia dos passes seguintes.

A maior dificuldade na soldagem do passe de raiz é a presença constante de uma folga entre as bordas, que provoca condições não favoráveis para o metal liquido da poça de fusão, possibilitando escoamento ou perfurações. Uma forma de se garantir a formação do passe de raiz em conformidade com o que se espera é o uso de cobrejunta. Cobrejunta é um método seguro para execução da soldagem do passe de raiz, pois permite que se use uma maior energia de soldagem para fundir toda a região, mas mantendo a poça de fusão no lugar até que a mesma se solidifique. Existem cobrejuntas permanentes (Figura 2(a)), que ficam solidários à junta após a soldagem, e postiços (Figura 2(b)), que são removidos após a soldagem. Desta forma, no caso do cobrejunta permanente, há a fusão do mesmo juntamente com as arestas da junta na confecção do passe de raiz. Os postiços, por outro lado, permitem modelar o acabamento do lado externo da raiz.

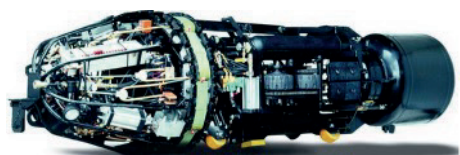
**Figura 2** - Passe de raiz com cobrejunta: (a) permanentes, durante e após a soldagem; (b) postiços, durante a soldagem; (c) a raiz após a remoção do cobrejunta postiço.



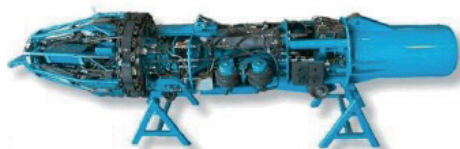
Os cobrejuntas permanentes são menos caros e mais práticos, mas têm ponderáveis desvantagens, como serem concentradores de tensões e produzirem redução de espaço para passagem de fluido. Por estas razões, em tubulações para passagem petróleo ou gás se evita o uso de cobrejuntas permanentes. Os postiços (de cobre ou cerâmico), ao contrário, permitem melhor geometria externa da raiz e menos concentração de tensão, mas ainda assim apresentam limitações operacionais. Por exemplo, na construção das linhas de tubulações em terrenos retos, amiúde se utilizam centralizadores internos, normalmente referenciados como IWM (*"Internal Welding Machine"*), como ilustra a Figura 3, que ao se posicionarem sob a região da junta permitem, além de agirem como cobrejuntas, também centralizar os dois eixos de tubos (posicionador de juntas). Normalmente

são máquinas pneumáticas, que expandem garras externas quando posicionados entre dois tubos a soldar, pressionando de dentro para fora as paredes de cada tubo, forçando um melhor alinhamento e menor desalinhamento das paredes dos chanfros em cada tubo. Ao mesmo tempo, também por expansão, posiciona um cobrejunta postiço de cobre sob a linha de união. Portanto, trata-se de equipamentos complexos e caros. A utilização dos IWM é limitada pelo diâmetro de tubo (aplicáveis para diâmetros acima de 24") e pela configuração de linha de tubulações. Para diâmetros de tubos abaixo de 24" utilizam os centralizadores internos com cobrejuntas (Figura 4).

**Figura 3** - Centralizadores internos (*IWM, Internal Welding Machine*) para soldagem passe de raiz de lado interno.

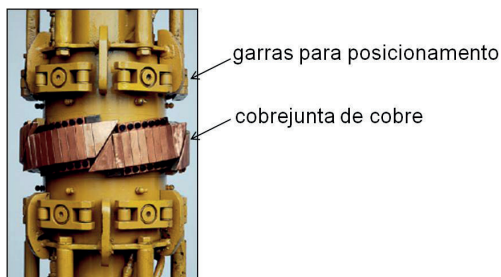


CRC-Evans AW, USA



RMS, Canada

**Figura 4** - Centralizador interno com garras para posicionamento e alinhamento dos tubos e cobrejunta de cobre expansíveis para soldagem passe de raiz.



Assim, a soldagem de passes de raiz com o uso de cobrejuntas é uma prática importante na indústria. A operação de soldagem de tubulações em campo ser feita de forma manual (por TIG ou Eletrodo Revestido) ou semiautomática (MIG/MAG ou Eletrodo Tubular). Forma manual é mais flexível e o soldador tem grande controle sobre a poça de fusão, conseguindo visualizar a poça, executar correções, mudando inclinação ou posição da tocha, aumentando ou diminuindo velocidade de soldagem, adicionando mais ou menor material de adição, etc. Desta forma, os processos manuais e semi-automáticos são bastante adequados para se realizar passes de raiz.

Cobrejuntas têm sido usados há tempos para facilitar a confecção de passes de raiz, por se caracterizar como um suporte sob o chanfro para o metal líquido (poça de fusão), até sua solidificação. Desta forma, não se precisa preocupar tanto com os parâmetros de soldagem para evitar a perfuração. Mas existem dificuldades operacionais para o emprego de cobrejuntas, dificuldades estas que se tornam maiores em soldagem de tubulações. Por isto, se faz ao longo dos tempos tentativas de se inventar métodos de se usar cobrejuntas nas soldagens de tubulações de formas mais práticas.

A partir de 1950, quando no mundo rapidamente começou crescer a área de produção de petróleo e gás, aumentou substancialmente a quantidade de invenções correspondentes à soldagem de tubulações. O maior problema na fabricação das tubulações em campo é a obtenção do alinhamento e nivelamento entre tubos. Por isto, o principal objetivo das invenções desde então foi garantir essas condições, pela utilização de mecanismos especiais, agindo por fora ou por dentro dos tubos, possibilitando a soldagem de forma interna ou externa.

A seguir estão apresentados os métodos e as técnicas patenteadas de realização de passe de raiz com uso de cobrejuntas pelos diferentes processos de soldagem (MIG/MAG, TIG etc.).

## REVISÃO

***Soldagem de passe de raiz com uso de cobrejunta.*** Uma das vertentes foi pela procura de equipamentos que pudessem fazer o alinhamento e nivelamento entre tubos através de um equipamento que se movimenta internamente ao tubo (denominados, acopladeiras internas ou popularmente como "*pigs*") e, através de

grampos ("clamps") expansíveis, alinhar e nivelar as duas pontas dos tubos para realizar a soldagem, como ilustra a Figura 5. Nesta direção, pode-se citar em ordem cronológica as patentes de Adams e Mayer (1952), com patente *US 2615414 (A)*; a de Lamar (1969), *US 3458106 (A)*; a de Edmund e Reginald (1972), *US 3699635*; e a de Jones (1992) *US 5090608 (A)*.

Uma outra forma pesquisada e desenvolvida foi a de fixar os tubos por fora, chamados de acopladeiras externas, como ilustra a Figura 6. Trata-se de grampos de fixação na forma de cintas externas para garantir a fixação das pontas dos tubos. Como exemplo destes dispositivos, pode-se citar: Rogers (1968), patente *US 3400872 (A)*; Barry (1969), patente *US 3422519 (A)*; Leon (1970), patente *US 3512229 (A)*; e Clarc (1975), patente *US 3920232 (A)*.

**Figura 5** - Exemplos de acopladeiras internas ("pigs").

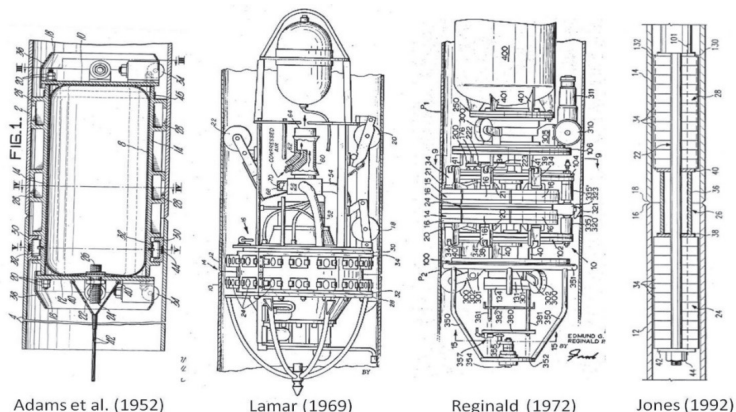
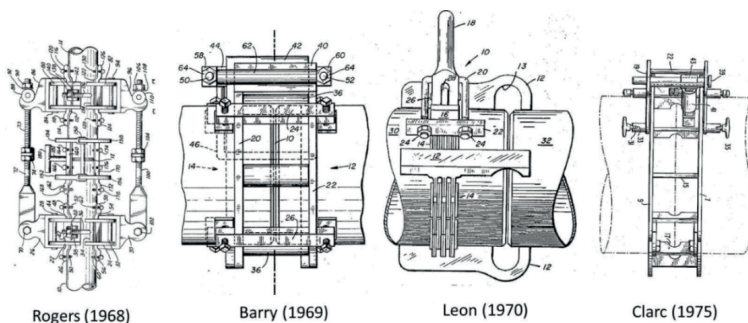
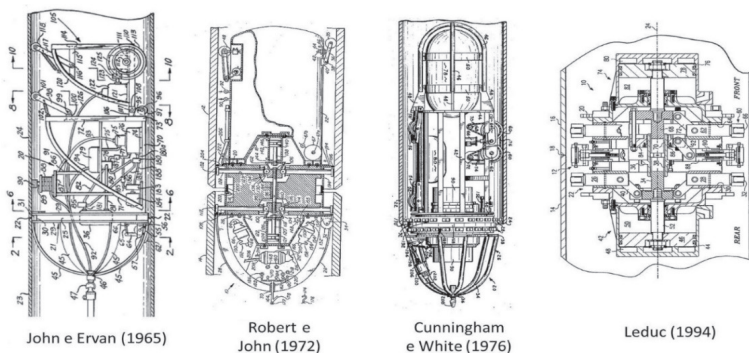


**Figura 6** - Exemplos de acopladeiras externas.



Estas duas formas de acoplamento de tubos facilitam muito a execução do passe de raiz, mas não são condições suficientes para garantir a sanidade do passe de raiz em soldagens automatizadas. Por isto, têm sido desenvolvidos equipamentos que, além de acopladoras, agem também como cobrejunta (Figura 7). John e Ervan (1965) patentearam o equipamento "*Internal expanding line-up pipe clamp*" (US 3197195 (A)). Robert e John (1972), inventaram o "*Internal pipe lineup clamp*", usando cobrejunta de fluxo (patente US 3633813 (A)). Já Ballis et al. (1973) patentearam (US 3741457 (A)) o "*Lineup clamp and backup device*", enquanto Kaneyama, Murakami e Nakamura (1976) desenvolveram o "*Clamping mechanism for line-up of pipes*" (US 3979041 (A)). Ainda nesta direção, Cunningham e White (1976) fizeram a patente US 3937382 (A), "*Internal pipe clamp with weld backup*". Chang e Renshaw (1980) patentearam o "*Automatic pipe welding apparatus and method*" (US 4216896 (A)). Rinaldi (1992) patenteou sua invenção denominada "*Weld suporting ring for pipes*" (US 5110031 (A)), enquanto Leduc (1994), pela CRC-Evans Pipeline International, patenteou o dispositivo "*Internal line up clamp*" (US 5356067 (A)).

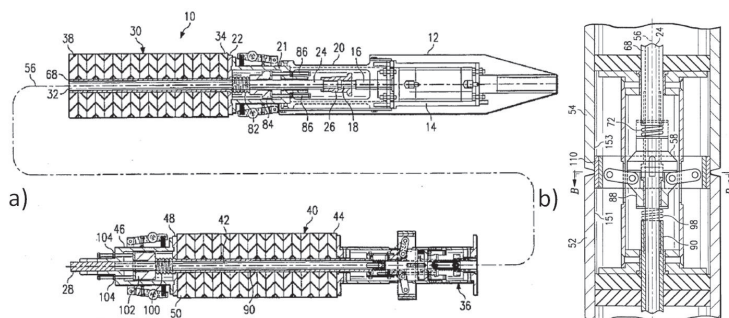
**Figura 7** - Os exemplos de acopladeiras internas ou popularmente como "*pigs*" com cobrejuntas.



Na procura por formas de se usar cobrejuntas em soldagens de tubos, uma das mais novas invenções é a de Dierlam (pela CRC-Evans Pipeline International), que em 1997 depositou a patente "*A Plug style pipe line-up clamp with copper back-up shoes*" (US 5597108 (A)), onde reivindica ter desenvolvido a primeira máquina interna para centralizar tubos de diâmetro "pequeno" e realizar a soldagem passe de raiz com uso de cobrejunta. O mecanismo de fixação do

cobrejunta à superfície interna do tubo funciona através de cilindros hidráulicos, como ilustra a Figura 8.

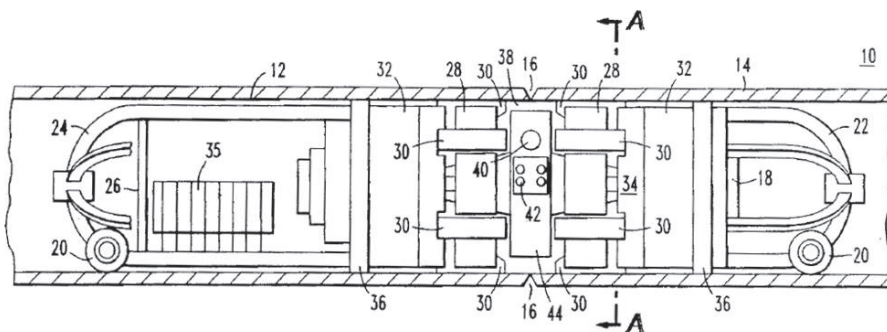
**Figura 8** - a) vista geral da máquina interna para soldagem tubulações de acordo com a patente US 5597108 (A); b) vista ilustrativa da parte central da máquina, onde (110) representa o cobrejunta expansível por um mecanismo hidráulico.



Fonte: Dierlam, 1997.

Hirsch e Pillard (1996) propuseram através da patente intitulada *Pipe clamping device* (US 5583305 (A)) utilizar um equipamento complexo para executar o controle de qualidade dos passes de raiz, como ilustra a Figura 9. O equipamento não tem como objetivo oferecer um cobrejunta para a soldagem passe de raiz, mas oferece uma vazão de gás de proteção, que pode ser usado como proteção de raiz de lado inteiro. O equipamento pode ser completado pelo uma tocha de soldagem e executar a soldagem do passe de raiz de lado interno. Mas a inovação tem como particularidade a modificação para melhoria de máquinas similares já existentes (acopladeiras internas), a saber, presença de uma câmara de filmagem ou um outro objeto de ensaio não destrutivo, que na hora da soldagem ou depois da soldagem possa apresentar dados do estado de qualidade de passe de raiz. O motivo desse inovação foi garantir a qualidade de passe de raiz antes de realizar a soldagem dos passes de enchimento e de acabamento. No caso de presença de um defeito, a máquina permite realizar reparo, a saber, a máquina é equipada com um disco rotacional que tem um suporte, no qual pode ser fixada uma ferramenta, como escova, disco para lixar, eletrodo, etc.

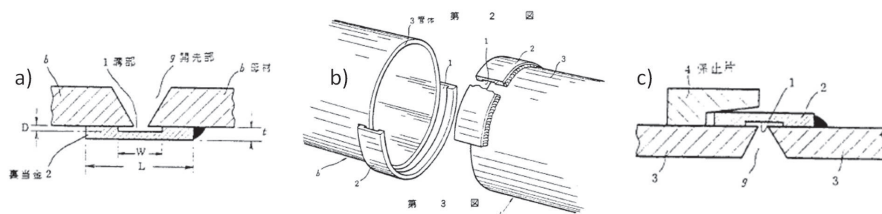
**Figura 9** - Ilustração de equipamento da patente *US 5583305 (A)*, onde (12) e (14) são os tubos a ser unidos de topo, (16) é o chanfro para união, (28) é o mecanismo para fixação o equipamento dentro de tubos, (44) é uma base rotacional, (40) é a câmera de filmagem ou de um objeto de ensaio não destrutivo e (42) são as lâmpadas para iluminar passe de raiz de lado inteiro.



**Fonte:** Hirsch e Pillard (1996).

Uma outra abordagem para o uso de cobrejuntas e soldagens de tubulações foi encontrada no resumo (Abstract) da patente dos cientistas Michiharu, Yuji e Tadashi (1991), denominada *One-side welding procedure*, cuja referência *JPH 03180275 (A)* indica ser originalmente na língua japonesa. Eles tentaram mostrar como o cobrejunta faz melhorar a qualidade do cordão da raiz em soldagem de um único lado (de lado interno) em juntas de topo chanfradas. A Figura 10 ilustra a configuração do cobrejunta (a) por eles proposto, cujas dimensões principais são a espessura ( $t$ ) que deve ser  $\geq 6$  mm e largura ( $L$ ) de 30 a 100 mm, o qual tem um chanfro pré-usinado (1), com profundidade ( $D$ ) de 0,4 mm a 1,2 mm, largura ( $W$ ) de 10 a 30 mm, para dar acabamento ao reforço da raiz, e é fixado em um dos metais de base (no caso da presente figura, no da direita) por soldagem. Por este método, a soldagem completa pode ser realizada sem necessidade de boa precisão na preparação do chanfro. Figura 2.6(b) indica que o cobrejunta está de lado externo e (c) mostra que cobrejunta está soldado por um lado do tubo e o outro está posicionado por um fixador.

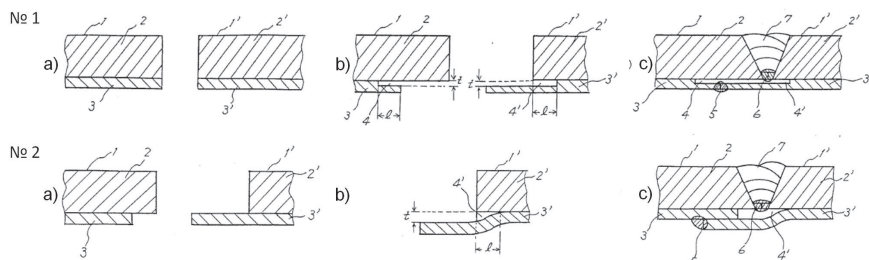
**Figura 10** - Ilustração de montagem dos elementos principais do método de soldagem da patente JPH 03180275 (A).



Fonte: Michiharu, Yuji e Tadashi (1991).

Já os cientistas Takeshi e Teruhiko (1991), patentearam um método (*Circumferential welding method for double pipes – JPH 03207575 (A)*), para melhorar a eficiência da instalação, redução do custo e garantia de manutenção de uma elevada resistência mecânica e elevada resistência à corrosão na soldagem de duplo tubos (um dentro de outro) através de preparação de junta especial. Apesar da semelhança com o uso de cobrejuntas, este método, como se verá pela descrição, difere dessa abordagem, sendo apresentado aqui apenas pela semelhança. A Figura 11 ilustra configuração de junta. O duplo tubo 1 (à esquerda) é constituído por um tubo externo 2 e um tubo interno 3 enluvado internamente, de matérias dissimilares. De forma análoga, o tubo 1' (à direita) é composto por um tubo externo 2' e um tubo interno 3', também de materiais dissimilares. Antes da união, os tubos 3 e 3' são removidos e usinados para formar a folga 4 e 4', respectivamente. Também são feitos chanfros nos tubos 2, 2', 3 e 3', para serem soldados de topo. A descrição da patente não deixa claro, mas a soldagem entre os tubos externos 1 e 1' é feita pelo lado de fora, enquanto os tubos internos são soldados pelo lado de dentro. A criação está no fato de não haver diluição do cordão de solda entre tubos 2 e 2' (6) com o material dos tubos 3 e 3' e nem entre o cordão de solda entre tubos 3 e 3' (5) com o material dos tubos 2 e 2', devido ao espaçamento (4 e 4') entre os tubos, garantindo as propriedades desejadas. Presente invenção pode ser utilizado nos processos GMAW, GTAW e SMAW.

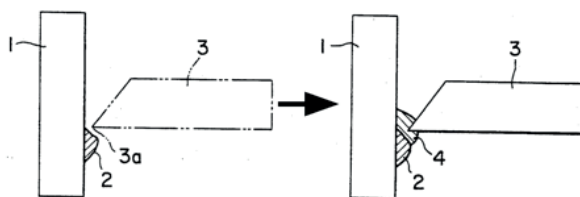
**Figura 11** - Ilustração da configuração da junta na soldagem duplo tubos da patente *JPH 03207575 (A)*, onde (1) e (1') são os tubos externos (ver qual a diferença entre 1 e 2), (3) é o tubo interno, (tente me mostrar a diferença entre 3, 3', 4 e 4') (4) é o espaçamento entre as paredes do tubo na região da solda, (5) é o cordão de solda que liga os tubos interno, (6) é o passe de raiz da união entre os tubos externo, (7) são os cordões de enchimento e acabamento e (t) é a folga entre tubo externo e inteir.



Fonte: Takeshi e Teruhiko (1991).

**Soldagem de passe de raiz através da colocação de cordões de ancoramento.** Há métodos que não utilizam as cobrejuntas, mas usam as estratégias de construção de suporte para facilitar a soldagem de passe de raiz. Hasegawa *et al.* (1993) desenvolveram e patentearam um método para soldar passes de raiz em juntas do tipo "T" (*Root pass bead welding method - US 5202546 (A)*), que no caso evita a utilização de qualquer cobrejunta convencional. Como mostra a parte esquerda da Figura 12, primeiro, antes de colocar as partes para soldar, é feito um passe de ancoramento (suporte) na parte vertical do metal de base.

**Figura 12** - Princípio de realização do método de soldagem da patente *US 5202546 A*, onde (1) e (3) são as partes que foram soldadas, (2) é o passe de ancoramento, (3a) é o chanfro e (4) é o passe de raiz



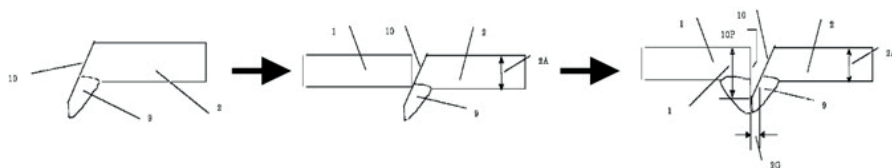
Fonte: Hasegawa et al. (1993).

Depois que as partes da junta são posicionadas, o passe de raiz é realizado. Os autores mencionam que este método ajuda a minimizar o perigo de perfuração, produzindo cordões com boa aparência e qualidade na face de raiz.

Masakatsu e Shunji (2003) desenvolveram um método para soldar passes de raiz em tubos acessando apenas o lado externo dos mesmos (*Single side welding method of conduit and pipe - JP2003048067 (A)*), aparentemente utilizando o

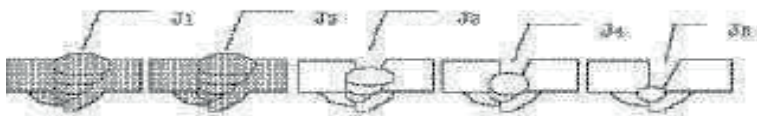
princípio de Hasegawa *et al.* Os autores realizam o processo de soldagem camada por camada aumentando a espessura das paredes da junta como que formando um cobrejunta (suporte) ou semelhante, que não funde por uma fonte de calor de soldagem na junta soldada sem a utilização de qualquer cobrejunta durante soldagem. Uma parte do metal de base é chanfrada e outra não, sendo que a parte que é chanfrada vai ser preenchida e vai fundir e unir a outra parte. Desse modo, a espessura das chapas (partes) soldadas pode ser aumentada. O processo de soldagem é multipasse e pode ser feito manualmente por um soldador. A Figura 13 mostra o esquema de preparação da junta pela presente invenção e já a Figura 14 ilustra passo a passo (de esquerda à direita) do método de soldagem dos tubos e tubulações de um lado. Como a presente patente é em japonese, apenas abstract é em inglês, mais informações foi difícil de entender.

**Figura 13** - Esquema do método de preparação da junta para soldagem dos tubos de um lado (seqüência da esquerda para direita) da patente JP2003048067 (A) com seus elementos principais, onde (1) e (2) são os tubos, (9) passes de selamento, (10) é o chanfro, (1A) é a espessura de tubo e (1G) é a folga



**Fonte:** Masakatsu e Shunji (2003).

**Figura 14** - Esquema do método de soldagem dos tubos e tubulações de um lado (seqüência da direita para esquerda) da patente JP2003048067 (A)



**Fonte:** Masakatsu e Shunji (2003).

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

A importância da soldagem de passe de raiz é o aspecto fundamental que não pode ser subestimado, especialmente em aplicações industriais críticas como tubulações, onde a integridade da solda inicial é crucial para a segurança e

durabilidade do sistema como um todo. O mercado oferece uma ampla variedade de opções de cobrejuntas e há métodos alternativos. A escolha da forma de soldagem pode ter um impacto significativo na qualidade final, eficiência operacional e gastos financeiros. Entre os dois métodos apresentados, o uso de cobrejuntas convencionais se destaca por seu potencial em oferecer dispositivo de alto grau tecnológico e de confiabilidade. Isso se deve, em grande parte por proporcionar a maior precisão e controle sobre o processo de soldagem. Por outro lado, o método de construção de cordões de ancoramento apresenta uma alternativa mais econômica, mas que exige um alto nível de destreza e habilidade por parte do soldador. Esse método, apesar de ser mais acessível, apresenta maior incerteza em atender padrões de qualidade e requisitos de normas técnicas. A escolha entre os métodos deve equilibrar requisitos técnicos, recursos disponíveis e as condições específicas de cada aplicação.

## **Agradecimentos**

Autores agradecem à CAPES pelo suporte com bolsa, ao Laboratório para Desenvolvimento de Processos de Soldagem – LAPROSOLDA/UFU e a Pós-Graduação da FEMEC pela infraestrutura, equipamentos e consumíveis utilizados

## **Declaração de Responsabilidade**

Os autores são os únicos responsáveis por este trabalho

## **REFERÊNCIAS**

ADAMS, O. P.; MAYER, G. R. G. Internal pipe aligning clamp. United States Patent, Patent N. US 2615414 (A). Out. 1952.

BALLIS, W.; CHEW, C.; CHURCHHEUS, C.; GWIN, R.; HALL, A.; HUTT, B. Lineup clamp and backup device, United States Patent, Patent N. US 3741457 (A). Jun. 1973.

BARRY, F. F. Lineup clamp for pipe, United States Patent, Patent N. US 3422519 (A). Jan. 1969.

CHANG, N. M.; RENSHAW, R. Automatic pipe welding apparatus and method, United States Patent, Patent N. US 4216896 (A). Ago. 1980.

CLARK, J. Apparatus for aligning pipe ends, United States Patent, Patent N. US 3920232 (A). Nov. 1975.

CUNNINGHAM, J. A.; WHITE, J. L. Internal pipe clamp with weld backup, United States Patent, Patent N. US 3937382 (A). Fev. 1976.

DIERLAM, O. T. Plug style pipe line-up clamp with copper back-up shoes, United States Patent, Patent N. US 5597108 (A). Jan. 1997.

EDMUND, B. G.; REGINALD W. P. Internal line-up clamp for pipe lines, United States Patent, Patent N. US 3699635 (A). Out. 1972.

HASEGAWA, H.; MIYAGAWA, K.; NAKAYAMA, S.; TANAKA, M. Root pass bead welding method, United States Patent, Patent N. US 5202546 (A). Abr. 1993.

HIRSCH, D. J.; PILLARD, M. M. Pipe clamping device, United States Patent, Patent N. US 5583305 (A). Dez. 1996.

JOHN, S. W.; ERVAN H. W. Internal expanding line-up pipe clamp, United States Patent, Patent N. US 3197195 (A). Jul. 1965.

JONES, R. L. Resilient lineup clamp, United States Patent, Patent N. US 5090608 (A). Fev. 1992.

KANEYAMA, K.; MURAKAMI, T.; NAKAMURA, M. Clamping mechanism for line-up of pipes, United States Patent, Patent N. US 3979041 (A). Set. 1976.

LAMAR, T. V. Vacuum supply for internal pipeline line-up clamp seal space, United States Patent, Patent N. US 3458106 A. Jul. 1969.

LEDUC, T. Internal line up clamp, United States Patent, Patent N. US 5356067 (A). Out. 1994.

LEON, F. P. Outside pipe lineup clamp, United States Patent, Patent N. US 3512229 (A). Mai. 1970.

MASAKATSU, U.; SHUNJI, I. Single side welding method of conduit and pipe, European Patent Specification, Patent N. JP2003048067 (A). Fev. 2003.

MICHIHARU, Y.; YUJI, Y.; TADASHI, M. One-side welding procedure, European Patent Specification, Patent N. JPH 03180275 (A). Ago. 1991.

RINALDI, F. Weld suporting ring for pipes, United States Patent, Patent N. US 5110031 (A). Mai. 1992.

ROBERT, L. L.; JOHN S. W. Internal pipe lineup clamp, United States Patent, Patent N. US 3633813 (A). Jan. 1972.

Rogers, D. Lineup clamp, United State Patent, Patent N. US 3400872 (A). Set. 1968.

TAKESHI, T.; TERUHIKO, H. Circumferential welding method for double pipes, European Patent Specification, Patent N. JPH 03207575 (A). Sep. 1991.

# **SOBRE A ORGANIZADORA**

## **Oksana Kovalenko**

Possuí graduação em Engenharia de Soldagem pela Universidade Técnica Nacional da Ucrânia "Instituto Politécnica de Kiev de Igor Sikorsky" (2011) e em Engenharia Mecânica pela UNA Uberlândia (2018). Possuí mestrado realizado pelo programa de Duplo Diploma em Engenharia de Soldagem pela mesma universidade na Ucrânia e em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Uberlândia (2014). Possuí título de doutorado em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Uberlândia (2019). Atuou como professora substituta de Instituto Federal de Brasília na área de mecânica (2020-2022). Atualmente é pesquisadora na área de Manufatura Aditiva. Áreas de interesse: Processos de soldagem; Fundamentos e Conceitos de Soldagem; Manufatura Aditiva; Calorimetria; Materiais Ferrosos e não Ferrosos. Ensino Técnico e Superior, Pesquisa e Inovação.

**Lattes:** <http://lattes.cnpq.br/0442994628896416>

# ÍNDICE REMISSIVO

## A

**Aço:** 19, 22, 23, 24, 36, 37, 38, 39, 43, 45, 46, 48, 52, 53, 54, 58, 60

**Aquisição de Sinais:** 56, 60

**ASTM A36:** 20, 22, 23, 24, 27, 36, 53

## C

**Ciclos Térmicos:** 56, 57, 58

**COBREJUNTAS:** 73, 74, 76, 77, 78, 80, 82, 83, 84, 86

**Cutting Fluid:** 8, 10, 11, 12, 14, 17

**Cutting Parameters:** 8

## G

**GMAW-P:** 20, 21, 36

## M

**Machinability:** 8

**Machining Forces:** 7, 8, 9, 12, 13, 14, 16

**Metal Cored:** 19, 20, 21, 22, 23, 26, 29, 36

## P

**Parâmetro de Corte:** 39

**PASSE DE RAIZ:** 73, 74, 75, 76, 77, 78, 80, 81, 82, 84, 85

**Plasma:** 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 49, 52, 53, 54

## S

**SOLDAGEM A ARCO ELETRICO:** 74

**Soldagem Robotizada:** 19, 20

## T

**Taxa de Deposição:** 20, 27, 28, 29, 36

**Temperatura:** 24, 25, 26, 27, 31, 32, 33, 34, 40, 42, 44, 45, 46, 52, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 62, 63, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72

**Termopar Tipo K:** 56



científica digital



VENDA PROIBIDA - ACESSO LIVRE - OPEN ACCESS

