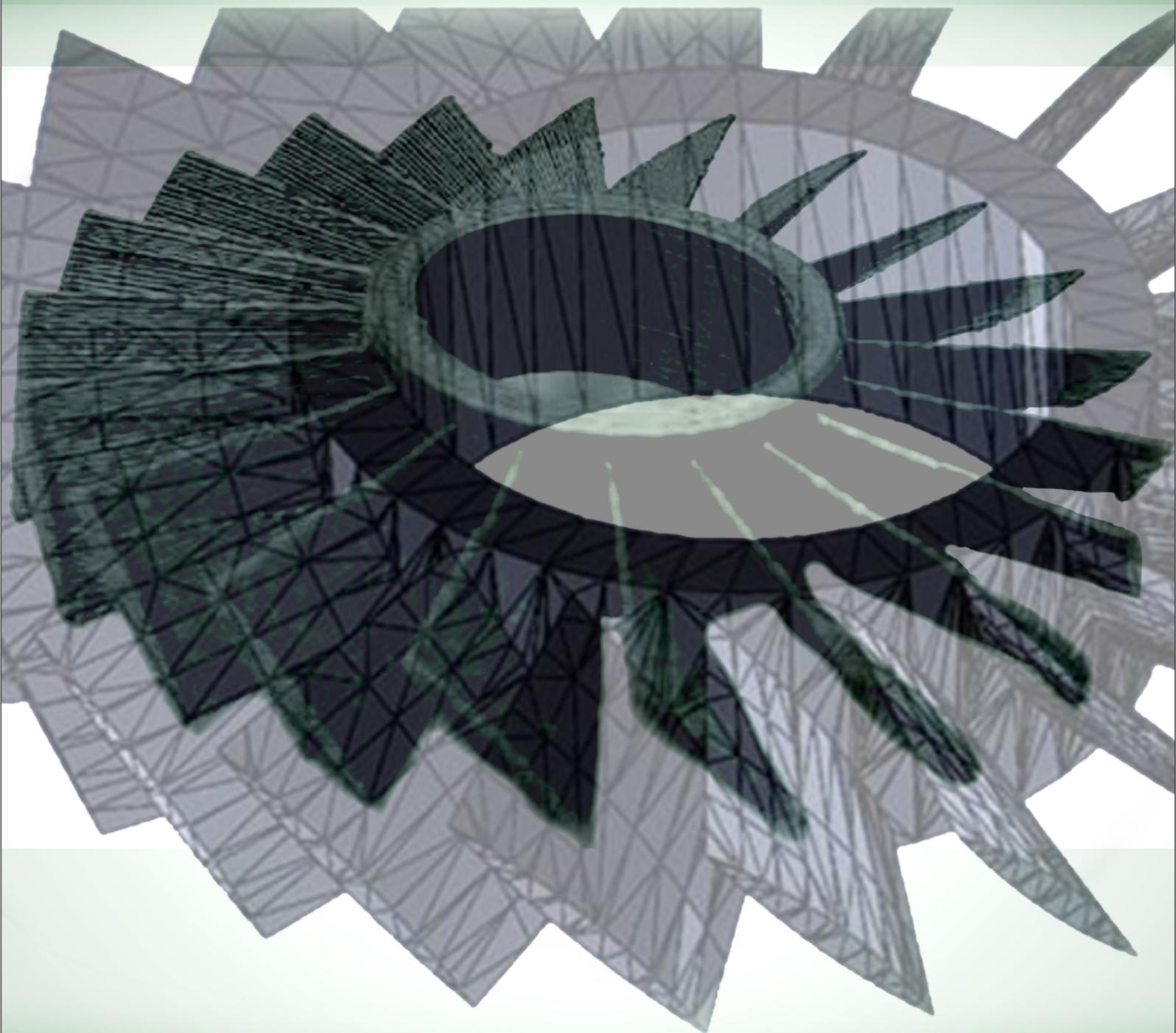


# A Engenharia Mecânica na UTFPR

## Volume 2 - 2020



*Organizadores:*

**Fábio Martins**

**Laércio Javares Junior**

**Rodrigo Lupinacci Villanova**

ORGANIZADORES  
FÁBIO MARTINS,  
LAÉRCIO JAVAREZ JUNIOR,  
RODRIGO LUPINACCI VILLANOVA

# A ENGENHARIA MECÂNICA NA UTFPR

---

---

VOLUME 2 - 2020



CASA LETRAS  
PORTO ALEGRE  
2020

Copyright ©2020 dos organizadores.

Os dados e conceitos emitidos nos trabalhos, bem como a exatidão das referências bibliográficas, são de inteira responsabilidade dos autores.



LICENCIADA POR UMA LICENÇA CREATIVE COMMONS

### Atribuição - Não Comercial - Sem Derivadas 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0)

#### Você é livre para:

**Compartilhar** - copie e redistribua o material em qualquer meio ou formato. O licenciante não pode revogar essas liberdades desde que você siga os termos da licença.

**Atribuição** - Você deve dar o crédito apropriado, fornecer um link para a licença e indicar se foram feitas alterações. Você pode fazê-lo de qualquer maneira razoável, mas não de maneira que sugira que o licenciante endossa você ou seu uso.

**Não Comercial** - Você não pode usar o material para fins comerciais.

**Não-derivadas** - Se você remixar, transformar ou desenvolver o material, não poderá distribuir o material modificado.

**Sem restrições adicionais** - Você não pode aplicar termos legais ou medidas tecnológicas que restrinjam legalmente outras pessoas a fazer o que a licença permitir.

Este é um resumo da licença atribuída. Os termos da licença jurídica integral está disponível em:  
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode>

#### Expediente:

*Projeto gráfico e diagramação:*  
Casalettras

*Capa:*  
Fábio Martins, Laércio Javarez Junior, Rodrigo Lupinacci Villanova

*Editor:*  
Marcelo França de Oliveira

#### Conselho Editorial

Prof. Dr. Amurabi Oliveira (UFSC)  
Prof. Dr. Aristeu Elisandro Lopes (UFPEL)  
Prof. Dr. Elio Flores (UFPB)  
Prof. Dr. Fábio Augusto Steyer (UEPG)  
Prof. Dr. Francisco das Neves Alves (FURG)  
Prof. Dr. Jonas Moreira Vargas (UFPEL)  
Prof.ª Dr.ª Maria Eunice Moreira (PUCRS)  
Prof. Dr. Moacyr Flores (IHGRGS)  
Prof. Dr. Luiz Henrique Torres (FURG)

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

A11193 A Engenharia Mecânica na UTFPR - Volume 2 - 2020 / Fábio Martins, Laércio Javarez Junior, Rodrigo Lupinacci Villanova (Orgs.). [ Recurso eletrônico ]  
Porto Alegre: Casalettras, 2020.

190p.  
Bibliografia  
ISBN: 978-65-86625-14-1

1. Engenharia mecânica- 2. Engenharia mecânica e de materiais - 3. Registros e relatos de pesquisa- 4. Universidade Federal Tecnológica do Paraná - I. Martins, Fabio - II. Javarez Junior, Laercio - III. Villanova, Rodrigo Lupinacci - IV. Título

CDU:620

CDD:620.1



EDITORA CASALETRAS  
R. Gen. Lima e Silva, 881/304 - Cidade Baixa  
Porto Alegre - RS - Brasil CEP 90050-103  
+55 51 3013-1407 - contato@casaletras.com  
[www.casaletras.com](http://www.casaletras.com)

# SUMÁRIO

PREFÁCIO.....	6
A COMPARISON OF CYCLONE PERFORMANCE MODELS APPLIED TO A SMALL CIRCULATING FLUIDIZED BED .....	7
ANDREL DE SOUZA PECETE JHON JAIRO RAMIREZ BEHAINNE	
POROSITY ANALYSIS IN ALUMINUM WELDS BY GRAVIMETRY METHOD.....	21
ANIZIO CESAR SILVEIRA DE SOUZA LAÉRCIO JAVAREZ JUNIOR RODRIGO LUPINACCI VILLANOVA FÁBIO MARTINS	
EFEITOS DA LAMINAÇÃO A FRIO NA MICROESTRUTURA DE DOIS AÇOS INOXIDÁVEIS DÚPLEX.....	34
DENILSON JOSÉ MARCOLINO DE AGUIAR RONALD LESLEY PLAUT MANOEL RIBEIRO DA SILVA NELSON BATISTA DE LIMA ANGELO FERNANDO PADILHA	
CARACTERIZAÇÃO DINÂMICA DO MÓDULO COMPLEXO DE ELASTICIDADE DE MATERIAIS TERMOREOLOGICAMENTE SIMPLES CONSIDERANDO OS EFEITOS DA TEMPERATURA, FREQUÊNCIA E DEFORMAÇÃO .....	49
EDUARDO GREGORIO OLIENIK FILHO CARLOS ALBERTO BAVASTRI	
O BAMBU COMO MATERIAL PARA ENGENHARIA – PRODUTOS, ENSAIOS E MODELAMENTO .....	61
FABIANO OSTAPIV CELSO SALAMON	
VIRTUAL REALITY AND AUGMENTED REALITY: A PRACTICAL APPROACH OF TOPICS RELATED TO ENGINEERING.....	77
FELIPE BARRETO CAMPELO CRUZ	
ANÁLISE DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DA LIGA WASPALLOY SUBMETIDA A TRATAMENTO TÉRMICO DE ENVELHECIMENTO POR MEIO DE ENSAIO DE CORRENTES PARASITAS.....	87
GUILHERME HENRIQUE MOLINARI LOPES SANDRA MARA KAMINSKI TRAMONTIN ANDERSON GERALDO MARENDIA PUKASIEWICZ	

ESTUDO COMPARATIVO ENTRE O PROCESSO DE ALARGAMENTO E FURAÇÃO COM BROCA HELICOIDAL COM DIFERENTES ÂNGULOS DE PONTA EM AÇO SAE 4140 .....	101
HENRIQUE AJUZ HOLZMANN CARLA LUIZA COSTA DOS SANTOS IGOR VILCZEK	
APLICAÇÃO DAS TÉCNICAS DE ANÁLISES DE SINAIS VIBROACÚSTICAS E REDES NEURAS ARTIFICIAIS PARA A OPTIMIZAÇÃO E MODELADO DE PROCESSOS DE SOLDAGEM POR FRICÇÃO E AGITAÇÃO ..	113
HIPÓLITO DOMINGO CARVAJAL FALS LUCIANO AUGUSTO LOURENÇATO ANGEL SÁNCHEZ ROCA MARIO SÁNCHEZ OROZCO	
ESTUDO DE APLICAÇÃO DO MODELO DE GESTÃO <i>LEAN STARTUP</i> E USO DE <i>UX DESIGN</i> PARA O DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS VOLTADOS PARA A INTERNET DAS COISAS.....	134
JEFFERSON GUND CARLOS CZIULIK	
DESEMPENHO TÉRMICO DE TERMOSSIFÕES DESTINADOS A COLETORES SOLARES DE TUBOS A VÁCUO DE ALTA PRESSÃO UTILIZANDO NANOFLUIDOS DE ÓXIDO DE GRAFENO .....	153
PEDRO LEINEKER OCHOSKI MACHADO GUILHERME ANTONIO BARTMEYER VÍCTOR VAUREK DIMBARRE ROGÉRIO DE OLIVEIRA SOUZA VINÍCIUS MARIANI LENART ROZANE DE FÁTIMA TURCHIELLO GOMEZ PAULO HENRIQUE DIAS DOS SANTOS THIAGO ANOTNINI ALVES	
PROJETO DA FERRAMENTA PARA O PROCESSO DE SOLDAGEM DE FRICÇÃO COM PINO ( <i>FRICCTION STIR WELDING</i> ) PARA SOLDAGEM DE ALUMÍNIO .....	179
ROGER NAVARRO VERÁSTEGUI	

## PREFÁCIO

“QUE O TEU TRABALHO SEJA PERFEITO PARA QUE, MESMO DEPOIS DA TUA MORTE, ELE PERMANEÇA”. Essa frase de Leonardo da Vinci retrata bem o conteúdo destes capítulos, e traz à mente a pergunta do porquê almejar tamanha pesquisa. A resposta vem como sopro estampado na face de cada um dos pesquisadores deste livro. A busca incessante por novas tecnologias utilizando bambus faz Fabiano et. al. desenvolverem sua habilidade de inovação tecnológica e sustentabilidade. Hipólito Domingo et. al. utilizam sinais vibroacústicos para otimizar processos FSW/FSSW. Procurando um melhor desempenho térmico em coletores solares, Pedro Leineker et. al. utilizam em seu projeto nanofluidos de óxido de grafeno. Preocupados com produtos voltados para Internet das coisas, Jefferson Gund et. al. fazem um estudo de aplicação de modelo de gestão Learn Startup. Denilson Aguiar et. al. demonstram o efeito da laminação a frio na microestrutura de aços inoxidáveis dúplex. Eduardo Olienick et. al. fazem uma caracterização dinâmica do módulo complexo de elasticidade dos materiais termorreologicamente simples. Preocupados com a otimização dos processos de manufatura, Henrique Ajus et. al. buscam fazer um estudo comparativo entre alargamento e furação com broca helicoidal em aço SAE 4140. Buscando inovação, Roger Navarro escreve em seu capítulo um projeto de uma ferramenta para processo de soldagem por fricção com pino para soldagem em alumínio. Guilherme Henrique et. al. procuram verificar a aplicabilidade do ensaio de correntes parasitas na caracterização das variações microestruturais da superliga Waspaloy submetida ao ciclo de tratamento térmico de envelhecimento. A realidade virtual aumentada é tema de Felipe Barreto abordando tópicos aplicados à engenharia. Andrel de Souza et. al. fazem uma comparação de desempenho de ciclone aplicada a um pequeno leito fluidizado circulante. E por último, Anízio Cezar et. al. fazem uma análise da porosidade em soldas de alumínio através do método de gravimetria.

Devem ser reconhecidas pelo leitor a pluralidade das pesquisas divulgadas neste livro, bem como a importância de cada capítulo não só para a UTFPR, mas também para a construção de conhecimento e, por conseguinte, para o desenvolvimento do país. Essa coletânea demonstra, assim, o quanto a pesquisa não é resultado somente de investigações individuais ou estritamente acadêmicas, mas de um conjunto de pesquisadores focados em essência num mesmo ideal: transformar a vida das pessoas com o auxílio da tecnologia. E esse é o ideal que conduz os professores pesquisadores da UTFPR.

*Os Organizadores*

# A COMPARISON OF CYCLONE PERFORMANCE MODELS APPLIED TO A SMALL CIRCULATING FLUIDIZED BED

ANDREL DE SOUZA PECETE

*Assistant Professor - Control and Processes Department - UTFPR - Ponta Grossa*

JHON JAIRO RAMIREZ BEHAINNE

*Associate Professor - Mechanical Engineering Department - UTFPR - Ponta Grossa - Brazil*

## 1 INTRODUCTION

A gas-solid circulating fluidized bed (CFB) system uses the fast fluidization regime to operate. In such hydrodynamics regime, the multiphase flow is characterized by a stratified mixture of particles and gas that moves in axial and radial direction inside a vertical column, involving high slip velocity between the phases in an environment with fluidization gas velocities greater than the terminal velocity of the particles (KUNII; LEVENSPIEL, 1991; GRACE; KNOWLTON; AVIDAN, 1997). The system is called “circulating” because a net amount of the solid phase is dragged out of the column and continuously returned to it in cycles by using components of a transport loop (Figure 1).

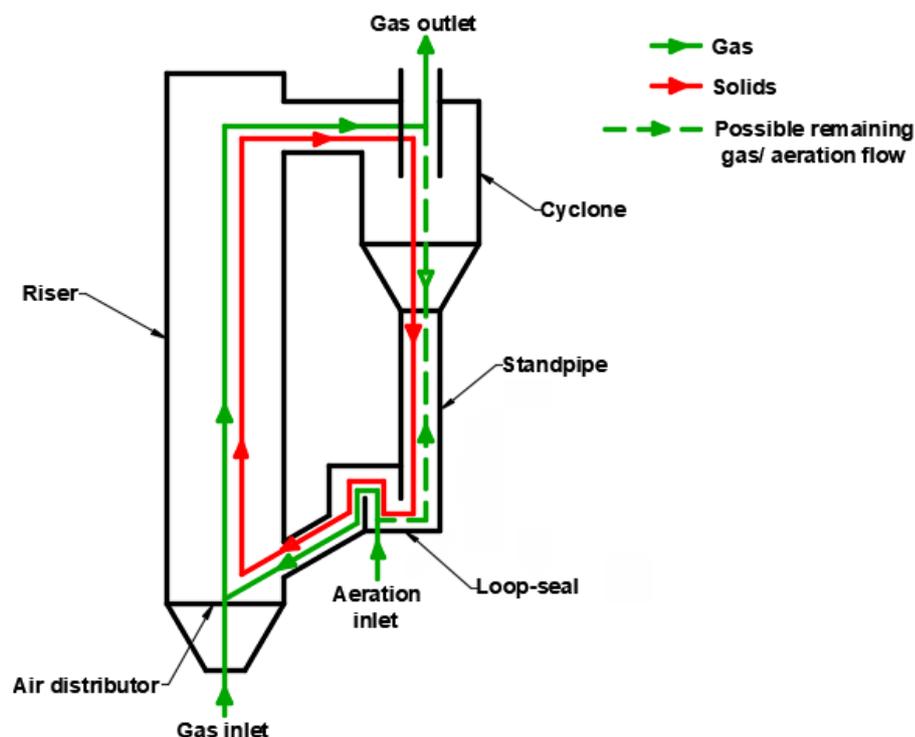


Figure 1 – Scheme of a typical circulating fluidized bed system.  
Source: Adapted from Yang (2003); Machado, Behainne and Parise (2019).

Normally, the CFB system uses an air distributor at the riser bottom, whose function is to avoid the fall of solids and split the air flow evenly. The particles leaving the top of the riser are separated from the gas stream by using a cyclone, usually of reverse-flow type. In reverse-flow cyclones coupled to CFB systems, the clean gas leaves the separator at the top, whereas the caught particles are released at the bottom and directed to a return column (standpipe) that works under gravitational force. The standpipe feeds the solids recycling device, which takes the particles back to the riser bottom by using gas injection (aeration) to overcome the local adverse pressure drop. In small-scale CFB systems, loop seal valves or L valves are often used as the particle recycling devices (BASU; CHENG, 2000; YANG, 2003).

This chapter features a comparison of several general mathematical models used to determine the overall collection efficiency and the pressure drop in cyclones, when applied to a study case involving the gas-solid separator of a small CFB system. In particular, the effects of the CFB operating parameters (gas temperature, fluidization gas velocity in the riser and particle diameter) on the cyclone performance are discussed. Additionally, results from a model exclusively used for cyclones of CFB systems are analyzed at two scales (small and commercial).

## 2 CYCLONES OF CFB SYSTEMS

Cyclones of gas-solid systems are devices that separate solid particles from a gas stream by using centrifugal force. The centrifugal force induces the solids towards the cyclone wall, where they slide to the bottom outlet and are collected.

Cyclone separators have no moving parts and are robust, requiring low investment to manufacture and operate them in most applications. They can also be used in extreme condition environments, such as those of high temperature and pressure, as well as chemically aggressive (MUSCHELKNAUTZ and GREIF (1997); HOFFMANN, 2002). However, they are not recommended to process abrasive or viscous streams, and their collection efficiency goes down when fed with streams of low solids concentration and very fine particles; in addition, for the same volume of treated gas, it usually features further pressure drop than other types of separators, such as bag filters and low-pressure gas scrubbers (HOFFMANN, 2002).

In applications involving CFB systems, the cyclone is used to separate the gas from particles that still need to remain in the loop for more time. In CFB boilers, for instance, when this work is not well done due to inappropriate design of the cyclone or adverse operating conditions, a low collection efficiency can bring excessive heat loss related to partially burnt fuel particles leaving the furnace.

Cyclones used in CFBs are normally undergone to higher concentration of solids (dust loading) in the gas stream than those coupled to bubbling fluid beds (BFBs) and others systems. Table 1 shows some characteristics and operational conditions of cyclones employed in commercial CFB boilers (BASU, 2006).

**Table 1 - Characteristics and operational conditions of cyclones coupled to CFB boilers.**  
Fonte: Basu (2006).

Heat input (MW)	Number of cyclones (-)	Cyclone diameter (m)	Inlet gas velocity (m/s)
67	2	3.0	43
109	2	3.9	41
124	1	7.2	23
211	2	6.7	27
327	2	7.0	38
394	3	5.9	43
422	4	7.1	24

Particle size at entrance	Average size (75-150 $\mu\text{m}$ ) 90% fly ash (5-500 $\mu\text{m}$ ) 5-10% fuel (5-500 $\mu\text{m}$ )
Dust loading kg solid/kg gas	1 - 10
Gas velocity at cyclone inlet	15 - 30 m/s
Pressure drop in cyclone barrel	400 - 600 Pa
Pressure drop in entry barrel	200 - 300 Pa
Diameter of cyclone barrel	0.5 - 8 m
Particle size for 50% efficiency	10 $\mu\text{m}$

In commercial CFB boilers, it is usual to install several cyclones in parallel, in order to keep the collection efficiency at the appropriate level using separators with smaller barrel diameters. Normally, these cyclones are lined internally by using refractories to withstand high temperatures (800 to 900°C).

As aforementioned, the thermal performance of a CFB boiler can be considerably affected by the separation efficiency of the cyclone. Some CFB parameters that may influence the cyclone's collection efficiency are the particle mass loading, the fluidization gas velocity and the gas temperature (DE PAULA, HENRIQUEZ and FIGUEIREDO, 2020; DE and NAG, 1999; HUGI and REH, 1995; KNOWLTON, 2017; MUSCHELKNAUTZ and MUSCHELKNAUTZ, 1999).

### 3 PERFORMANCE MODELS FOR REVERSE-FLOW CYCLONES

Depending of the application, reverse-flow cyclones can be classified into three types: high throughput, high efficiency and general purpose. Lapple (1951), Stairmand (1951), Swift (1969), Peterson and Whitby (1965), defined standard geometric proportions for these cyclones. Basu (2006) summarized the geometric proportions presented in Table 2, which are associated to the dimensions of Figure 2. The author still suggests standards proportions for a general CFB cyclone; nevertheless, for such cyclone not all geometric proportions were given, such as those related to H and E dimensions.

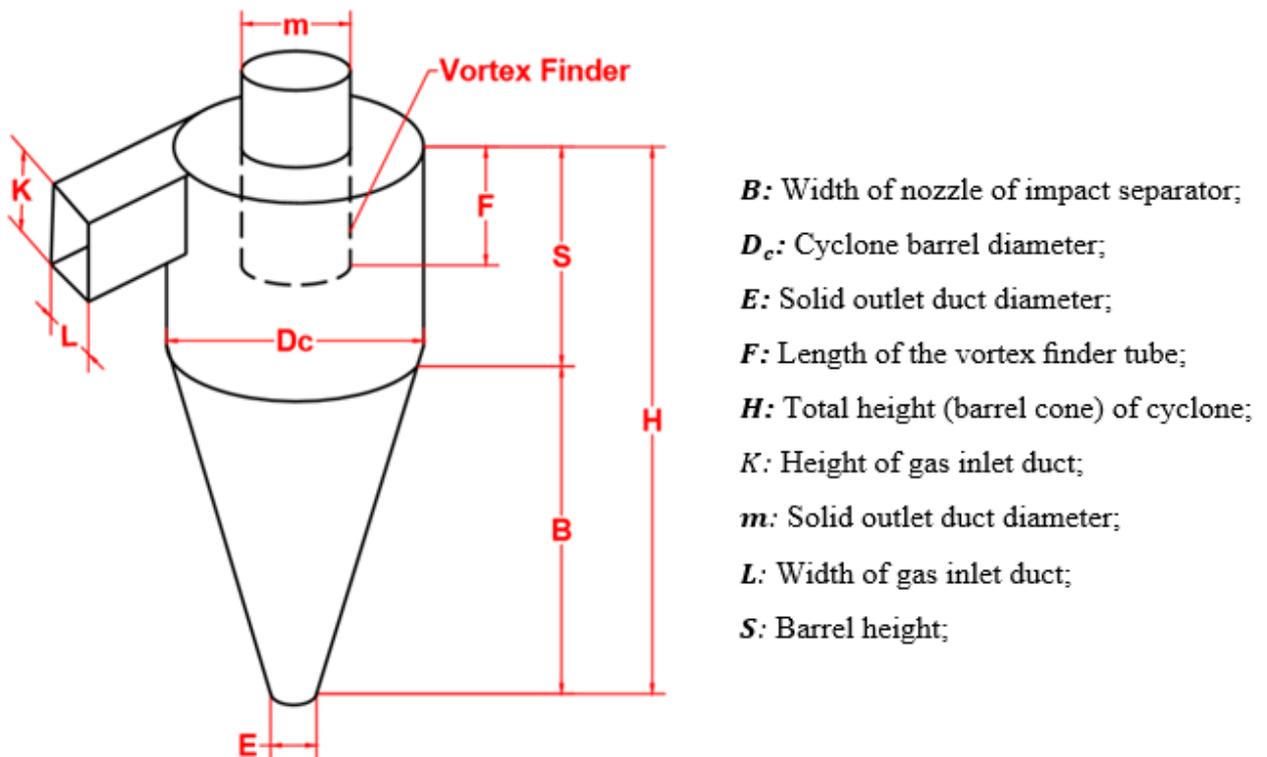


Figure 2 - Dimensions of a reverse-flow cyclone with tangential inlet.  
 Source: Adapted from Basu (2006).

**Table 2 – Geometric proportions for reverse-flow cyclones according their application.**  
**Fonte: Basu (2006)**

Application of the cyclone	Geometric proportion							Referênc
	$\frac{K}{D_c}$	$\frac{L}{D_c}$	$\frac{m}{D_c}$	$\frac{F}{D_c}$	$\frac{S}{D_c}$	$\frac{H}{D_c}$	$\frac{E}{D_c}$	
High throughput	0.75	0.375	0.75	0.875	1.5	4.0	0.375	Stairmand (1951)
	0.8	0.35	0.75	0.85	1.7	3.7	0.4	Swift (1969)
High efficiency	0.44	0.21	0.4	0.5	1.4	3.9	0.4	Swift (1969)
	0.5	0.22	0.5	0.5	1.5	4.0	0.375	Stairmand (1951)
General purpose	0.5	0.25	0.5	0.6	1.75	3.75	0.4	Swift (1969)
	0.5	0.25	0.5	0.625	2.0	4.0	0.25	Lapple (1951)
	0.584	0.208	0.5	0.584	1.333	3.167	0.5	Peterson e Whitby (1965)

From the commercial point of view, researchers and engineers are more interested in two performance's indicators used in cyclones: separation efficiency and pressure drop. Among the semi-empirical models used for calculating the efficiency separation, the oldest ones are based on the previous calculation of the cut diameter or the critical particle diameter,  $d_{50}$ , which is defined as the diameter of the particle whose individual collection efficiency is 50%. Efficiency values for all other particle sizes are calculated using the critical diameter value as a reference (SOUZA, 1994).

### 3.1 SEPARATION EFFICIENCY

Hoffman (2002) features two separation efficiencies for cyclones: the grade-efficiency and the overall separation efficiency. The grade-efficiency,  $\eta(i)$  corresponds to the separation performance for particles with size ( $i$ ). On the other hand, the overall separation ( $\eta_{overall}$ ) is expressed as:

$$\eta_{overall} = \frac{m_c}{m_{total}} = 1 - \frac{m_e}{m_{total}} = \frac{m_c}{m_c + m_e} \quad (1)$$

$m_c$  : collected mass of particles;

$m_e$  : mass of particles leaving along with the gas;

$m_{total}$  : total mass of solids at the cyclone's inlet;

The Equation (1) featured by Hoffmann (2002) is a general way to assess the overall collection efficiency of a cyclone in operation. However, during sizing a cyclone, it is also important that its overall efficiency be estimated before manufacturing it. Several mathematical models are available in the literature for this purpose, such as those described by Lapple (1950), Zenz (1975), Li and Wang (1989) and Muschelknautz and Greif (1997), which are shown in Table 3.

**Table 3 – Models for predicting the overall efficiency separation in cyclones.**

Equation	Reference	Comments
$\eta = \frac{1}{[1 + (\frac{d_p}{d_c})^{-2}]}$	Lapple (1950)	$\frac{d_p}{d_c}$ : particle diameter to critical diameter ratio, defined according Lapple (1950).
$\eta = \frac{1}{[1 + (\frac{d_p}{d_c})^{-2}]}$	Zenz (1975)	$\frac{d_p}{d_c}$ : particle diameter to critical diameter ratio, defined according Zenz (1975).
$\eta = 1 - \exp[-\lambda\theta_1]$	Li e Wang (1989)	$\lambda, \theta_1$ – parameters defined by Li and Wang (1989).
$\eta = 1 - \frac{\mu_{lim}}{\mu_e} + \frac{\mu_{lim}}{\mu_e} \exp[-(\frac{d_i^*}{d_e^*/0.7^{1/n_{Ai}}})^{n_{Ai}}]$	Muschelknautz and Greif (1997)	Suggested model for CFB systems. $\mu_{lim}, \mu_e, d_i^*, d_e^*$ and $n_{Ai}$ - parameters defined by Muschelknautz and Greif (1997).

**3.2. PRESSURE DROP**

Table 4 shows four mathematical models that are used to calculate the pressure drop through a cyclone. These models are: Shepherd and Lapple (1939), First (1949), Casal and Benet (1983) and Muschelknautz and Greif (1997). The first three models are used in conventional cyclones, while the last one, described by Muschelknautz and Greif (1997), is applied to cyclones coupled to CFB systems.

**Table 4 - Models for predicting the pressure drop through cyclones.**

Equation	Reference	Comments
$\Delta P = \frac{\rho_g v_i^2}{2} C [\frac{KL}{m}]$	Shepherd and Lapple (1939)	C = 16 – for cyclones with tangential inlet
$\Delta P = \frac{\rho_g v_i^2}{2} \frac{24KL}{m^2} [\frac{D_c}{S(H-S)}]^{1/3}$	First (1949)	-

$\Delta P = \frac{\rho_g v_i^2}{2} \left[ 11,3 \left( \frac{KL}{m^2} \right) + 3,33 \right]$	Casal and Benet (1983)	-
$\Delta P = \Delta P_e + \Delta P_i$ $\Delta P_e = \lambda_s \frac{A_R}{0,9Q_g} \frac{\rho_g}{2} (u_a u_i)^{(3/2)}$ $\Delta P_i = \frac{\rho_g v_i^2}{2} \left[ 2 + 3 \left( \frac{u_i}{v_i} \right)^{(4/3)} + \left( \frac{u_i}{v_i} \right)^2 \right]$	Muschelknautz and Greif (1997)	All parameters of the equations are defined by Muschelknautz and Greif (1997)

#### 4 APPLICATION OF THE CYCLONE PERFORMANCE MODELS TO THE STUDY CASE

Previous works assessing the collection efficiency and the pressure drop in cyclones coupled to small CFB systems are scarce. This section of the chapter features a study case involving the comparison of the performance models resumed in Tables 3 and 4 for a reverse flow cyclone installed in a lab scale CFB unit (Figure 3).



**Figure 3 – Overall view of the small CFB at the Laboratory of Thermochemical Processes - UTFPR/Ponta Grossa Campus. Source: Oliveira (2019).**

The cyclone here studied has a barrel diameter of 145 mm (Figure 4), and it was sized according to the high efficiency Swift model (1969).

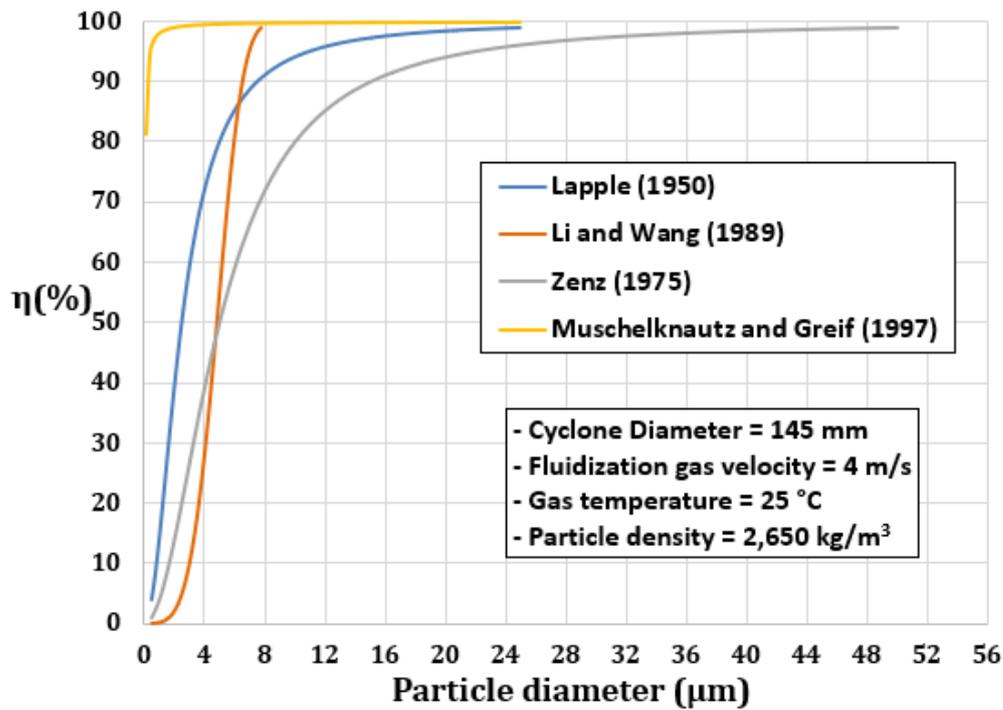


**Figure 4 – View of the cyclone coupled to the small CFB.**  
Source: Oliveira (2019).

To calculate the overall collection efficiency and the pressure drop of the cyclone, quartz sand with particle density of  $2,650 \text{ kg/m}^3$  was considered as the bed material. The equations of each mathematical model were solved using the Engineering Equation Solver (EES™) software.

Seven graphs were generated to show the relationships of the overall efficiency and the pressure drop with some operational parameters of the CFB system: particle diameter, gas temperature, fluidization velocity in the riser column and the solids circulation rate. The fluidization gas velocity was kept constant at  $4 \text{ m/s}$  in Figure 5, 7, 9, 10 and 11. On the other hand, the gas temperature was kept constant at  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  in Figures 5, 6, 8, 10 and 11. Finally, the particle diameter was fixed at  $5 \text{ }\mu\text{m}$  in Figures 6, 7, 8 and 9.

Figure 5 shows the relationship between the particle diameter and the overall collection efficiency of the cyclone for four mathematical models available in the literature. According to the Li and Wang (1989) model, it is realized that small changes in the particle diameter ( $2$  to  $8 \text{ }\mu\text{m}$ ) generate a high variation in the overall collection efficiency. The Lapple (1950) and Zenz (1989) models, on the other hand, cover a wider particle diameter range for the same separation efficiency variation obtained from the Li and Wang (1989) model. In contrast, the model described by Muschelknautz and Grief (1997) features an abrupt increase of the separation efficiency, reaching a value close to  $100\%$  even for finer particles.



**Figure 5 – Overall collection efficiency versus particle diameter.**  
Source: Authors (2020).

It is worth to point out that in such latter model, a dust loading of 5 kg/kg was got by considering a solids circulating rate of 20 kg/m<sup>2</sup>.s and a fluidization gas velocity of 4 m/s in the riser (9.6 m/s at the cyclone entry). Even though there is not data available from previous works to compare, this could have caused the discrepancy, taking into account that the rest of the models here studied are applied to conventional cyclones, which do not consider the concentration of solids in the treated gas.

The relationship between the fluidization gas velocity and the overall efficiency is shown in Figure 6. It is noted that the fluidization gas velocity inside the riser is directly proportional to the overall efficiency, with exception of the model described by Muschelknautz and Greif (1997), wherein the changes promoted on the fluidization gas velocity did not cause significant variation in the overall collection efficiency, whose value remained very close to 100%. It can be verified that the changes induced in the fluidization gas velocity caused a similar variation in the overall efficiency for the models of Lapple (1950) and Zenz (1975). Results also showed the Li and Wang (1950) model was the more sensitive to the fluidization gas velocity.

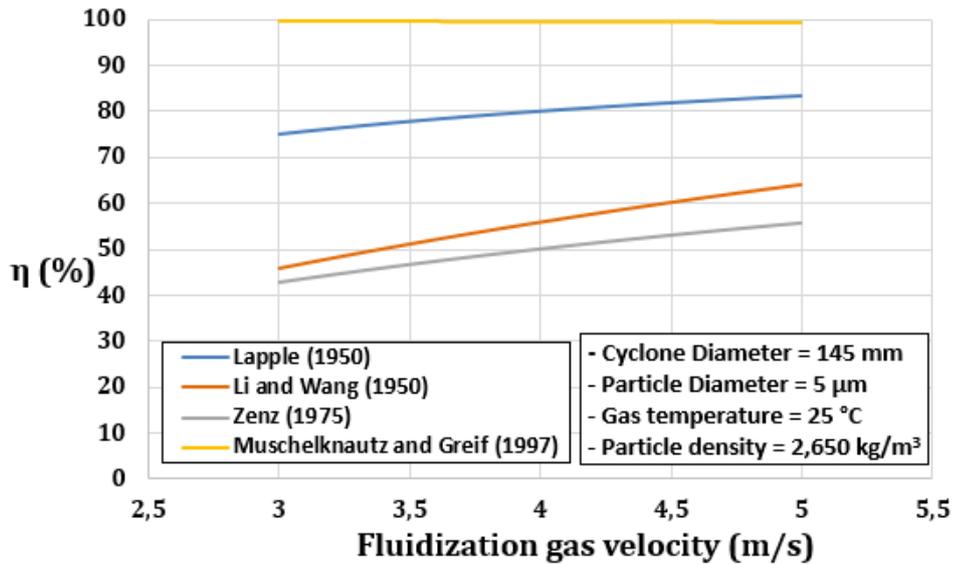


Figure 6 – Overall collection efficiency versus fluidization gas velocity. Source: Authors (2020).

Figure 7 shows the relationship between the gas temperature and the overall collection efficiency. Unlike the fluidization velocity, the gas temperature is inversely proportional to the overall separation efficiency for three models. Again, for the Muschelknautz and Greif (1997) model, the gas temperature had no significant influence on the overall separation efficiency. For the Lapple (1950) and Zenz (1975) models, the sensitivity of the overall collection efficiency in regard the gas temperature was very similar. The Li and Wang (1950) model, on the other hand, still showed higher sensitivity to the temperature.

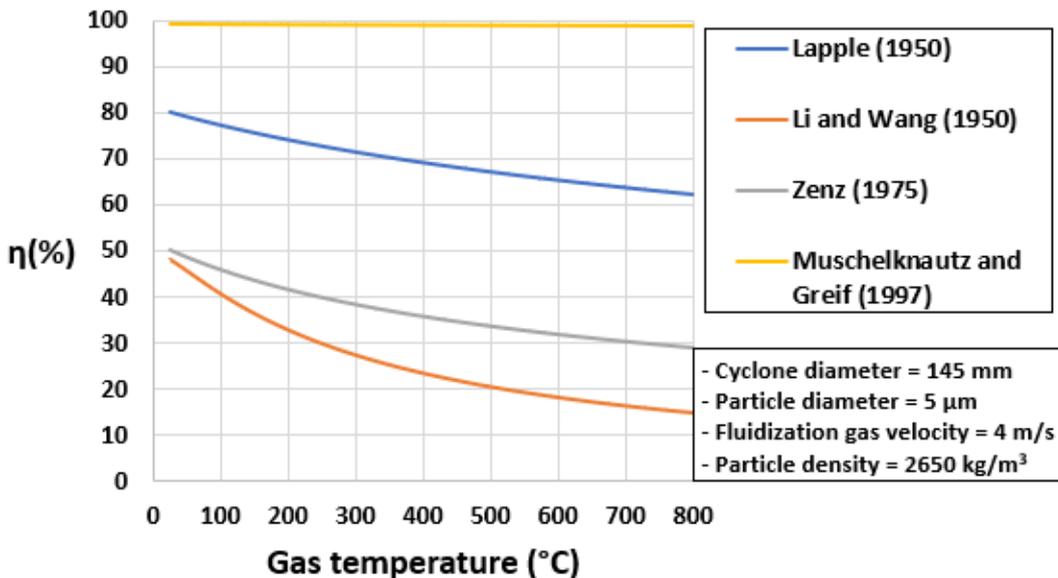


Figure 7 – Overall collection efficiency versus gas temperature. Source: Authors (2020).

Figure 8 depicts the relationship between the fluidization velocity and the pressure drop in the cyclone according the mathematical models here analyzed. It was noted that the fluidization gas velocity is directly proportional to the pressure drop for all models, as expected. The relationship between the pressure drop and the fluidization gas velocity was very similar for the Casal and Benet (1983) and Shepherd and Lapple (1939) models. For the First (1949) model, the fluidization gas

velocity had the highest effect on the pressure drop of all models studied. The Muschelknautz and Greif (1997) model showed low effect of the fluidization gas velocity on the pressure drop variation. This model also indicated lower values of pressure drop than those obtained from the other three models.

Figure 9 shows the relationship between the gas temperature and the pressure drop in the cyclone. It was realized that the gas temperature is inversely proportional to the pressure drop. Again, the Casal and Benet (1983) and the Shepherd and Lapple (1939) models showed very similar curves and close to each other. First's (1949) model showed a high sensitivity of the pressure drop to changes in the gas temperature. As it was also noticed for the fluidization gas velocity, the model presented by Muschelknautz and Greif (1997) suggested that the effect of gas temperature on the pressure drop is small.

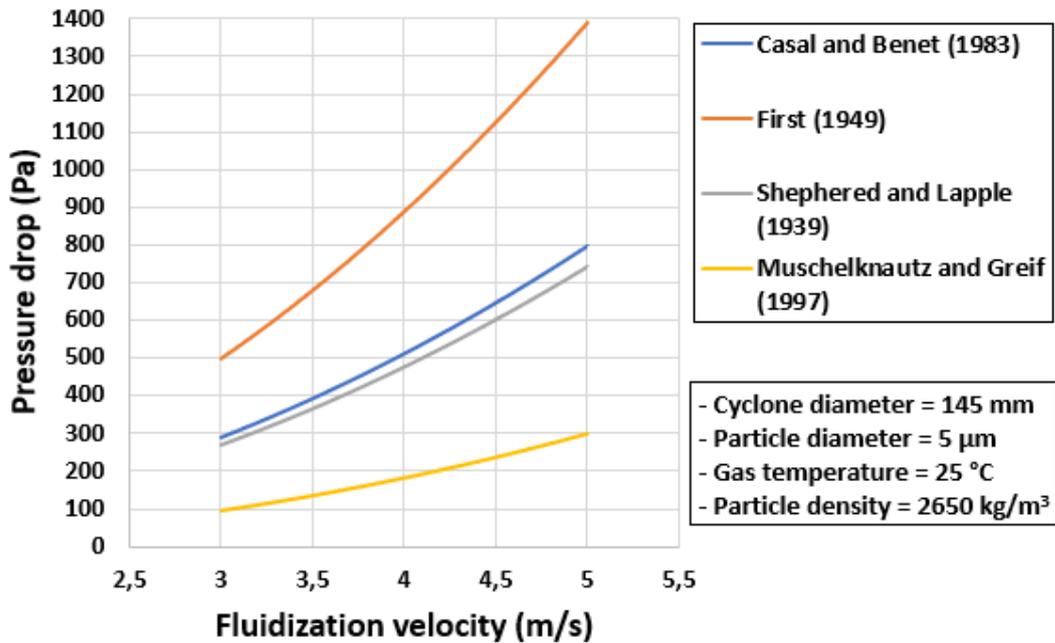
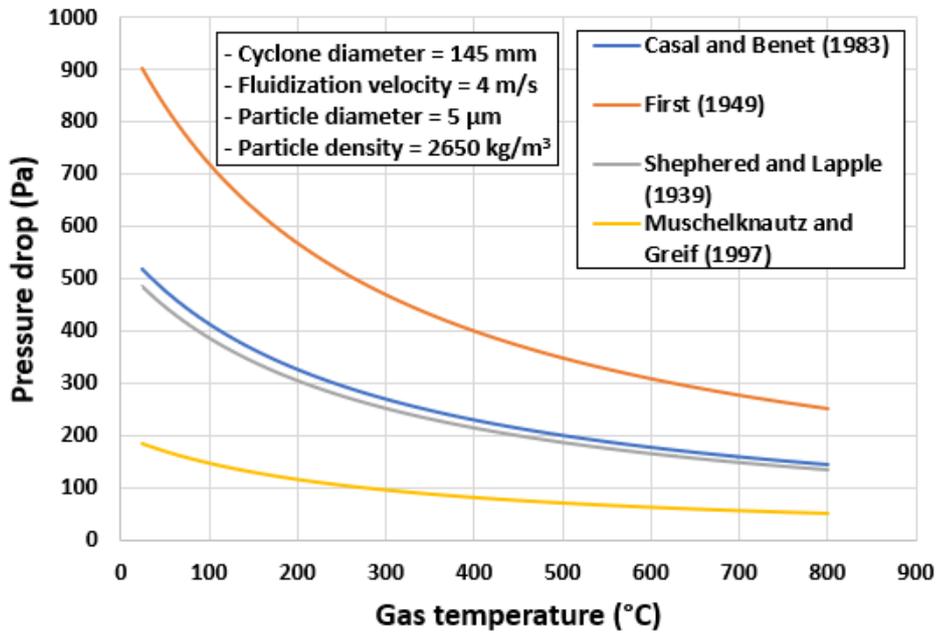
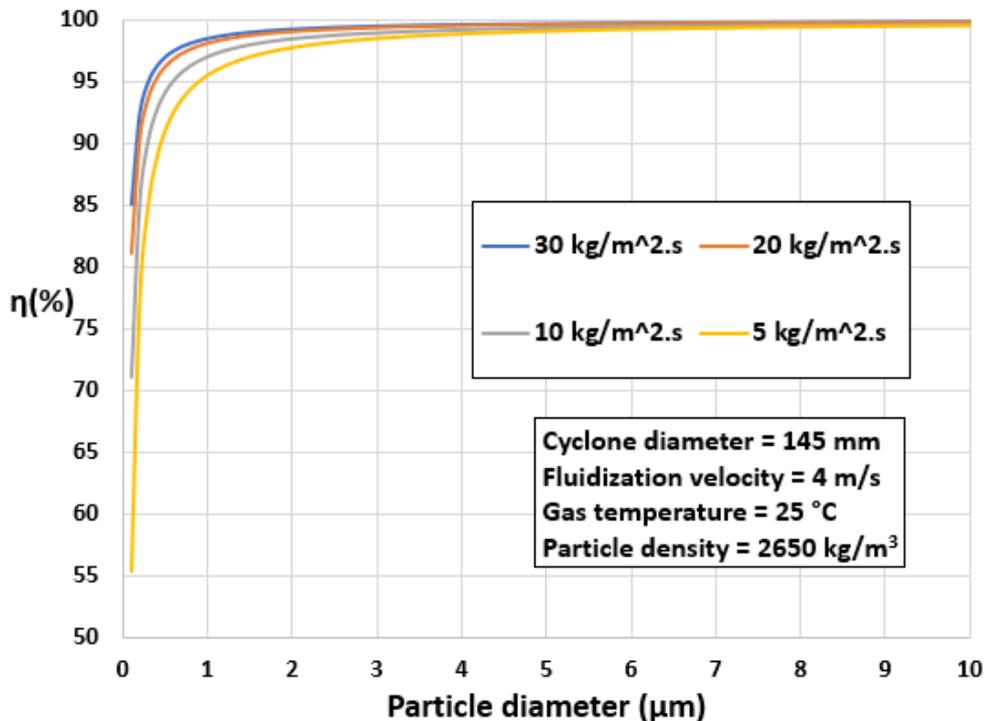


Figure 8 – Pressure drop versus fluidization gas velocity.  
Source: Authors (2020).



**Figure 9 - Pressure drop versus gas temperature.**  
 Source: Authors (2020).

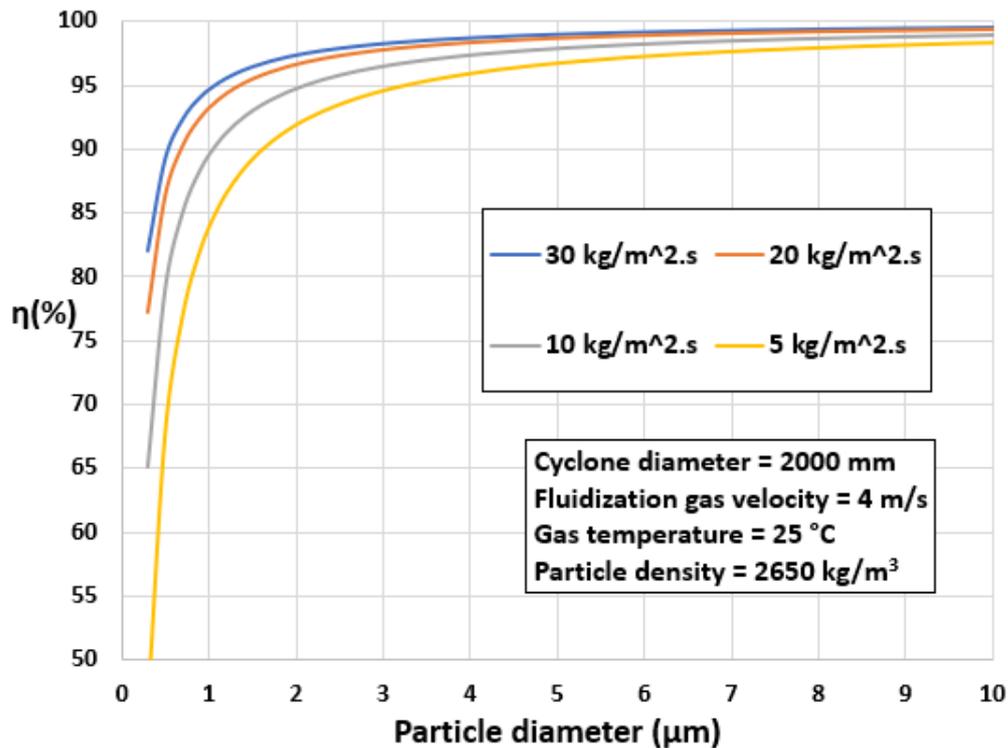
Figure 10 depicts the relationship between the particle diameter and the overall efficiency for four different solids recirculation rate values applied on the Muschelknautz and Greif (1997) model. It is noticed the significant influence that the solids circulation rate has on the overall separation efficiency. The lower the solids recirculation rate in the CFB system, the lower the collection efficiency for a fixed particle diameter.



**Figure 10 - Relationship between overall collection efficiency and particle diameter in terms of the solids circulation rate for the Muschelknautz and Greif (1997) model.**  
 Source: Authors (2020).

Some previous studies show that very small particles can clump together due to the attraction forces among them, thus bringing an increase in the collection efficiency (HUGI and REH, 1995; KNOWLTON, 2017). It is worth mentioning that none of the models studied here takes this phenomenon into account.

In order to verify the effect of the cyclone barrel diameter on the collection efficiency in the Muschelknautz and Greif (1997) model, additional simulations were performed for a cyclone with barrel diameter of 2 m coupled to a commercial scale CFB system. The simulation results are shown in Figure 11.



**Figure 11 - Relationship between overall collection efficiency and particle diameter in terms of the solids circulation rate for the Muschelknautz and Greif (1997) model applied to a commercial scale cyclone. Source: Authors (2020).**

By comparing Figures 10 and 11, it can be seen that the increase of the cyclone barrel diameter up to a value of commercial scale shifts the overall separation efficiency curves to the right. This confirms the expected behavior of cyclones in terms of their trend in increasing the collection efficiency when the barrel diameter of the separator is reduced.

## 5 CONCLUDING REMARKS

This study case showed that significant differences in the pressure drop and collection efficiency of cyclones coupled to small CFBs can be obtained from mathematical models available in the literature, in particular, when they are assessed in terms of the particle size, fluidization gas velocity and temperature of the gas. It was noticed that most of the models are applied to conventional cyclones for general use and do not consider the dust loading in the gas to be treated, which is a fundamental aspect in situations involving applications of cyclones coupled to CFB systems.

As far as it was possible to know, there is only one mathematical model available in the literature to calculate the overall collection efficiency and the pressure drop in cyclones installed in CFB systems. Even though, this model does not take into account the effect of the particle agglomeration caused by the attraction forces among particles.

When applying the most complete model to compare the performance of cyclones in two geometric scales (laboratory and commercial), it was verified that the increase in the barrel diameter of the separator leads to a reduction in the collection efficiency.

Finally, it is worth to point out that experimental data from small scale cyclones connected to CFB systems are still needed in order to verify deviations related to the performance parameters here studied through simulations.

## REFERENCES

- BASU, Prabir; CHENG, Leming. An analysis of loop seal operations in a circulating fluidized bed. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 78, n. 7, p. 991-998, 2000.
- BARTH, W. Design and layout of the cyclone separator on the basis of new investigations. **Brenn. Warme Kraft**, v. 8, n. 1, p. 9, 1956.
- BASU, Prabir. **Combustion and gasification in fluidized beds**. CRC press, 2006.
- CASAL, J. BENET, M. A better way to calculate cyclone pressure drop. 1983.
- DE PAULA, Ana CO; HENRÍQUEZ, Jorge R.; FIGUEIREDO, Flávio AB. Dimensioning a Cyclone Separator for Circulating Fluidized Bed Gasifier: Validation of a Procedure. **Heat Transfer Engineering**, v. 41, n. 15-16, p. 1305-1314, 2020.
- DE, S.; NAG, P. K. Pressure drop and collection efficiency of cyclone and impact separators in a CFB. **International journal of energy research**, v. 23, n. 1, p. 51-60, 1999.
- FIRST, M. W. Cyclone dust collector design. In: **Am. Soc. Mech. Eng.** 1949. p. 127-132.
- GRACE, John R.; KNOWLTON, Ted M.; AVIDAN, A. A. (Ed.). **Circulating fluidized beds**. Blackie Academic & Professional, 1997.
- HOFFMAN, Alex C. et al. **Gas cyclones and swirl tubes**. 2002.
- HUGL, Erich; REH, Lothar. Design of cyclones with high solids entrance loads. **Chemical Engineering & Technology: Industrial Chemistry-Plant Equipment-Process Engineering-Biotechnology**, v. 21, n. 9, p. 716-719, 1998.
- IOZIA, Donna Lee; LEITH, David. The logistic function and cyclone fractional efficiency. **Aerosol Science and Technology**, v. 12, n. 3, p. 598-606, 1990.
- KNOWLTON, T. M.; KARRI, S. B. R. Cyclone systems in circulating fluidized beds. In: **12th International conference on fluidized bed technology**. 2017. p. 47-64.
- KUNII, D.; LEVENSPIEL, O. **Fluidization Engineering, Chapter 3**. 1991.
- LAPPLE, C. E. Gravity and centrifugal separation. **American Industrial Hygiene Association Quarterly**, v. 11, n. 1, p. 40-48, 1950.
- LAPPLE, C. E., Process Use Many Collectors, **Chem. Eng.**, 58, 144, 1951.
- LI, E.; WANG, Y. A new collection theory of cyclone separators. **AIChE Journal**, v. 35, n. 4, p. 666-669, 1989.
- MACHADO, V. O. O. BEHAINNE, J. J. R. PARISE, M. R. Caracterização operacional e simulação computacional do escoamento gás-sólido em leito fluidizado circulante: Experiências em escala de laboratório. In: MARTINS, F. JAVAREZ, L. J. VILLANOVA, R. L. **A Engenharia Mecânica na UTFPR**. Ponta Grossa: Texto e Contexto, 2019. p.244 – 277.
- MUSCHELKNAUTZ, Edgar; GREIF, Volker. Cyclones and other gas—solids separators. In: **Circulating Fluidized Beds**. Springer, Dordrecht, 1997. p. 181-213.
- MUSCHELKNAUTZ, Ulrich; MUSCHELKNAUTZ, Edgar. Separation efficiency of recirculating cyclones in circulating fluidized bed combustions. **VGB PowerTech**, v. 4, p. 99, 1999.
- OLIVEIRA, Fernanda de. Estudo da influência do modo de aeração de uma válvula loop-seal na operação de um leito fluidizado circulante. 2019. 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2019.

PETERSON C. M. and Whitby K. T. (1965) Fractional efficiency characteristics of unit type collectors. *ASHRAE J.* 7(5), 42-49.

SOUZA, Daniel Rolla de Camargo et al. Desenvolvimento de um software aplicativo em linguagem C para cálculo de eficiência e perda de carga em ciclones. 1994.

SHEPHERD, C. B.; LAPPLE, C. E. Flow pattern and pressure drop in cyclone dust collectors. **Industrial & Engineering Chemistry**, v. 31, n. 8, p. 972-984, 1939.

STAIRMAND, C. J., The design and performance of cyclone separators, *Trans. Instn. Chem. Engrs.*, 29, 356–383, 1951.

SWIFT, P., Dust Control in Industry, 2, *Steam Heat Engineer*, 38, 453–456, 1969.

YANG, Wen-ching (Ed.). **Handbook of fluidization and fluid-particle systems**. CRC press, 2003.

YAO, Xuan et al. Gas– solid flow behavior in the standpipe of a circulating fluidized bed with a loop seal. **Energy & fuels**, v. 25, n. 1, p. 246-250, 2011.

ZENZ, F. Cyclone separators, Chapter 11 in *Manual on Disposal of Refinery Wastes; Volume on Atmospheric Emissions*. **API Publications**, 1975.

## SOBRE OS AUTORES

### **ANDREL DE SOUZA PECETE**

Graduated in Mechanical Engineering (2014) from the Federal University of Technology - Paraná (UTFPR)/ Ponta Grossa Campus. Specialist in Renewable Energies (2018) from UNINTER - Telêmaco Borba Pole. Professor of Basic, Technical and Technological Education (BTTE) at the Federal Institute of Paraná (IFPR), Telêmaco Borba Campus, and Master's Student of the Postgraduate Program in Mechanical Engineering / UTFPR - Ponta Grossa - PR - Brazil. He has experience in Mechanical Engineering with emphasis in Commercial and Residential Air Conditioning, development and execution of Air Conditioning Systems projects, and development and execution of LPG fuel gas plant and distribution projects.

### **JHON JAIRO RAMÍREZ BEHAINNE**

Graduated in Mechanical Engineering from the Pontifical Bolivarian University (UPB)/ Colombia. Master and Ph.D. in Mechanical Engineering from the University of Campinas - UNICAMP/Brazil. He was a visiting scholar at the University of British Columbia/Canada, participating in research projects related to the circulating fluidized bed technology. Currently, he is an Associated Professor at the Mechanical Engineering Department of the Federal University of Technology - Paraná (UTFPR) / Ponta Grossa Campus. His researches are focused on the hydrodynamics of the gas-solid flow, as well as on the development and assessment of fluidized bed reactors for combustion and gasification of fossil and renewable fuels. He is a member of the Brazilian Section of the Combustion Institute (RNC).

# **POROSITY ANALYSIS IN ALUMINUM WELDS BY GRAVIMETRY METHOD**

ANIZIO CESAR SILVEIRA DE SOUZA

*Professor, Industry Area/CEFETCAMPOS, Master Mechanical Engineering*

LAÉRCIO JAVAREZ JUNIOR

*Dr. Engineering, DAMEC/UTFPR*

RODRIGO LUPINACCI VILLANOVA

*Dr. Engineering, DAMEC/UTFPR*

FÁBIO MARTINS

*Dr. Engineering, DAMEC/UTFPR*

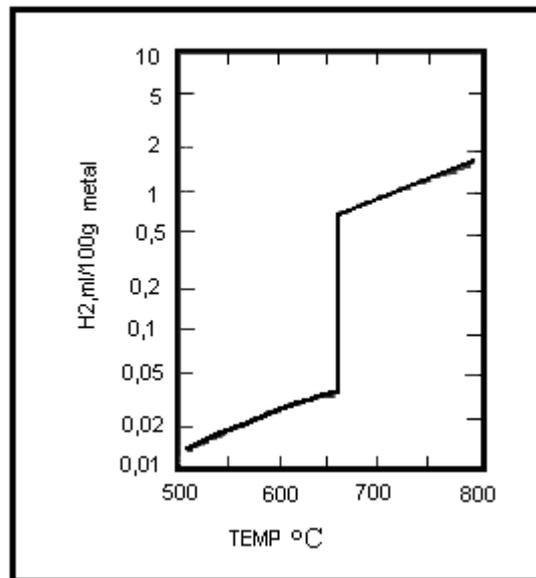
## **1 INTRODUCTION**

With the growing interest in aluminum and its alloys, by various industrial sectors in Brazil and in the world, there has been a need to evaluate the available resources in terms of materials, equipment, processes, and procedures, with the objective of obtaining greater reliability in the application of aluminum, without compromising productivity and cost. Essential factors have made aluminum applicable as structural material, such as low specific weight, high corrosion resistance, good machinability, high thermal and electrical conductivity, and conformability due to its high ductility, as well as the addition of alloy elements to aluminum, which provides a considerable improvement in its mechanical properties (BLEWETT, 1991). Although the evolution of aluminum applications as a structural material has been considerable in view of the findings of various alloys and studies involving weldability and applicability, some metallurgical and operational problems still persist (AWS, 2001). One of them is the occurrence of porosity. Therefore, this study aims to verify the influence of three welding variables on the occurrence of aluminum porosity, which are: welding speed, intensity of welding electric current, and alternating current frequency.

## **2 LITERATURE REVIEW**

### **2.1 POROSITY IN ALUMINUM WELDING**

Hydrogen is solely responsible for the generation of porosity in aluminum welds, since it is the only gas that has a significant solubility in aluminum alloys, considering its atomic diameter (DEVLETIAN ET AL, 1987). At temperatures below the melting temperature of aluminum, hydrogen solubility raises in small proportions in relation to the higher temperature increase, due to aluminum still being in solid. When aluminum changes phase, that is, it passes to the liquid state, the absorption of hydrogen becomes more intense in view of the growth of the interatomic spaces. From the moment the metal is completely liquid the absorption of hydrogen happens again in smaller proportions until it reaches a limit of hydrogen solubility within aluminum, as illustrated in Figure 1 (DEVLETIAN ET AL, 1987).



**Figure 1 - Solubility of aluminum in hydrogen (Devletian et al, 1987).**

The gas can enter the fusion pool from basically three main sources: the initial hydrogen content of the base metal, the addition metal, and the protective gas. The sources of hydrogen contamination, which cause porosity, may be summarized as follows:

- Through the addition metal;
- Due to the surface conditions of the plate. OVCHINNIKOV ET AL (1980, apud DEVLETIAN ET AL, 1987) comment that the surface layer of aluminum, composed of aluminum oxide ( $Al_2O_3$ ), retains moisture and contaminants that contribute to the formation of porosity. Oxides, hydrocarbons and moisture adsorbed on the surfaces of the base metal or addition metal provide the dissociation of hydrogen when decomposed by the action of the electric arc;
- Low efficiency of the gas protection;
- Poorly selected welding parameters that can establish insufficient or turbulent gas protection for the melting pool, which allows hydrogen to be absorbed from the atmosphere.

Possible contaminants present in the base metal can be classified as:

1. Compounds formed by the reaction between the atmosphere and the surface of the metal and corrosive products;
2. Substances physically or chemically adsorbed by the oxide layer, such as water, oil, greases, solvents, etc.

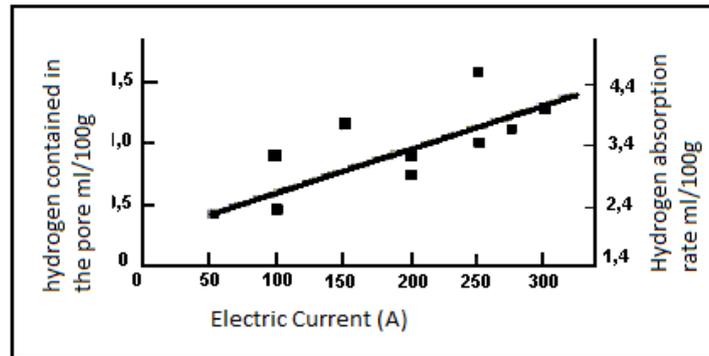
## **2.2 INFLUENCE OF WELDING PARAMETERS ON POROSITY FORMATION**

Various welding parameters influence porosity formation, such as welding position, arc electric current, melting pool size, and welding speed. Each of these parameters influences differently the morphology of the cord, cooling rate, convection of molten metal, solidification mode, and, consequently, in the occurrence of porosity.

### **A - ELECTRIC ARC CURRENT**

The electric current directly influences the degree of porosity in the welding of aluminum alloys, as both the surface of the melting pool and the hydrogen absorption rate from external sources raise due to the increase in temperature in the melting pool. WOODS (1974) proposed that the rise in electric current increments the average value of the surface temperature of the molten metal pool,

allowing greater absorption of hydrogen in the weld. As a result, hydrogen porosity multiplies with increased current in GTAW welding, as shown in Figure 2.



**Figure 2 - Effect of GTAW welding current on weld porosity and hydrogen absorption rate in aluminum 1100. WOODS (1974)**

## B - WELDING SPEED

Welding speed, according to TERENCEV et al. (1955, apud DEVLETIAN,1987) substantially influences the volume of porosity in the GTAW welding process. The welding speed,  $v$ , is related to the total heat input by the equation:

$$CI = (q \cdot \mu) / v \quad [ J/mm ] \quad \text{Eq 1}$$

Where  $q$  is the welding energy, in watts, and  $\mu$  is the thermal efficiency of the electric arc. Escalating the welding speed without the variation of  $q$  and  $\mu$ , tends to raise the porosity level to the point in which the cooling rate becomes sufficient not to allow hydrogen absorption. Thus, it is observed that the tendency is to clearly reduce porosity due to the decrease in heat input as a function of speed.

These statements are in agreement with Saperstein, et. al. (1964, apud Devletian et al,1987), in which a high welding speed and low IC values correspond to a very fast cooling rate, without the time of hydrogen absorption from the atmosphere, minimizing and even suppressing the formation of porosity. Similarly, low welding speeds and high IC values diminish the porosity in the weld metal by providing sufficiently low cooling rates for hydrogen bubbles to escape from the weld metal. Even when the IC value is kept constant the porosity volume in the weld metal will always decrease with high welding speeds. This is clearly indicated for all TIG process conditions, with higher welding speeds suppressing pore formation and growth in aluminum welding.

## 2.3 METHODS OF DETERMINING POROSITY IN WELDS

Regarding to porosity, several methods can be used to determine the quality of a weld: X-rays; gravimetry; fractometry; metallography. The method used in this study was gravimetry, although the metallographic method was used to increase the degree of reliability of the conclusions of this study. The gravimetric method has been little used but presents lower risks to the operator than X-rays, a technique most used by the industry.

Gravimetry is a destructive method in which the degree of porosity is estimated by measuring the density of the weld bead. According to BRUMHEAD ET AL. (1993), weighing is one of the simplest forms of porosity characterization. The dependent variable associated with the weld bead porosity is the percentage of its volume, determined by density variation (SAPERSTEIN, 1964, apud DEVLETIAN, 1987; SILVA and SCOTTI, 2006). Gravimetry assay consists of the following steps:

- 1- A representative sample of weld bead (molten zone) is separated from the welded specimen by careful removal of the base metal;
- 2- The sample, composed only of the molten zone of the weld bead is weighed, first in the air [ $P_{air}$ ] and then in distilled water [ $P_{ag}$ ].
- 3- Buoyancy [EE] is calculated, which is responsible for the difference between the weights of the sample in air [ $P_{air}$ ] and in water [ $P_{ag}$ ], given by:

$$E = P_{air} - P_{ag} \quad \text{Eq.2}$$

- 4- With the value of E, the volume of liquid displaced by the sample [ $V_{V_{ld}}$ ] is calculated, which is equivalent to the sample volume itself [ $V_{am}$ ], given by:

$$V_{ld} = V_{am} = \frac{E}{\rho_{H_2O}}; \quad \text{Eq. 3}$$

where a  $\rho_{H_2O}$  is the density of water, equal to 1 kg/dm<sup>3</sup>,

- 5- With the sample volume [ $V_{am}$ ] and the weight of the sample in air [ $P_{air}$ ], the actual density of the sample [ $\rho_{am}$ ], in [kg/m<sup>3</sup>]:

$$\rho_{am} = \frac{P_{ar}}{V_{am}}; \quad \text{Eq.4}$$

- 6- To determine the volume of voids in the sample, a reference density value is adopted, equivalent to the specific density of a sample considered perfect [ $\rho_{amperf}$ ] or without pores. The specimens to be weighed are obtained by machining the welded parts. In case the weld is autogenous, the base metal is determined through a cross-section to the bead and a subsequent polishing and chemical attack to determine the material of the weld bead visually by the modification suffered by the thermally affected zone.
- 7- Finally, with the values of the reference densities [ $\rho_{amperf}$ ] and actual [ $\rho_{am}$ ] of the sample, the percentage of volume of voids (Vv) is determined, given by:

$$Vv = \frac{\rho_{amperf} - \rho_{am}}{\rho_{amperf}} X 100 \quad \text{Eq.5}$$

By the gravimetric method, mentioned above, the volume of voids is estimated by measuring the density of the sample, not determining the location, distribution and size of these voids. Thus, the higher the volume of voids estimated from the density of the sample, obtained by the gravimetric method, the greater the probability of the weld bead presenting porosity. Devletian (1987) mentions that the accuracy of this method, measured in the laboratory, is approximately 97%, estimating a high degree of reliability.

### 3 EXPERIMENTAL PROCEDURE

#### 3.1 BASE METAL

The base metal selected for the tests was aluminum alloy 5052, widely used in various applications, from the simplest to the most complexes, like the aerospace and marine industry, as structural material (DICKERSON and IRVING, 1992). Table 1 shows the nominal chemical composition of the alloy.

**Table 1 - Nominal chemical composition of the alloy Al 5052.**

Alloy	Chemical Element (% by weight)								
	Cu	Mg	Mn	Si	Zn	Cr	Ti	Fe	Al
ASTM Al 5052	0,01	2,5	0,07	0,04	0,01	0,22	0,02	0,35	Rem

This chemical composition was proven by mass spectrometry assay, as shown in table 2.

**Table 2 - Nominal chemical composition of the Al 5052 alloy determined by the mass spectrometry assay**

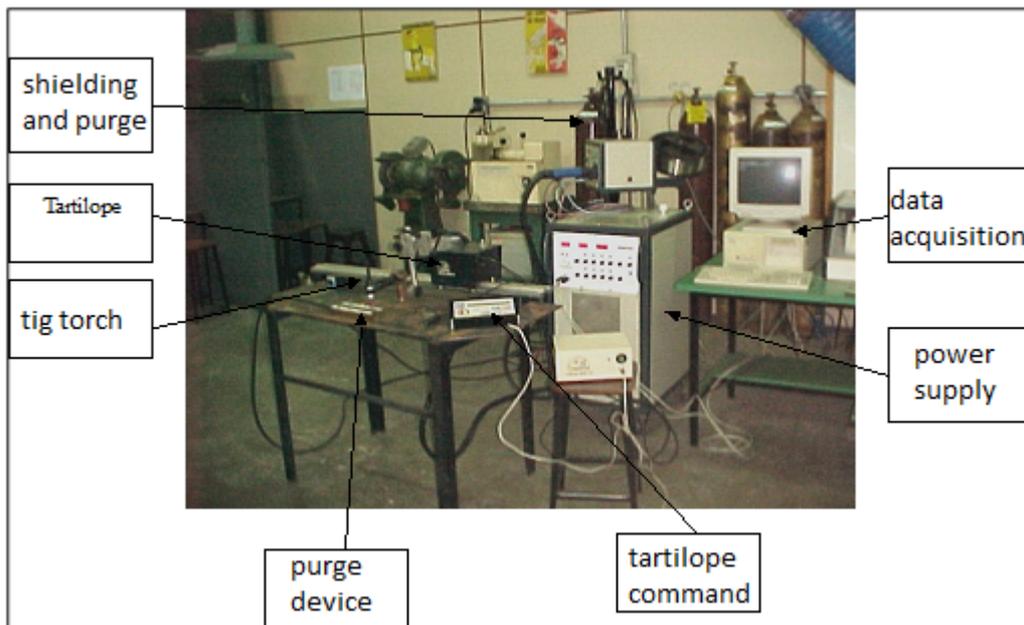
Element	Cu	Mg	Mn	Si	Zn	Cr	Fe	Al
%by weight	0,0184	2,402	0,1016	0,0927	0,0055	0,2171	0,2514	Rem

Comparing the two tables, it is possible to observe that the differences are diminutive and were not taken into account. The material was received in the form of plates, acquired through a donation from the company Alcan, in commercial dimensions. After the simple cutting, it was necessary to machine the edges of the milling plates in order to the contact between them was the best possible since, due to the use of the autogenous GTAW process, there would be no root opening, and so any contamination could be avoided in possible grooves from manual cutting.

### 3.2 EQUIPMENTS

#### A) WELDING EQUIPMENT (POWER SOURCE)

The welding source used in this work, Inversal 450, shown in Figure 4, is an inverter source with welding capacity by the GTAW, GMAW and SMAW processes, with direct or alternating current, in pulsed or non-pulsed forms, with current capacity from 450 A to 100% service factor. It also has an electromechanical system of automatic advancement of the GTAW welding torch, which ensured the constant maintenance of the welding speed, allowing the torch to move in a straight way, the constant speed.



**Figure 4 - Welding equipment with data acquisition system. Source: Authors.**

## B) PURGE DEVICE

To meet the needs of the tests regarding to the protection of the weld root, a device was designed and made for gas purging, in bronze, with dimensions appropriate to the specimens used in this study, with sufficient gas flow to allow the inlet and exit of gases, thus protecting the root of the weld, as shown in Figure 5.

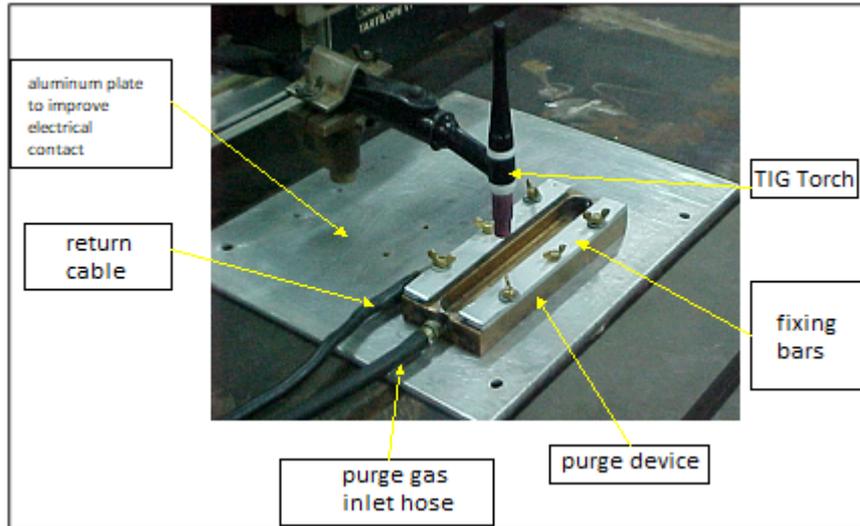


Figure 5 - Purge device. Source: Authors.

## C) PRECISION ELECTRONIC SCALE

A precision electronic scale from Marte brand was used, model AL 200, with microprocessor, subtractive tare, digital liquid crystal display, reading stability indicator, and capacity indicator already employed. It has automatic calibration and the main characteristic is the accuracy in reading the weighing values of the parts, which is considered satisfactory, giving the experiment a milesimal precision in the weighing result.

### 3.3 - EXPERIMENTAL PLANNING

To obtain the largest number of information from the experiments with reliability, the statistical tool known as complete factorial design with 3 variables at 3 levels was chosen, with tests in 3 replicates. The intensity levels of the variables were selected and named (-) Low; (0) Medium and (+) High (GEORGE ET AL, 1978).

The variables chosen for this research were: welding speed, intensity of electric current (alternating), and frequency of alternating current. Factorial  $3^3$  made it possible to experiment with all possible combinations between the variables. With the performance of 3 replicates for each test condition, a total of 81 tests were performed.

A porosity-free specimen was prepared from the base metal as a density standard for comparison of specimens obtained in the tests.

In the analysis of the results, in addition to the calculations of average and standard deviation, some useful tools were applied. One of them is the Chauvenet criterion, by which one can discard results that deviate too far from the trend shown by the others. Usually, “points outside the curve” denote the occurrence of involuntary and/or uncontrollable errors that occurred in the performance of the tests. Equation 6 is used to calculate the existing deviation between the experimental data with Chauvenet test (BUTTON 2000).

$$DR = \frac{y_1 - y}{S}$$
Eq.6

Where

DR is the standard adopted by Chauvenet criterion

$y_1$  is the tested value

$y$  is the value of the sample average

$S$  is the standard deviation of the sample

The data is rejected if the  $DR_0$  value is greater than the DR, which is determined depending on the number of experiments (BUTTON 2000).

Another important tool is the Student test, which allows the determination of the number of replicates of an experiment for samples with less than 20 values, that is, how many times the design should be repeated for a given level of confidence in its results. This test uses expression 7:

$$n = \left( t \frac{S}{\partial} \right)^2$$
Eq.7

Where

$n$  = number of design replicas

$t$  = value obtained in the Student table as a function of the degrees of freedom of the experiments and the confidence interval adopted (usually 95%)

$\partial$  = value obtained by multiplying the value of the sample average by the value of the confidence interval (BUTTON, 2000)

### 3.3.1 WELDING SPEED

The choice of this welding parameter as a control variable in this work took into account the mechanisms of solidification and grain growth during the cooling of the weld bead. The welding speed, interacting with the electric current and arc voltage, is responsible for the thermal gradient, determining the orientation of grain growth, thus influencing the retention of hydrogen bubbles inside the weld. The welding speed also determines the shape of the melting pool, i.e. elliptical, when the speed and heat input are low, and in drop form, when the speed and heat input are high (STOOP ET AL 1989).

### 3.3.2 - ELECTRIC ARC CURRENT

The electric current is an extremely important factor in the study of the occurrence of porosity because it is closely linked to the heat input, which is associated with the cooling speed. The cooling time may or may not allow hydrogen bubbles to escape, influencing the volume of voids retained in the weld bead (MODENESI 1976).

### 3.3.3 - FREQUENCY OF ALTERNATING CURRENT

This variable is a proposal made by this work, which studies the hypothesis that the frequency of alternating current promotes a natural agitation in the melting pool. In its turn, this would facilitate the fluctuation and escape of hydrogen bubbles or, on the other hand, the expansion of the contact area of the fusion pool with the atmosphere of the arc, thereby increasing hydrogen absorption and, finally, influencing the occurrence of porosity. The values found for the positive and negative times

were established by the standard of the welding source used for the tests, whose positive time is twice the negative, in order for the cathode attack to be satisfactory.

### 3.4 PRE-TESTS

Some parameters were determined by the pre-tests to be maintained constant during the effective tests, as shown in Table 3.

**Table 3 - Process parameters kept constant.**

Process	GTAW AC
Base metal	Al 5052, 3.25 mm thick
Protective and purging gases	commercially pure Argon
Gas flow protection and purge	10 l/min
Purge gas flow	2 l/min
Electrode type	Tungsten zirconiado
Electrode diameter	3.25 mm
Electrode-part distance	3.25 mm
Electrode end	Semi-spherical
Nozzle diameter	12 mm

### LEVELS OF VARIABLES

To determine the low, medium and high levels of welding speed, intensity of electric current, and frequency of alternating current, were considered factors such as: the welding speed; the grain growth structure; and the effects of solidification mechanisms at each level. The determination of the values of electric current was based specifically on the welding conditions, taking into account the effects that the electric current would have on the base metal, relating it with thickness, type of joint, welding speed, cord morphology, and molten area subject to hydrogen absorption.

In relation to the values of the frequency of alternating current, the time values presented in the welding source manual were taken as the basic orientation. It was sought to establish frequency parameters that had very different values between low and high levels, considering the limits of the machine.

The arrangement of the values levels of the control variables is presented in table 4. These values are related to the procedures performed in the pre-tests when all the information presented in item 4 was considered.

**Table 4 - Level values for influence variables.**

Variables	Levels		
	Low (-)	Medium (0)	High (+)
welding speed	60 cm/min	95 cm/min	120 cm/min
Electric current	240 A	270 A	300 A
Frequency	66.67 Hz	103.09 Hz	222.22 Hz

### 3.5 - TESTS

The specimens were welded according to a criterion of beginning and ending of the cord 20 mm from the edges. Each one was used to obtain only one specimen removed from the central region of the cord, to avoid the use of parts committed to some process defect. The central part of the welded plate was submitted to macrography to visualize the molten zone, which was later removed from the base metal so that it could be fully immersed in a 1000ml Becker.

After weighing in water and air, the results were compiled and they were submitted to Chauvenet test calculations and variance analysis, which provided an overview of the influence of the main variables and their interactions; however, to determine more accurately the influence of each variable on the phenomenon, it was necessary to analyze each of the variables separately. Therefore, it was decided to plot the most representative results in diagrams of the variable in question as a function of the volume of voids in the weld bead, as it can be seen below.

## 4 RESULTS AND DISCUSSIONS

### 4.1 ANALYSIS OF VARIANCE

Table 5 lists the results of the variance analysis performed from the results of the gravimetric study. In the variation source column are listed the influence variables used in this work, as well as their second and third level interactions. For calculation purposes, the isolated effect of each variable, the two-by-two interactions, and the interaction between all of them were taken into account.

It can be seen, in table 5, by comparing the values of the F factor calculated with the respective F table value, for each of the variables and interactions of the second and third levels, that the variable welding speed, identified by the letter ( A ), when analyzed separately, has a greater influence on the response variable, while the electric current, letter ( B ), has less influence on the same variable. The frequency of alternating current, letter ( C ), because it presented a calculated F value lower than the tabled F value, did not have a significant influence on the response variable in this study.

**Table 5 - Analysis of variance of void volume values.**

SOURCE OF VARIATION	SUM OF SQUARES	DEGREES OF FREEDOM	F CALCULATED	F TABLED
<b>MAIN EFFECTS</b>				
Welding speed (A)	SSA = 1.35	2	6,39	2,51
Electric Current (B)	SSB = 1.23	2	3,77	2,51
CA Frequency (C)	SSC = 0.11	2	1.98	2,51
<b>2-FACTOR INTERACTIONS</b>				
Ab	SS(AB) = 0.74	4	1.00	2,17
Ac	SS(AC) = 2.49	4	4,29	2,17
Bc	SS(BC) = 1.25	4	2,27	2,17
<b>3-FACTOR INTERACTIONS</b>				
Abc	SS(ABC) = 3.65	8	1,32	1,91
Error	SSE = 21,133	27		
Total	SST = 29,354			

When we analyze the interactions of the variables in the second level, we observed that the interaction between the welding speed and the frequency, represented in table 5 as CA, has an influence on the response variable but this fact is probably due to the direct influence of welding speed, since the analysis of variance proved that the variable frequency of alternating current did not exert significant influence, while the interaction between welding speed and electric current, represented in table 5 as AB, does not offer considerable changes. Considering that the variables in question interact inversely, that is, when the welding speed increases the heat input decreases, which in its turn raises with the accretion in current. Although the variables welding speed and electric current have influence in isolation, when they interact there is no influence, probably due to the fact that they act inversely.

The analysis of variance, shown in table 5, provided a global view of the influence of the main variables and their interactions. However, to determine more accurately the influence of each variable on the phenomenon, it is necessary to analyze each of the variables separately. In this way, the most

representative results are displayed in diagrams of the variable in question as a function of the volume of voids in the weld bead, as it follows.

#### 4.2 WELDING SPEED EFFECT

Welding speed proved to be the most representative influence factor on the volume of voids presented by the samples obtained in the tests. Figure 6 shows the most representative curves obtained from the results shown in a welding speed chart, in cm/min, versus the percentage of void volume calculated by gravimetric analysis. Each of the curves represents a sequence of tests where the variables electric current and frequency were kept constant, varying the welding speed. These curves were traced from sets of three tests performed with values low, medium and high welding speed. The constant variables for this study are represented by the letters B and C and correspond to the electric current and frequency respectively.

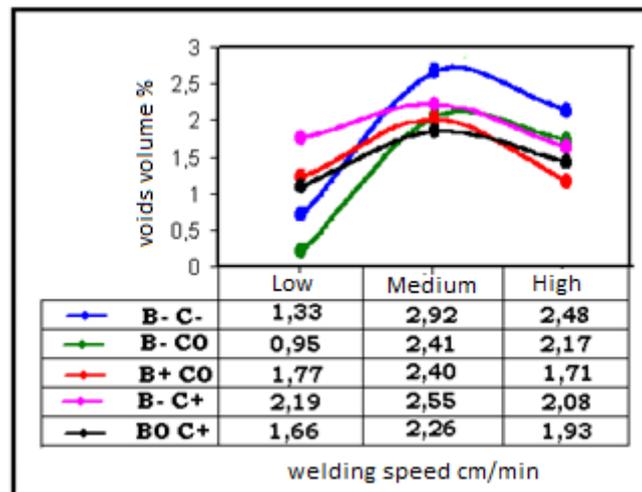


Figure 6 - Volume of voids depending on welding speed

When analyzing the curves plotted in Figure 6, it is observed that there is an increasing trend of porosity occurrence between the low and medium levels of welding speed, while between the medium and high levels, the trend is reversed, showing a decrease in the volume of voids observed in the samples. As the heat input is related to the welding speed, being inversely proportional, by raising the welding speed, the cooling rate rises as well. The quantity of pores retained in the weld metal is related to the mechanism of growth of hydrogen bubbles, the solidification time of the weld metal (cooling rate), and the speed at which hydrogen bubbles move within the molten metal.

The curves plotted in Figure 6 show that at low values of welding speed the heat input is higher, decreasing the cooling rate, i.e. delaying cooling allows the diffusion of bubbles inside the molten metal and their escape. Raising the speed, moving from the low level to the average level of the variable welding speed, the tendency is to increment the percentage of empty volume due to the reduction in cooling time compared to the difficulty of the bubbles spreading inside the molten aluminum trapped inside the weld metal. At even higher welding speeds, that is, moving from the medium to the high level, the tendency is to decline the percentage of void volume due to the abating in the cooling rate to levels where the time of hydrogen absorption in the melting pool is subdued.

The influence of welding speed variation can be understood as being related to the heat source and thermal gradient in the melting pool. These variables have a number of implications that explain the trapping or escape of hydrogen bubbles, such as variation of hydrogen solubility in aluminum as a function of temperature, and the movement of molten metal flow in the convection fusion pool. Thus, it is possible to consider that the movement of hydrogen bubbles is also related to the change in welding speed, which implies the variation of the thermal gradient of the melting pool surface. The change of the thermal gradient on the weld surface due to the variation of the velocity causes

changes in the forces existing in the melting pool by changing the direction of the molten metal flow, consequently facilitating or not the escape of hydrogen bubbles.

### 4.3 EFFECT OF ELECTRIC CURRENT

The electric current influenced the porosity concentration in aluminum welds because it is a factor that, together with the welding speed, tension and thermal efficiency, acts in the variation of the heat input in the weld bead. With the raise of the electric current, maintaining constant the welding speed, the heat input also grows, escalating the temperature on the surface of the melting pool, which allows greater absorption of hydrogen in the weld. Figure 7 shows a chart of the electric current, in amps, versus percentage of volume of voids, with the most representative curves.

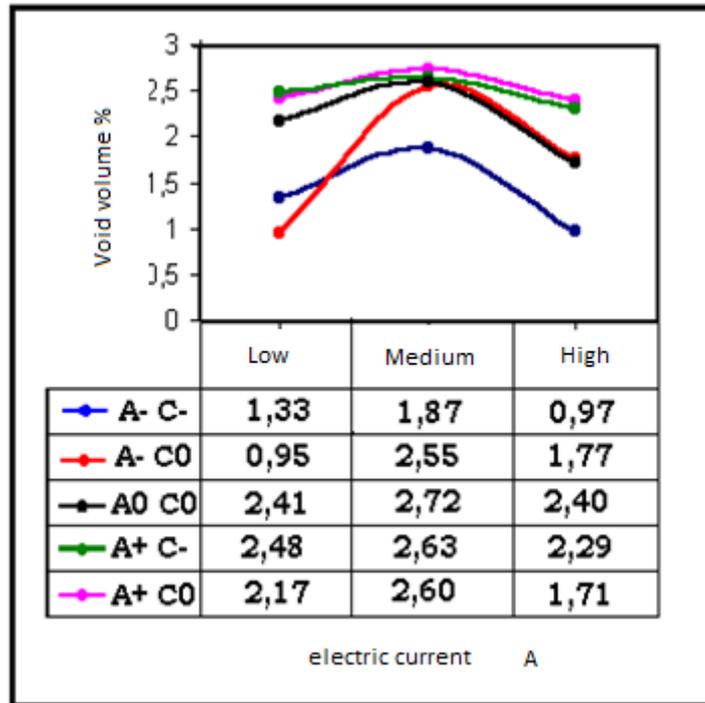


Figure 7 - Graph of the volume of voids as a function of the electric current

The letter A represents the variable welding speed in low (-), (0) medium and (+) high values; the letter C designates the frequency variable of alternating current for (-) low and (0) medium values. In each of the curves shown in Figure 7, both the welding speed and the frequency of alternating current were kept constant, varying only the intensity of the electric current of the welding arc. The curves show a trend of pore growth when the current values pass from the low to the middle level, probably by the raise of the heat input, increasing the possibility of hydrogen absorption in the fusion pool to a value in which it represents an absorption limit, related to the volume and temperature of the melting pool. Between the medium and high levels of electric current, the curves tend to reverse the trend, indicating the decline in the percentage of pores. This is probably because the gain in the current increases the heat input and, therefore, the temperature in the melting pool, improving the fluidity of the molten metal and facilitating the movement of the bubbles inside the melting pool, consequently with higher floating speed.

It can also be attributed to the decrease in the percentage of the volume of voids in higher currents the fact that the heat input rises the temperature on the surface of the melting pool, directing the flow of molten metal, by convection, to the surface, facilitating the escape of bubbles. By elevating the electric current, the volume of voids would tend to diminish as a consequence of the augmentation in the surface temperature of the melting pool, declining the cooling rate and providing more time

for the diffusion of hydrogen bubbles, facilitating their escape. Added to this phenomenon, with the escalate in surface temperature and its thermal gradient, there is a favoring in the escape of hydrogen bubbles caused by convection of molten metal that are propelled towards the surface of the melting pool.

#### 4.4 EFFECT OF ALTERNATING CURRENT FREQUENCY

The analysis of variance showed no significant influence on the percentage of void volume.

### 5 CONCLUSIONS

Based on the results obtained in this work, it can be concluded that:

- The variables welding speed and intensity of arc electric current had a significant influence on the occurrence of porosity for the experimental conditions of this study.
- The variable frequency of alternating current, proposed in this study, did not present significant influence on the response variable.
- Among the variables studied in this work, the welding speed showed the greatest influence on the occurrence of porosity in aluminum welds.
- At low welding speeds the porosity percentage was lower.
- There was an accretion in the volume of pores inside the cords when the welding speed was raised to the average level of intensity.
- The percentage of void volume decreased with the gradual growth of welding speed, from the average level to the high level of intensity.

### 6 BIBLIOGRAPHIC REFERENCES

- AWS, American Welding Society, **Welding Handbook, Metals and Their Weldability**, vol 4, 7ª edição , Miami, 2001, pp 316; 388.
- BLEWETT, R. V. A review of applications and requirements. **Welding & Metal Fabrication**, / s. l./, oct. 1991. p. 449 – 453.
- BRUMHEAD, D., CANHAN, L.T., SEEKINGS, D.M., TUFTON, P.J. Gravimetric analysis of pore nucleation and propagation in anodized silicon. **Electrochimica Acta**, vol. 38, Issues 2-3, Feb. 1993, p. 191-197.
- BUTTON, SÉRGIO TONINI, **Metodologia para planejamento experimental e análise de resultados**, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, setembro de 2000.
- DEVLETIAN, J. H., WOOD, W. E. Factors affecting porosity in aluminum welds: a review. **Welding Research Council Bulletin**, n. 290, dec. 1987. p. 1 – 17.
- DICKERSON, P.B. and Bob Irving, Welding Aluminum: It's not As Difficult As It Sounds, **Welding Journal**, 1992, pp 45 a 50.
- GEORGE E. P., WILLIAN G. HUNTER, J. STUART HUNTER, Statistics for Experimenters, An Introduction to Design, **Data Analysis, and Model Building**.1978, pag 107 a 108.
- MODENESI, Paulo J. **Introdução à física do arco elétrico**: e sua aplicação na soldagem dos metais. Colaboração do Profº Alexandre Q. Bracarense. Belo Horizonte: UFMG, 1996. Departamento de Engenharia Metalúrgica.
- SILVA, C.L.M., SCOTTI, A. The influence of double pulse on porosity formation in aluminum GMAW. **Journal of Materials Processing Technology**, vol. 171, Issue 3, Feb. 2006, p. 366-372
- STOOP, B. T. J., LUYENDIJK, T., OUDEN, G. den. Structure and properties of GTA Welds in aluminium alloys. **Welding & Metal Fabrication**, /s. l./, oct. 1989, p. 420 – 423.
- WOODS R.A. is a Staff Research metallurgist with Kaiser Aluminum and chemical corporation at the Center for Technology, Pleasanton, Califórnia. **Welding Research supplement** –pp 97 at 108 – march 1974

## **SOBRE OS AUTORES**

### **ANÍSIO CESAR SILVEIRA DE SOUZA**

Possui graduação em MAGISTÉRIO EM DISCIPLINAS ESPECÍFICAS PARA O ENSINO pelo CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DO PARANÁ(1989), ESPECIALIZAÇÃO EM MANUTENÇÃO INDUSTRIAL pela Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro(1991), mestrado em Engenharia Mecânica e de Materiais pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná(2003) e curso-técnico-profissionalizante pelo CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE CAMPOS DOS GOYTACAZES(1978). Atualmente é professor do Instituto Federal Fluminense. Atuando principalmente nos seguintes temas: alumínio, soldagem, porosidade e processo.”

### **LAÉRCIO JAVAREZ JUNIOR**

Possui graduação em Engenharia Mecânica pela Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho (2003), mestrado em Engenharia Mecânica pela Universidade de São Paulo (2009) e doutorado em Engenharia Mecânica pela Universidade de São Paulo (2013), na área de Projeto Mecânico. Atualmente, é professor adjunto IV da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Curitiba. Trabalhou por cinco anos em indústria na área de projeto mecânico. Tem experiência na área de Projetos, com ênfase em Modelagem e Prototipagem, atuando também na área de simulação paramétrica e otimização.

### **RODRIGO LUPINACCI VILLANOVA**

Possui graduação em Engenharia Metalúrgica pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, mestrado em Processos de Fabricação, área de Metalurgia do Pó, pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, e doutorado em Engenharia de Materiais, na área de Corrosão e Tratamentos de Superfície, também pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, com período sanduíche na Friderich-Alexander-Universität ErlangenNürnberg, Alemanha, na área de microscopia eletrônica de transmissão. Atuou em diversas empresas do ramo metal-mecânico ligadas ao setor automotivo e a tratamentos de superfície, e atualmente é professor no Departamento Acadêmico de Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Curitiba, e coordenador do curso de Engenharia Mecânica nesta instituição.

### **FÁBIO MARTINS**

Possui graduação em Engenharia Mecânica pela Escola de Engenharia de Piracicaba (1992), mestrado em Engenharia Mecânica pela Universidade Estadual de Campinas (1995) e doutorado em Engenharia Mecânica pela Universidade Estadual de Campinas (2000), na área de Materiais e Processos de Fabricação, com ênfase em Soldagem. Atualmente é professor associado da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Curitiba. Tem experiência na área de Engenharia de Materiais e Metalúrgica, com ênfase em Soldagem, atuando principalmente nos seguintes temas: soldagem de metais ferrosos e de ligas de alumínio, otimização de processos de soldagem e metalurgia de soldagem.

# **EFEITOS DA LAMINAÇÃO A FRIO NA MICROESTRUTURA DE DOIS AÇOS INOXIDÁVEIS DÚPLEX**

DENILSON JOSÉ MARCOLINO DE AGUIAR

*Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) – Ponta Grossa, PR*

RONALD LESLEY PLAUT

*Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP) – São Paulo, SP*

MANOEL RIBEIRO DA SILVA

*Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) – Itajubá, MG*

NELSON BATISTA DE LIMA

*Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN) – São Paulo, SP*

ANGELO FERNANDO PADILHA

*Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP) – São Paulo, SP*

## **I INTRODUÇÃO**

Os aços inoxidáveis da classe dúplex são conhecidos pela sua elevada resistência à corrosão nos mais variados tipos de ambientes agressivos aliados ao excelente desempenho mecânico. Possuem frações volumétricas de ferrita ( $\alpha$ ) e austenita ( $\gamma$ ) aproximadamente iguais, distribuídas em forma de lamelas alternadas na microestrutura (1). A fase  $\alpha$  é ferromagnética, tem estrutura cúbica de corpo centrado (CCC), 48 sistemas de deslizamento e alta energia de defeito de empilhamento (EDE). A fase  $\gamma$ , por sua vez, é paramagnética, tem estrutura cúbica de face centrada (CFC), 12 sistemas de deslizamento e baixa energia de defeito de empilhamento. Os mecanismos de deformação plástica atuantes em processos de deformação são diferentes na ferrita ( $\alpha$ ) e austenita ( $\gamma$ ), por causa das suas diferenças intrínsecas. Enquanto ferrita ( $\alpha$ ) está mais sujeita à formação de células de discordâncias, a austenita ( $\gamma$ ) apresenta distribuição mais homogênea de discordâncias, muitos defeitos de empilhamento e pode sofrer transformação de fase dando origem à martensita induzida por deformação ( $\alpha'$ ) (1, 2).

A martensita induzida por deformação ( $\alpha'$ ) é uma fase ferromagnética, de estrutura CCC, muito fina e, embora seja possível sugerir sua presença por meio de microscopias óptica (3–5) e eletrônica de varredura (6,7), detalhes são difíceis de observar, sendo necessário o uso da microscopia eletrônica de transmissão (8–11). Esta fase pode ser identificada e quantificada por difração de raios X em aços inoxidáveis austeníticos. A quantificação por meio da técnica de difração depende de uma relação entre intensidades integradas (áreas dos picos) e uma relação de intensidade difratada que depende do ângulo de difração e da natureza de cada fase (12–14). A martensita induzida por deformação ( $\alpha'$ ) possui aspectos cristalográficos idênticos à ferrita (15), por isto, em perfis de difração de raios X elas se somam. No entanto, a quantificação de fases por difração de raios X nos aços dúplex que já têm natureza bifásica fica comprometida, principalmente em amostras deformadas por laminação, uma vez que estas deformações promovem mudanças abruptas nas orientações cristalográficas (16), logo, influenciam a intensidade relativa das fases. Todavia, medidas de saturação magnética têm sido usadas

de maneira bastante satisfatória na quantificação de fases ferromagnéticas em aços inoxidáveis dúplex (17–19).

A EDE é um dos principais parâmetros que deve ser observado para prever a susceptibilidade de formação da martensita induzida por deformação ( $\alpha'$ ). O valor de 18 mJ/m<sup>2</sup> é descrito como o limite para ocorrência deste fenômeno (20). Isto significa que, para aços cuja austenita tem valor de EDE menor que 18 mJ/m<sup>2</sup>, a martensita é um provável fenômeno presente nos mecanismos de deformação, enquanto que em valores maiores de EDE até um limite de 35 mJ/m<sup>2</sup> a maclação é um fenômeno predominante (20,21). Outro aspecto importante de ser observado para prever a susceptibilidade da formação da martensita induzida por deformação ( $\alpha'$ ) é o teor de nitrogênio e níquel, uma vez que estes elementos são fortes estabilizadores da austenita (22). Neste trabalho foram conduzidos experimentos de deformação por laminação em diferentes níveis, em dois aços inoxidáveis dúplex com composições diferentes. Medidas de saturação magnética foram realizadas para avaliar a formação da martensita induzida por deformação ( $\alpha'$ ) e os resultados foram correlacionados com a estabilidade da austenita devido aos teores de nitrogênio e níquel de cada aço.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais iniciais foram recebidos na forma de chapas laminadas e solubilizadas. A espessura inicial da chapa do aço inoxidável dúplex (DP) era de 8,0 mm, usinada 1,0 mm de cada superfície (direção normal à laminação), atingindo espessura de 6,0 mm. Este procedimento foi executado com a finalidade de aproximar as condições iniciais de espessura da chapa do aço inoxidável superdúplex (SD) como recebido, a qual era de 5,0 mm. Na tabela 1 são apresentadas as composições químicas do aço inoxidável dúplex (DP) e superdúplex (SD), respectivamente.

UNS S31803 (DP)									
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	N
0,0234	0,278	1,797	0,0374	0,0010	22,52	5,54	3,246	0,148	0,157
UNS S32520 (SD)									
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	N
0,0236	0,295	0,867	0,0464	0,0004	24,90	6,50	4,044	1,399	0,218

**Tabela 1: Composição química (em % em massa) dos aços inoxidáveis dúplex (DP) e superdúplex (SD)**

### 2.1 CARACTERIZAÇÃO PRELIMINAR

A caracterização preliminar dos mesmos lotes destes aços inoxidáveis dúplex (DP) e superdúplex (SD) foi bem descrita em trabalho anterior dos mesmos autores deste trabalho (15), quanto às suas composições químicas, microscopia óptica e aspectos estereológicos (fração volumétrica das fases, morfologia e tamanho de grãos), microscopia eletrônica de varredura, microanálise química e estimativa de energia de defeito de empilhamento (EDE) baseado em modelos que usam a composição química (15, 23–25). As equações de EDE foram desenvolvidas para a avaliação dos aços inoxidáveis austeníticos, acarretando, desta forma, possíveis imprecisões na avaliação dos dúplex. Dentre estas equações, a que parece ser mais realística para o caso da austenita dos dúplex (15, 26) é a de Pickering, conforme equação 1 (25):

$$\text{EDE (mJ/m}^2\text{)} = 25,7 + 2 (\% \text{ Ni}) + 410 (\% \text{ C}) - 0,9 (\% \text{ Cr}) - 77 (\% \text{ N}) - 13 (\% \text{ Si}) - 1,2 (\% \text{ Mn}) \quad (1)$$

## 2.2 DEFORMAÇÃO E AVALIAÇÃO DOS SEUS EFEITOS

Após a caracterização inicial, amostras de cada aço foram laminadas em diversos níveis de deformação até 90 % de redução de espessura.

### 2.2.1 LAMINAÇÃO E PARÂMETROS DE LAMINAÇÃO

A redução da espessura foi imposta em várias etapas (passos de laminação) devido às limitações da capacidade de deformação do laminador. É importante salientar que as deformações nunca são perfeitamente homogêneas (27), todavia, é possível minimizar os efeitos de heterogeneidades considerando-se o fator delta ( $\Delta$ ) de laminação (28,29). Para isto, deve-se levar em consideração a deformação real, conforme a equação 2 (28,29):

$$\varepsilon_{real} = LN \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right) \quad (2)$$

O fator  $\Delta$ , que leva em consideração as espessuras de entrada e saída do material ( $h_0$  e  $h$ , respectivamente) e é definido pela equação 3 (28,29):

$$fator \Delta = \frac{h + h_0}{arco \ de \ contato} \quad (3)$$

O arco de contato leva em consideração o diâmetro do cilindro laminador ( $\Phi$  cilindro) e é definido pela equação 4 (28,29):

$$Arco \ de \ contato = \sqrt{\frac{\Phi \ do \ cilindro \cdot (h_0 - h)}{2}} \quad (4)$$

A taxa de deformação imposta pelo processo pode ser definida pela equação 5 (28,29):

$$\dot{\varepsilon} = \left[ \frac{velocidade \ periférica}{60} \cdot \sqrt{\frac{2}{\left(\frac{\Phi \ do \ cilindro}{1000}\right) \cdot \left[\left(\frac{h_0}{1000}\right) - \left(\frac{h}{1000}\right)\right]}} \right] \cdot \varepsilon_{real} \quad (5)$$

Foram utilizadas taxas de deformação convencionais de laminação a frio, variáveis entre 5 e 15 s<sup>-1</sup>. As reduções foram realizadas de forma a manter o fator  $\Delta$  menor que 1, para que efeitos de heterogeneidades fossem minimizados.

Na literatura, é reportado que a austenita ( $\gamma$ ) destes aços pode sofrer transformação induzida por deformação (15, 16, 18, 26, 30–33). Para uma investigação mais detalhada, no que tange à formação de martensita induzida por deformação ( $\alpha'$ ), foram escolhidas duas condições de redução de espessura: uma intermediária (50 %) e outra mais severa (90 %), para ambos os aços. As análises realizadas serão descritas nos tópicos a seguir.

### 2.2.2 DUREZA

Ao final de cada um dos passos de laminação, tomaram-se amostras para avaliar o encruamento promovido pela deformação. Foi possível avaliar de maneira gráfica a evolução do perfil da dureza nos vários passos de laminação, utilizando-se um microdurômetro Leica, modelo VMHT MOT, escala

Vickers com carga de 1 Kg (HV-1) por 15 segundos. Realizou-se 15 medidas em cada face totalizando 45 medidas em cada condição de cada amostra, a partir das quais se calculou média e desvio padrão.

## 2.3 DIFRAÇÃO DE RAIOS X

A caracterização das amostras por difração de raios X neste trabalho foi conduzida em um difratômetro da marca Rigaku, com radiação  $\text{CuK}\alpha 1$ , instalado no Centro de Ciências e Tecnologia em Materiais do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares CCTM – IPEN/ São Paulo.

### 2.3.1 AJUSTE DE PERFIS, REFINAMENTO DE RIETVELD E PARÂMETROS REFINADOS

O método de Rietveld é baseado no ajuste de múltiplas variáveis, com um modelamento matemático teórico dos mínimos quadrados, até se obter o menor resíduo possível. Entende-se por resíduo as diferenças quadráticas entre as intensidades observadas e calculadas. A técnica utiliza-se da comparação entre as medidas experimentais e um modelo de ajuste para medidas de intensidade do pico difratado e largura à meia altura (*Full Width at Half Maximum* – FWHM) (12, 34–38).

A qualidade do refinamento pode ser acompanhada graficamente por uma figura de mérito produzida pelas diferenças entre curva observada (medida) e a calculada (pelo modelo matemático) (7). Outra medida de qualidade é dada pelo parâmetro estatístico de qualidade de refinamento  $\chi^2$ , para obter-se o melhor ajuste GoF (*goodness of fit*). Ambos os métodos são reconhecidos e recomendados pela literatura. O parâmetro  $\chi^2$  pode ser calculado pela equação 6 (12, 34–38):

$$\chi^2 = \frac{[R_{wp}/R_{exp}]^2}{(6)}$$

onde  $R_{wp}$  e  $R_{exp}$  são relacionados ao fator R da fase observada e calculada, respectivamente, e em que R está relacionado com a intensidade difratada. O refinamento será melhor, quando o resultado for mais próximo possível de 1 (12, 34–38).

Os ajustes e método de Rietveld foram executados automaticamente com o software GSAS usando-se o perfil 4 (27). Observou-se sempre o melhor ajuste para cada caso, seja via gráfico (figura de mérito) e parâmetro  $\chi^2$ . Ao final do refinamento é possível obter a lista de parâmetros de corrigidos.

### 2.3.2 PARÂMETROS DE REDE

Alguns parâmetros microestruturais podem ser medidos pela difração de raios X. Desta forma, o efeito da deformação pode ser avaliado com a evolução destes parâmetros por comparação. O experimento de difração consiste em incidir um feixe monocromático de comprimento de onda conhecido ( $\lambda$ ) sobre um material cristalino. É possível a interferência construtiva desta onda com um conjunto de planos cristalinos com espaçamento  $d$ , para certos ângulos  $\theta$  de incidência. Esta interferência construtiva é chamada de difração e é descrita pela lei de Bragg, na equação 7 (12–14):

$$n \lambda = 2 d \sin \theta \quad (7)$$

onde  $n$  é um número inteiro, relativo à distância interplanar dos planos mais internos em relação à superfície de incidência. As posições nas quais ocorre a difração são determinadas pela geometria do reticulado. Os espaçamentos entre os planos ( $h k l$ ) estão relacionados com o parâmetro de rede ( $a$ ) e ângulos do reticulado. Para sistemas cúbicos é válida a equação 8 (12–14):

(8)

$$\frac{1}{d^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2}$$

Apesar de ser possível a quantificação de fases pela integração dos picos por difração de raios X, a equação básica das intensidades necessita da orientação randômica dos picos para que o método tenha precisão (método do pó) (12–14). Amostras na forma de chapas geralmente possuem orientação cristalográfica preferencial (textura), oriunda do processo de fabricação. No caso de deformação por laminação, é praticamente impossível o controle das orientações cristalográficas (textura) (16, 17), o que compromete a quantificação de fases (12–14). Por este motivo, a quantificação de fases por difração de raios X foi descartada neste trabalho e a escolha feita para esta observação será descrita no próximo tópico.

## 2.4 MEDIDAS DE MAGNETIZAÇÃO DE AMOSTRA VIBRANTE

Das amostras na condição como recebida e deformadas, foram cortados pequenos discos com aproximadamente 5 mm de diâmetro. A partir destes discos, medidas de saturação magnética foram realizadas usando uma máquina de ensaio de magnetização de amostra vibrante (VSM), da marca Lake Shore, modelo 7400 VSM. A partir dos dados de saturação magnética foi possível estimar a fração volumétrica das fases ferromagnéticas ( $\alpha + \alpha'$ ). A equação 9 foi usada para o aço dúplex (18) e a equação 10 foi usada para o superdúplex (19):

$$C(\alpha)\% = \frac{M_s}{133} \text{ (emu / g)} \quad (9)$$

$$C(\alpha)\% = \frac{M_s}{128} \text{ (emu / g)} \quad (10)$$

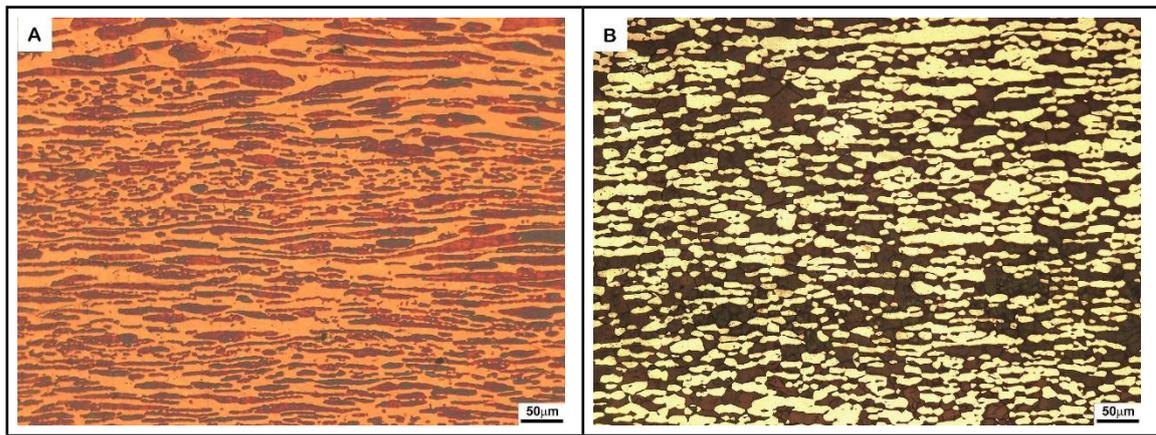
onde  $M_s$  é a medição de saturação magnética (emu/g); os valores intrínsecos de saturação magnética para DP e SDP são 133 (emu/g) e 128 (emu/g), respectivamente.

Foram avaliados os efeitos da deformação na formação da martensita induzida por deformação ( $\alpha'$ ), nos dois aços estudados, pela diferença entre os valores totais de fase magnética antes e depois da laminação.

## 3 RESULTADOS

### 3.1 CARACTERIZAÇÃO PRELIMINAR

Os aços dúplex (DP) e superdúplex (SD) apresentavam microestruturas muito similares, ambas formadas por lamelas alternadas de  $\alpha$  e  $\gamma$ , com grãos alongados na direção de laminação. Tal efeito é típico de chapas da família dos aços inoxidáveis dúplex (1). Isto ocorre porque a energia de interface ( $\gamma/\alpha$ ) é menor que a energia dos contornos de grão ( $\alpha/\alpha$ ) ou ( $\gamma/\gamma$ ). Para ilustrar a microestrutura, nas Figuras 1A e 1B podem ser observadas micrografias das seções transversais das chapas dos aços dúplex (DP) e superdúplex (SD), respectivamente. As imagens foram obtidas por microscopia óptica aplicando-se diferentes técnicas de ataque metalográfico. Na Figura 1A foi usada a queima da superfície em chama de gás de cozinha (GLP) (15) por aproximadamente 1 minuto e em 1B, o reagente de Beraha II modificado. Em ambos os casos as amostras foram previamente polidas eletroliticamente de acordo com recomendações da literatura (6, 15, 39).



**Figura 1: Microestrutura dos aços dúplex (A) e superdúplex (B), como recebidos. Em A a amostra atacada por chama de gás de cozinha (GLP) revela austenita nas partes mais escuras. Em B a amostra atacada por reagente de Beraha II revela a ferrita nas partes mais escuras**

Na Figura 1A, a fase mais escura é a austenita, mais oxidada pela chama e, na Figura 1B, a fase mais escura é a ferrita, pois é o depósito preferencial de sulfeto. Embora as técnicas ataquem fases diferentes, é evidente que a fase contínua é a ferrita ( $\alpha$ ), intercalada por ilhas de austenita ( $\gamma$ ). A partir das imagens obtidas por microscopia óptica nas três faces dos dois aços, diversas características dos materiais como recebidos foram determinadas para efeito comparativo, as quais são apresentadas resumidamente na Tabela 2.

Material como recebido	Porcentagem de ferrita (método das malhas)				Diâmetro médio de grão ferrita ( $\mu\text{m}$ )	Diâmetro médio de grão austenita ( $\mu\text{m}$ )
	Long.	Transv.	Sup.	Média total		
DP	$46 \pm 4$	$46 \pm 4$	$44 \pm 4$	$44 \pm 4$	25	25
SD	$45 \pm 3$	$46 \pm 4$	$46 \pm 4$	$45 \pm 4$	35	34

**Tabela 2: Fração volumétrica de ferrita (%) determinada por estereologia quantitativa e tamanho de grão da ferrita e austenita para os aços dúplex (DP) e superdúplex (SD)**

Além da morfologia, a similaridade dos dois aços é evidenciada pela semelhança entre eles na fração volumétrica e tamanho de grão para ambas as fases.

A partir de dados de microanálise química por espectroscopia de raios X por dispersão de energia (EDS), avaliou-se as quantidades dos principais elementos de liga metálicos em cada fase de ambos os aços. Desta forma, foi possível estudar os coeficientes de partição e compará-los com dados disponíveis na literatura, sendo que estes dados estão resumidos na Tabela 3.

Elemento	Dúplex			Super dúplex			Partição $\alpha/\gamma$ extraída da referência (31)
	UNS S31803			UNS S32520			
	Porcentagem em massa			Porcentagem em massa			
	$\alpha$	$\gamma$	$\alpha/\gamma$	$\alpha$	$\gamma$	$\alpha/\gamma$	
Fe	66,6	69,0	0,97	63,2	64,3	0,98	0,97
Cr	23,7	21,7	1,09	27,3	24,4	1,12	1,17
Ni	4,4	6,9	0,64	5,3	8,4	0,63	0,61
Mo	3,6	2,4	1,48	4,2	2,9	1,45	1,59

**Tabela 3: Porcentagem em massa dos principais elementos metálicos na ferrita e na austenita e a partição dos elementos nas duas fases ( $\alpha/\gamma$ ), determinadas por análise por dispersão de energia dos aços inoxidáveis dúplex e superdúplex**

É observado que a ferrita ( $\alpha$ ) apresentou-se mais rica em cromo e molibdênio, enquanto a austenita ( $\gamma$ ) é mais rica em níquel. Os coeficientes de partição encontrados neste trabalho estão em boas concordâncias com a literatura (31).

A EDE é uma característica que deve ser considerada na previsão do provável mecanismo de deformação plástica (20). Com os dados da composição global do aço e partir da composição química da austenita ( $\gamma$ ), avaliou-se então a EDE usando-se o modelo de Pickering (equação 1) (25). Na Tabela 4 estão listados os valores EDE calculados levando em conta a composição global do aço e composição da austenita ( $\gamma$ ), resultando, assim, numa faixa de valores.

Método (modelo)	Material			
	DP		SD	
	EDE ( $\text{mJ}/\text{m}^2$ )		EDE ( $\text{mJ}/\text{m}^2$ )	
	Composição Global	Composição da austenita	Composição Global	Composição da austenita
Pickering (25)	8	19	4	19

**Tabela 4: Valores de EDE calculados a partir de diferentes modelos presentes na literatura, utilizando composição global e composição austenita para ambos os aços**

A EDE estimada por este modelo resulta em valores entre 4–19  $\text{mJ}/\text{m}^2$  e 8–19  $\text{mJ}/\text{m}^2$  para os aços dúplex e superdúplex, respectivamente. Sabendo-se que o limite restritivo para a formação de martensita induzida por deformação ( $\alpha'$ ) é de 18  $\text{mJ}/\text{m}^2$  (20), tal modelo parece ser razoável, pois em trabalho anterior usando estes mesmos aços já foi demonstrada a possibilidade de formação de martensita induzida por deformação ( $\alpha'$ ) em ambos os aços (15). Como a técnica utilizada resulta numa faixa de valores, nota-se que os limites superiores de EDE estão muito próximos do limite restritivo desta transformação. Portanto, apesar da transformação ser possível, a composição química e, conseqüentemente, a estabilidade da austenita ( $\gamma$ ), também deve ser considerada para explicar os fenômenos envolvidos na laminação.

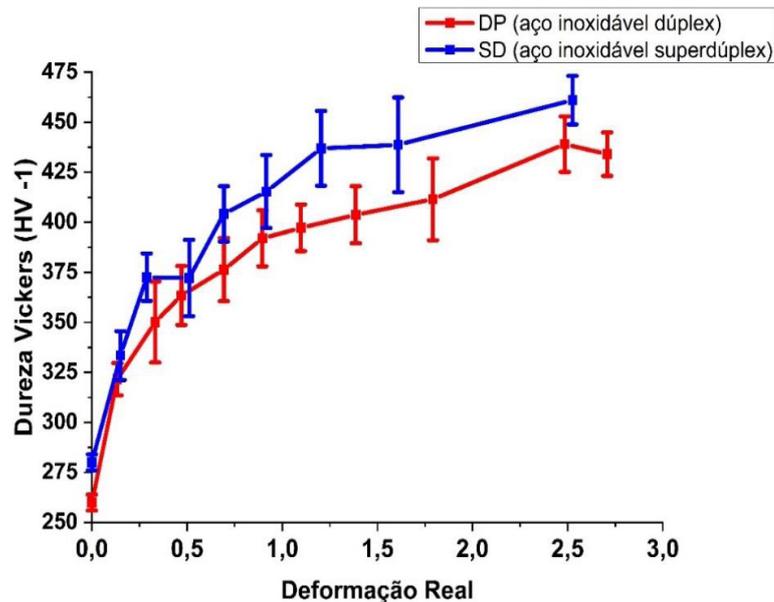
## 3.2 LAMINAÇÃO

### 3.2.1 PARÂMETROS DE LAMINAÇÃO

Após a caracterização inicial do aço, procedeu-se à deformação à temperatura ambiente, obedecendo-se ao fator  $\Delta$  menor que 1 para que as heterogeneidades fossem minimizadas (20, 21).

### 3.2.2 EVOLUÇÃO DO PERFIL DE DUREZA COM A DEFORMAÇÃO

Na Figura 2 são mostradas evidências da influência da deformação no aumento da dureza, dos aços dúplex (DP) e superdúplex (SD).



**Figura 2: Variação da dureza Vickers (HV-1) vs deformação real para os diferentes níveis de laminação**

Há uma similaridade no comportamento dos dois aços perante a deformação. Nota-se um aumento gradativo da dureza à medida que se aumenta a deformação, como é esperado. Isto ocorre devido aos mecanismos de multiplicação e interação de defeitos cristalinos, especialmente discordâncias no processo de deformação a frio. Também são observadas pequenas oscilações no perfil de dureza. Este efeito pode estar associado às heterogeneidades de deformação, pois, por mais que sejam tomados cuidados como manter fator  $\Delta$  menor que 1, deformações reais nunca são homogêneas (27).

## 3.3 DIFRAÇÃO DE RAIOS X

A seguir serão apresentadas figuras de perfis de difração de raios X evidenciando os efeitos da deformação nos dois aços.

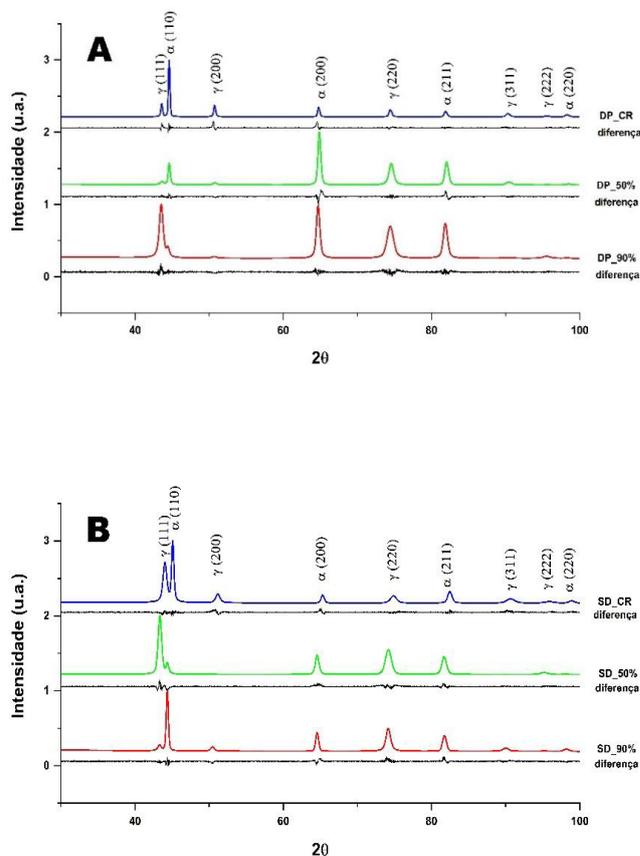
### 3.3.1 AJUSTES DE PERFIS E REFINAMENTO DE RIETVELD

O refinamento pelo método de Rietveld foi executado conforme descrito no capítulo anterior, com o auxílio do software GSAS em todas as amostras, ou seja, no estado como recebido e nos estados deformados dos dois aços (12, 34, 35).

Nas Figuras 3A e 3B são apresentados os perfis de difração dos aços dúplex (DP) e superdúplex (SD) nas condições como recebido (CR) e com reduções de espessura por laminação de 50 e 90%, bem como as figuras de mérito das diferenças entre os valores experimentais (12) e calculados para cada caso, conforme legenda.

Nota-se, na Figura 3A, que a laminação provoca uma mudança significativa nos picos de difração. Para 50% de laminação, aumentou-se a intensidade relativa dos picos (200) e (211) da ferrita e (220) da austenita, enquanto diminuiu a intensidade relativa dos picos (110) da ferrita e (111) da austenita em relação ao material como recebido. Para 90% de laminação as mudanças foram outras, pois aumentou significativamente a intensidade relativa dos picos (200) e (211) da ferrita e (111), (220) e (222) da austenita, enquanto o pico (110) da ferrita diminuiu. Inclusive, os picos (220) da ferrita e (200) e (311) da austenita praticamente desapareceram.

Nota-se, na Figura 3B, a diminuição dos picos (110) e (200) da ferrita, desaparecendo tanto os picos (220) da ferrita quanto os picos (200) e (311) da austenita, que diminuíram para 50% de laminação. Ainda nessa condição, a intensidade relativa do pico (111) da austenita aumentou bastante. Para 90% de laminação, a alteração é ainda diferente. Enquanto o pico (200) da austenita voltou a aparecer, o pico (111) dessa mesma austenita diminuiu significativamente sua intensidade relativa enquanto o pico (110) da ferrita teve um aumento na intensidade.



**Figura 3: Perfil de difração de raios X refinado pelo método de Rietveld, bem como figuras de mérito de qualidade de refinamento, para as amostras como recebida (CR), redução de espessura de 50% por laminação e redução de espessura de 90% por laminação. Em A aço inoxidável dúplex (DP) e em B aço inoxidável superdúplex (SD)**

### 3.3.2 PARÂMETROS REFINADOS

Na Tabela 5 são apresentados os parâmetros de rede refinados e os índices de qualidade de refinamento ( $\chi^2$ ) para cada aço (12, 34, 35).

Verifica-se que não há mudança significativa nos parâmetros de rede dos 2 aços, tanto no estado como recebido como no estado deformado. Ademais, os parâmetros de rede dos dois aços são muito próximos entre si.

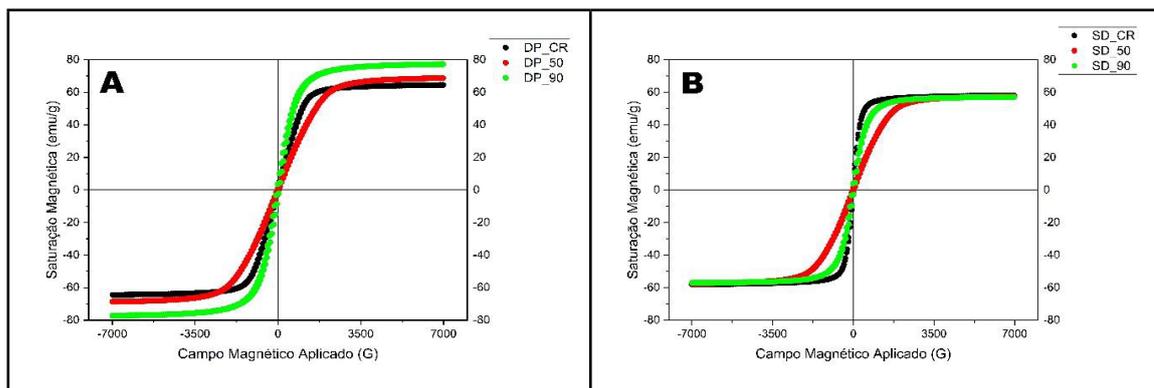
Amostra	Parâmetros de rede		Índice de qualidade do refinamento (GoF)
	$\gamma$ (nm)	$\alpha$ (nm)	$\chi^2$
DP_CR	0,361	0,289	1,86
DP_50 %	0,361	0,288	1,46
DP_90 %	0,361	0,288	1,35
SD_CR	0,361	0,288	1,69
SD_50 %	0,362	0,289	1,49
SD_90 %	0,362	0,289	1,30

**Tabela 5: Parâmetros de rede das fases após refinamento e o índice de qualidade do refinamento GoF – goodness of fit  $\chi^2$  (12, 34, 35) estão listados para cada condição das amostras de aço inoxidável dúplex (DP) e superdúplex (SD)**

Para os 2 aços estudados, as fortes mudanças na aparência dos perfis de difração são causadas pela mudança na textura cristalográfica do material (16), somadas às possíveis transformações de fase induzidas por deformação na austenita (16, 26, 30, 32, 33). Como a textura dificulta muito a quantificação de fases por difração de raios X para estes aços deformados por laminação, o uso desta técnica não é recomendável. Por este motivo, para a quantificação de fases usou-se o ensaio de magnetização.

### 3.4 MEDIDAS DE MAGNETIZAÇÃO DE AMOSTRA VIBRANTE

Nas Figuras 4A e 4B são mostrados os resultados dos ensaios de saturação magnética para os aços dúplex (DP) e superdúplex (SD), respectivamente. O experimento foi conduzido comparando o estado como recebido (CR) e deformado nas duas condições de redução de espessura (50 e 90 %), nos dois aços.



**Figura 4: Ensaio de Saturação Magnética vs Campo Magnético Aplicado nas condições como recebido (CR) e deformado por laminação (com redução de espessura de 50 e 90 %) em A o aço inoxidável dúplex (DP) e em B o aço inoxidável superdúplex (SD).**

É possível observar nas Figuras 4A e 4B a saturação máxima em cada condição para os dois aços. A diferença de comportamento entre o estado como recebido (CR) e o estado deformado (reduções de espessura de 50 e 90%) pode ser atribuída à quantidade de martensita induzida pela deformação.

Observa-se, ainda, comparativamente, que os valores de saturação magnética do aço dúplex (DP) são superiores ao aço superdúplex (SD). Os valores de saturação magnética, bem como as frações de fase magnética e a quantidade de martensita induzida por deformação ( $\alpha'$ ) (diferença de valores entre o estado como recebido e o estado deformado), estão listados na tabela 6.

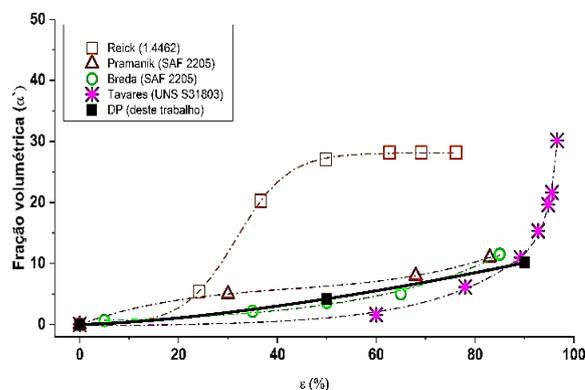
Condição	Material					
	Duplex			Superduplex		
	$M_s$ (emu/g)	Ca total (%)	(%) MID- $\alpha'$	$M_s$ (emu/g)	Ca total (%)	(%) MID- $\alpha'$
CR	64,5	49	0	57,9	45	0
Lam. 50 %	68,7	52	3	57,4	45	0
Lam. 90 %	77,3	58	9	57,1	45	0

**Tabela 6: Saturação magnética obtida pelo ensaio de magnetização de amostra vibrante (VSM), frações volumétricas totais das fases ferromagnéticas (ferrita  $\alpha$  + martensita induzida por deformação  $\alpha'$ ), calculados usando as equações 9 e 10 para aços dúplex (DP) e superdúplex (SD), respectivamente. As frações de martensita induzida por deformação (MID- $\alpha'$ ) são dadas pela diferença entre o estado como recebido (CR) e os estados deformados por laminação (50 e 90%) para cada aço**

Os valores de fase magnética no estado como recebido estão razoavelmente de acordo com os medidos por estereologia quantitativa (dentro do desvio padrão) (15), onde foi observado o teor de austenita levemente superior aos de ferrita em ambos os aços.

É possível concluir que há formação de martensita induzida por deformação ( $\alpha'$ ) no aço inoxidável dúplex (DP) deformado. Além disto, observa-se que quanto maior o nível de deformação, maior a quantidade de martensita formada (3% da fase em 50% de deformação e 9% da fase em 90% de deformação).

Estes valores estão de acordo com diversas publicações existentes na literatura (18, 26, 31, 32), como pode ser observado na Figura 5, que ilustra a fração transformada *versus* deformação a partir dos valores encontrados para o aço dúplex (DP) deste trabalho com os dados existentes na literatura.



**Figura 5: Fração transformada *vs* deformação a partir de dados encontrados na literatura (18, 26, 31, 32) e resultados obtidos no aço inoxidável dúplex (DP) deste trabalho contendo a fração volumétrica de martensita induzida por deformação ( $\alpha'$ ) *vs* % de deformação por laminação a frio**

Adicionalmente, é possível notar que não há formação de martensita induzida por deformação ( $\alpha'$ ) no aço superdúplex (SD) em qualquer das condições de deformação por laminação (50 e 90%). O aço superdúplex (SD) possui maiores teores de níquel e de nitrogênio, ocasionando uma maior estabilidade da austenita (22), dificultando transformações de fase induzidas por deformação.

## CONCLUSÕES

As experiências e discussões realizadas no presente trabalho permitem as seguintes conclusões:

No estado inicial, as chapas dos dois aços no estado como recebido apresentaram uma microestrutura típica de lamelas alternadas de ferrita e de austenita, com frações de ferrita levemente inferiores às de austenita, e grãos de ferrita com dimensões similares às da austenita.

Resumidamente, os parâmetros de rede de ambas as fases, determinados por difração de raios X, nos aços dúplex e superdúplex são muito próximos. Além disto, não há alteração significativa de parâmetros para materiais deformados em relação ao material inicial, pois na ferrita ( $\alpha$ ) houve variação de 0,288 a 0,289 nm e na austenita ( $\gamma$ ) de 0,361 a 0,362 nm, dependendo das condições analisadas nos dois aços estudados.

A saturação magnética é maior no aço dúplex comparado com o aço superdúplex, tanto no estado como recebido quanto no estado deformado. Por meio de equações existentes na literatura baseadas na saturação magnética, foi possível estimar que os níveis de 50 e 90% de redução de espessura por laminação produzem 3% e 9% de martensita induzida por deformação ( $\alpha'$ ), respectivamente, no aço inoxidável dúplex. As mesmas condições de deformação não alteram as frações das fases no aço superdúplex. Este fato provavelmente está relacionado à maior estabilidade da austenita ( $\gamma$ ) deste último – conferida pelos maiores teores de nitrogênio e de níquel.

## REFERÊNCIAS

- (1) ALVAREZ-ARMAS, I. Duplex Stainless Steels: Brief History and Some Recent Alloys. **Recent Patents on Mechanical Engineering**, v. 1, n. 1, pp. 51–57, 2012.
- (2) PADILHA, A. F.; AGUIAR, D. J. M. et al. Duplex Stainless Steels: a Dozen of Significant Phase Transformations. **Defect and Diffusion Forum: 164 Recent Advances in Mass Transport in Materials**, v. 322, pp. 163-174, 2012.
- (3) MÜLLER-BOLLENHAGEN, C.; ZIMMERMANN, M. et al. Very high cycle fatigue behavior of austenitic stainless steel and the effect of strain-induced martensite. **International Journal of Fatigue**, v. 32, n. 6, pp. 936-942, 2010.
- (4) DAS, A.; SIVAPRASAD, S. et al. Morphologies and characteristics of deformation-induced martensite during tensile deformation of 304 LN stainless steel. **Materials Science and Engineering A**, v. 486, n. 1-2, pp. 283-286, 2008.
- (5) HEDAYATI, A.; NAJAFIZADEH, A. et al. The effect of cold rolling regime on microstructure and mechanical properties of AISI 304L stainless steel. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 210, n. 8, pp. 1017-1022, 2010.
- (6) TALONEN, J.; HÄNNINEN, H. Formation of shear bands and strain-induced martensite during plastic deformation of metastable austenitic stainless steels. **Acta Materialia**, v. 55, n. 18, pp. 6108-6118, 2007.
- (7) COOK, D. C. Strain induced martensite formation in stainless steel. **Metallurgical Transactions A**, v. 18, n. 2, pp. 201-210, 1987.
- (8) KISKO, A.; MISRA, R. D. K. et al. The influence of grain size on the strain-induced martensite formation in tensile straining of an austenitic 15Cr-9Mn-Ni-Cu stainless steel. **Materials Science and Engineering A**, v. 578, pp. 408-416, 2013.
- (9) YOUNG, M. C.; CHAN, S. L. I. et al. Hydrogen-enhanced cracking of 2205 duplex stainless steel welds. **Materials Chemistry and Physics**, v. 91, n. 1, pp. 21-27, 2005.
- (10) MISRA, R. D. K.; NAYAK, S. et al. On the significance of nature of strain-induced martensite on phase-reversion-induced nanograined/ultrafine-grained austenitic stainless steel. **Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science**, v. 41, n. 1, pp. 3-12, 2010.

- (11) SPENCER, K.; VÉRON, M. et al. The strain-induced martensite transformation in austenitic stainless steels: Part 1 – Influence of temperature and strain history. **Materials Science and Technology**, v. 25, n. 1, pp. 7-17, 2009.
- (12) PECHARSKY, V. K.; ZAVALIJ, P. Y. **Fundamentals of Powder Diffraction and Structural Characterization of Materials**. New York, NY: Springer 2009.
- (13) SURYANARAYANA, C.; NORTON, M. G. **X-Ray Diffraction**. Boston, MA: Springer US, 1998.
- (14) CULLITY, B. D.; STOCK, S. R. **Elements of X-Ray Diffraction**. Upper Saddle River: Pearson, 2014.
- (15) AGUIAR, D. J. M. de; PADILHA, A. F. et al. Comparative study on the forming and reversion of strain-induced martensite in two duplex stainless steels: Developing a model for VSM analysis of powders or fine chips. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 485, n. August 2018, pp. 8-15, 2019.
- (16) ELMASSALAMI, M.; PALATNIK-DE-SOUSA, I. et al. On the magnetic anisotropy of superduplex stainless steel. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 323, n. 18-19, pp. 2403-2407, 2011.
- (17) MIRANDA, M. A. R. R.; SASAKI, J. M. et al. The use of X-ray diffraction, microscopy, and magnetic measurements for analyzing microstructural features of a duplex stainless steel. **Materials Characterization**, v. 54, n. 4-5, pp. 387-393, 2005.
- (18) TAVARES, S. S. M.; SILVA, M. R. da et al. Microstructural changes produced by plastic deformation in the UNS S31803 duplex stainless steel. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 180, n. 1-3, pp. 318-322, 2006.
- (19) TAVARES, S. S. M.; PARDAL, J. M. et al. Magnetic phase quantification of the UNS S32750 superduplex stainless steel. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 416, n. 1-2, pp. 179-182, 2006.
- (20) ALLAIN, S.; CHATEAU, J. P. et al. Correlations between the calculated stacking fault energy and the plasticity mechanisms in Fe-Mn-C alloys. **Materials Science and Engineering A**, v. 387-389, n. 1- 2 SPEC. ISS., pp. 158-162, 2004.
- (21) BARMAN, H.; HAMADA, A.S. et al. A stacking fault energy perspective into the uniaxial tensile deformation behavior and microstructure of a Cr-Mn austenitic steel. **Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science**, v. 45, n. 4, pp. 1937-1952, 2014.
- (22) REED, R. P. Nitrogen in austenitic stainless steels. **Jom**, v. 41, n. 3, pp. 16-21, 1989.
- (23) SCHRAMM, R. E.; REED, R. P. Stacking fault energies of seven commercial austenitic stainless steels. **Metallurgical Transactions A**, v. 6, n. 7, pp. 1345-1351, 1975.
- (24) RHODES, C. G.; THOMPSON, A. W. The composition dependence of stacking fault energy in austenitic stainless steels. **Metallurgical Transactions A**, v. 8, n. 12, pp. 1901-1906, 1977.
- (25) PICKERING, F. B. T. Physical metallurgical development of stainless steels. **Institute of Metals book, Stainless steels 84**. Goeteborg, v. 320, pp. 2-28, 1985.
- (26) BRENDA, M.; BRUNELLI, K. et al. Effects of Cold Rolling and Strain-Induced Martensite Formation in a SAF 2205 Duplex Stainless Steel. **Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science**, v. 46, n. 2, pp. 577-586, 2015.
- (27) SIVAM, S. P. S. S.; SARAVANAN, K. et al. Overview and Assessment of Formability Effect of Material Properties of Sheet Metal – A Short Communication. **Jr. of Industrial Pollution Control**, v. 33, n. 2, pp. 1732-1738, 2017.
- (28) WALTER, A. Backofen Deformation Processing – Drawing. **Metallurgical Transactions**, v. 4, n. December, pp. 2679-2699, 1973.
- (29) SELLARS, C. M.; WHITEMAN, J. A. Recrystallization and grain growth' in hot rolling. **Metal Science**, v. 13, n. 3-4, pp. 187-194, 1979.
- (30) PAPULA, S.; ANTTILA, S. et al. Strain hardening of cold-rolled lean-alloyed metastable ferritic-austenitic stainless steels. **Materials Science and Engineering A**, v. 677, pp. 11-19, 2016.
- (31) REICK, W.; POHL, M. et al. Determination of stacking fault energy of austenite in a duplex stainless steel. **Steel Research**, v. 67, n. 6, pp. 253-256, 1996.
- (32) PRAMANIK, S.; BERA, S. et al. Influence of cold rolling on microstructural evolution in 2205 duplex stainless steel. **Steel Research International**, v. 85, n. 5, pp. 776-783, 2014.

- (33) MANDAL, A.; PATRA, S. et al. Effect of Rolling and Subsequent Annealing on Microstructure, Microtexture, and Properties of an Experimental Duplex Stainless Steel. **Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science**, v. 48, n. 12, pp. 5960-5977, 2017.
- (34) TOBY, B. H. R factors in Rietveld analysis: How good is good enough? **Powder Diffraction**, v. 21, n. 01, pp. 67-70, 2006.
- (35) LARSON, A. C.; DREELE, R. B. Von. **General Structure Analysis System (GSAS)**. Los Alamos, 2004.
- (36) ARAÚJO, J. C. de; MOREIRA, E. L. et al. Análise estrutural de uma hidroxiapatita carbonatada pelo método de Rietveld aplicando funções de perfil diferentes. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 61, n. 4, pp. 479-484, 2008.
- (37) ARAÚJO, J. C. de; ASSIS, J. T. de et al. Determinação dos parâmetros microestruturais de amostras de caulinitas usando o método de refinamento do perfil de difração de raios X. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 58, n. 4, pp. 299-307, 2005.
- (38) ARAÚJO, J. C. de; ASSIS, J. T. de et al. Caracterização da microestrutura de caulinitas pela difração de raios x. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 11, n. 3, pp. 361-371, 2006.
- (39) TALONEN, J.; ASPEGREN, P. et al. Comparison of different methods for measuring strain-induced  $\alpha$ -martensite content in austenitic steels. **Materials Science and Technology**, v. 20, n. 12, pp. 1506-1512, 2004.

## SOBRE OS AUTORES

### **DENILSON JOSÉ MARCOLINO DE AGUIAR**

Possui Graduação em Engenharia de Materiais pela Universidade Estadual de Ponta Grossa (2003), Mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais pela Universidade Estadual de Ponta Grossa (2008) e Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais pela Universidade de São Paulo (2012), na área de Metalurgia Física. Atualmente, é Professor Adjunto C nível III da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Ponta Grossa. Tem experiência na área de Engenharia de Materiais e Metalúrgica com ênfase em metalurgia física dos aços inoxidáveis dúplex.

### **RONALD LESLEY PLAUT**

Possui Graduação em Engenharia Metalúrgica pela Universidade de São Paulo (1969), Mestrado em Iron and Steel technology – University of Sheffield (1972) e Doutorado – University of Sheffield (1974). Livre-Docente (1999). Tem experiência na área de Engenharia de Materiais e Metalúrgica, atuando principalmente nos seguintes temas: metalurgia física, aços, ligas não ferrosas, laminação de planos, forjamento, extrusão, estampagem de chapas, aplicação industrial de redes neurais adaptativas. Atua na área de modelos matemáticos aplicados na área de conformação mecânica de materiais (metais, elastômeros, papel).

### **MANOEL RIBEIRO DA SILVA**

Possui Graduação em Bacharelado em Física pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (1980), Graduação em Licenciatura em Física pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (1985), Mestrado em Física pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (1984) e Doutorado em Física pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (1998). Atualmente é Professor Titular da Universidade Federal de Itajubá. Tem experiência nas áreas de Física do Estado Sólido e de Engenharia de Materiais e Metalúrgica, com ênfase em Cerâmicos, atuando principalmente nos seguintes temas: produção e caracterização de cerâmica ferrita, cerâmica ferroelétrica e propriedades magnéticas em Ligas Metálicas e Compósitos Poliméricos.

### **NELSON BATISTA DE LIMA**

Possui Graduação em Física pela Universidade de São Paulo (1979), Mestrado em Tecnologia Nuclear pela Universidade de São Paulo (1982) e Doutorado em Tecnologia Nuclear pela Universidade de São Paulo (1991). Atualmente é tecnologista sênior III da Comissão Nacional de Energia Nuclear. Tem experiência na área de Engenharia de Materiais e Metalúrgica, com ênfase em Estrutura dos Metais e Ligas, atuando principalmente nos seguintes temas: difração de raios x e textura cristalográfica.

**ANGELO FERNANDO PADILHA**

É graduado em Engenharia de Materiais pela Universidade Federal de São Carlos (1974), obteve o Mestrado em Engenharia Metalúrgica pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (1977) e o Doutorado em Engenharia Mecânica na área de Materiais pela Universität Karlsruhe (1981). Fez Pós-Doutoramentos nas Universidades Ruhr-Universität Bochum (Alemanha) e University of Wales Swansea (Reino Unido). Obteve a Livre-Docência em 1989, na EPUSP, onde é Professor Titular desde 1993. Tem experiência na área de Engenharia de Materiais e Metalúrgica, com ênfase em metalurgia física, atuando principalmente nos seguintes temas: transformações de fases, microestrutura, recristalização, técnicas de análise microestrutural, textura cristalográfica, aços inoxidáveis, superligas, alumínio e suas ligas, metais refratários e materiais para reatores nucleares. Prestou assessoria e consultoria para várias empresas do segmento metalmeccânico. É membro titular da Academia de Ciências do Estado de São Paulo desde 2012. Cedido pela USP no período entre 05 de julho de 2011 e 16 de novembro de 2015, exerceu os seguintes cargos: Presidente da Comissão Nacional de Energia Nuclear – CNEN (DAS-6); Presidente da Comissão Deliberativa da CNEN, Presidente do Conselho de Administração da INB (Indústrias Nucleares do Brasil S.A.); Presidente do Conselho de Administração da NUCLEP (Nuclebrás Equipamentos Pesados S.A.); Membro do Comitê de Coordenação dos Fundos Setoriais (FNDCT: Fundo Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico). Entre 2012 e 2014, foi membro do Conselho Técnico Científico do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF, RJ).

# **CARACTERIZAÇÃO DINÂMICA DO MÓDULO COMPLEXO DE ELASTICIDADE DE MATERIAIS TERMOREOLOGICAMENTE SIMPLES CONSIDERANDO OS EFEITOS DA TEMPERATURA, FREQUÊNCIA E DEFORMAÇÃO**

EDUARDO GREGORIO OLIVENIK FILHO  
*Professor de Engenharia Mecânica - UTFPR – Curitiba – PR*

CARLOS ALBERTO BAVASTRI  
*Professor Universidade Federal do Paraná - UFPR – Curitiba – PR*

## **1 INTRODUÇÃO**

O modelo fracionário de quatro parâmetros é aplicado na identificação das características dinâmicas de materiais viscoelásticos termoreologicamente simples aplicados em projetos de resolução de problemas relacionados ao isolamento acústico e redução de vibrações mecânicas. Este modelo é reconhecido pela sua aplicabilidade em relação à pequena quantidade de parâmetros necessários para descrever o comportamento dinâmico desses materiais. Além disso, a sua capacidade de incluir as características de memória do comportamento do material viscoelástico (MVE) em relação à deformação permite obter uma descrição mais precisa do comportamento do material.

O início das aplicações modernas do cálculo fracionário na viscoelasticidade linear é atribuído a Bagley (1979), seguido pelos trabalhos de Bagley e Torvik (1979; 1983a; 1983b; 1985) e Torvik e Bagley (1984). Willis et al. (2001) propõem uma metodologia experimental numérica na qual o módulo de Young e o de cisalhamento complexo são obtidos excitando um corpo de teste conectado a uma base acoplada a um atuador piezoeletrico em uma câmara com pressão e temperatura controladas. Os parâmetros do modelo são estimados por meio de um código computacional que minimiza a diferença entre os dados e a previsão obtida por meio de elementos finitos. Lopes et al. (2004) apresentaram uma metodologia para caracterização de MVEs baseada no modelo derivativo fracionário, considerando as influências de temperatura e frequência. Experimentalmente, esses autores usam um arranjo de um grau de liberdade no qual a transmissibilidade é medida. Utilizando a técnica de problema inverso combinada com a otimização não linear, esses autores obtêm os parâmetros do modelo derivativo fracionário para o módulo de cisalhamento complexo. Espíndola et al. (2005) apresentam uma variação do trabalho de Lopes et al. (2004), em que o fator de deslocamento devido à temperatura é tratado de forma diferente, substituindo a equação de Willians-Landel-Ferry por outra forma de fator de deslocamento. Pagnacco et al. (2007) propõem uma técnica para determinar os parâmetros de identificação para MVEs reologicamente simples com uma abordagem híbrida numérico-experimental usando medidas de campo completas. Nesse trabalho, os autores desenvolveram um método genérico capaz de tratar medidas de potência e deslocamento baseadas em conceitos de elementos finitos. Zopf et al. (2014) apresentam duas abordagens sobre o uso de derivadas fracionais utilizando o modelo sólido de Zener. O modelo fracionário foi desenvolvido de acordo com a teoria da deformação finita. Além disso, as equações constitutivas são derivadas com base em dois algoritmos

que abordam a integração fracionária ao longo do tempo para escolher o modelo de material. Xiao et al. (2014) propõem um modelo numérico para identificar os parâmetros constitutivos do modelo fracionário para os MVEs. Um modelo numérico semianalítico explícito e o método de diferenças finitas são derivados para resolver problemas de MVE. Um método baseado no modelo de problema inverso de identificação é aplicado pelos autores. A viabilidade do modelo é demonstrada usando uma verificação numérica de um problema de identificação plana formulado segundo o uso do modelo fracionário no modelo mecânico de Kelvin-Voigt. Arikoglu (2014) propôs um novo modelo baseado em derivadas fracionárias de dez parâmetros que são determinadas segundo algoritmos genéticos. O autor faz uma comparação com os modelos preexistentes mostrando bons resultados na comparação com dados obtidos experimentalmente. Bonfiglio et al. (2016) introduzem um novo método para determinar os valores do módulo complexo de Young – para MVEs isotrópicos e homogêneos – no domínio da frequência, usando uma abordagem simplificada da matriz de transferência. O método pode ser usado para simulações e otimizações do desempenho do MVE em aplicações de isolamento acústico ou de vibração. Sousa et al. (2017) apresentam uma metodologia para obter os parâmetros do modelo fracionário e da influência de temperatura para materiais viscoelásticos em que os dados experimentais são obtidos digitalizando o nomograma do material fornecido pelo fabricante. Olienick, Lopes e Bavastri (2017) apresentam uma metodologia de identificação de MVEs, termoreologicamente simples, em que o modelo de problema inverso é aplicado em conjunto com a otimização não linear para identificar os quatro parâmetros do modelo fracionário acrescido dos parâmetros de influência de temperatura e pré-carga.

Neste artigo se propõe abordar a identificação das propriedades dinâmicas de MVEs termoreologicamente simples, considerando – além da influência de frequência e temperatura – a adição da influência da deformação estática na forma de uma pré-carga. O experimento é realizado levando em consideração uma carga dinâmica de baixo nível constante devido à excitação vibratória.

A análise é realizada experimentalmente com várias temperaturas e pré-cargas em um espectro de frequência de modo que, para cada par de temperaturas e pré-cargas previamente estabelecidas, se obtenham – em experimentos separados – os valores do módulo de elasticidade. Finalmente, os resultados para todas as combinações de temperatura e pré-carga são reunidos para um processo de identificação integrado, no qual todos os resultados são analisados simultaneamente em um único processamento. Ao final do processo de identificação, os parâmetros do modelo fracionário são obtidos juntamente com os fatores de influência de temperatura e pré-carga.

Em uma primeira análise, usando dados gerados pelo próprio modelo com um modelo de material teórico, é demonstrada a viabilidade do algoritmo de identificação e, em um segundo momento, o modelo é aplicado a dados experimentais de um material real, para comprovação da capacidade de representação do modelo do material.

## 2 CARACTERIZAÇÃO DINÂMICA DE MVES

### 2.1 ABORDAGEM CLÁSSICA

A representação do módulo de elasticidade de Young é dada, na forma complexa (SNOWDOWN, 1968) por

$$E_c = E_R + i.E_I, \quad (1)$$

onde  $E_c$  é o módulo complexo de Young,  $E_R$  é a parte real, chamada módulo de elasticidade dinâmico e  $E_I$  é a parte imaginária, chamada de módulo de perda e  $i = \sqrt{-1}$ . A partir dessa definição, o fator de perda é obtido da seguinte forma:

$$\eta_E = \frac{E_I}{E_R} \quad (2)$$

Considerando o efeito da frequência, a equação (1) pode ser re-escrita na forma,

$$E_C(\Omega) = E_R(\Omega)[1 + i\eta(\Omega)] \quad (3)$$

onde  $\Omega$  denota a frequência.

Para o modelo mecânico de Zener, a aplicação de derivadas fracionárias conduz, a partir do modelo constitutivo,

$$E_C(\Omega) = \frac{E_L + E_H b_o [i\Omega]^\beta}{1 + b [i\Omega]^\beta} \quad (4)$$

ao parâmetro real empírico,  $\Omega$  é a frequência e  $\beta$  é a ordem derivativa fracionária.

Ferry (1980) apresentou um modelo matemático que expressa a influência da temperatura nos MVE termoreologicamente simples. A relação empírica é chamada “WLF” de Williams-Landel-Ferry,

$$\log_{10} \alpha_T(T) = \frac{-\theta_1(T - T_o)}{\theta_2 + T - T_o} \quad (5)$$

em que  $\theta_1$  e  $\theta_2$  são parâmetros do material a serem determinados,  $T_o$  é uma temperatura de referência e  $T$  a temperatura para a qual se deseja o parâmetro.

Na abordagem clássica, os parâmetros contidos nas equações (4) e (5) são obtidos por meio de gráficos construídos através de dados experimentais do material, como apresentado nas Figuras 1 e 2. O gráfico da Figura 1 permite obter o parâmetro  $\alpha_T$ . Os demais parâmetros podem ser obtidos da Figura 2, no gráfico denominado Wicket Plot (ASTM E756-98, 1996). Os dados são então introduzidos na equação (6), permitindo, assim, obter os valores do módulo complexo de elasticidade Young para um amplo espectro de frequências e temperaturas,

$$E_C(\Omega, T) = \frac{E_L + E_H b_o [i\alpha_T(T)\Omega]^\beta}{1 + b_o [i\alpha_T(T)\Omega]^\beta} \quad (6)$$

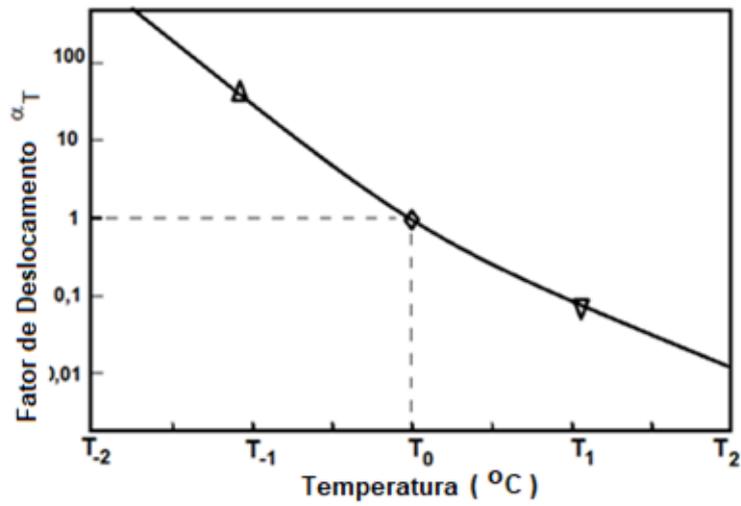


Figura 1: Fator de Deslocamento  $\alpha_T(T)$  devido à temperatura  
 Fonte: Olienick (2017).

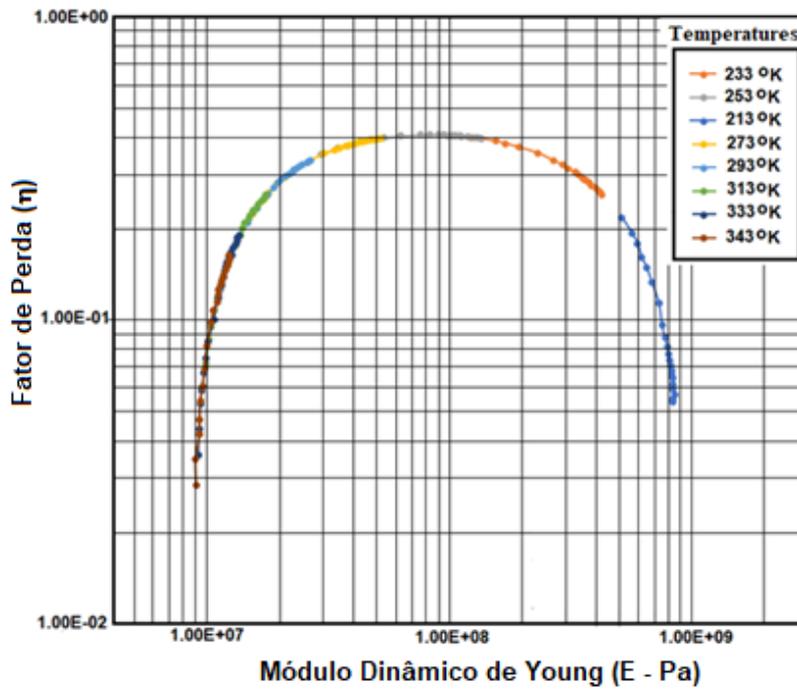
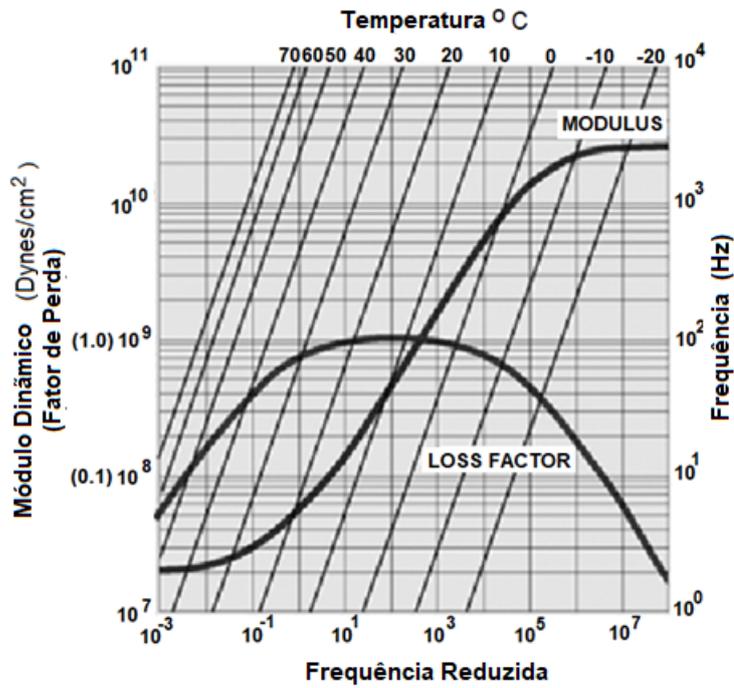


Figura 2: Wicket Plot  
 Fonte: Olienick (2017).



**Figura 3: Nomograma de Frequência Reduzida**  
**Fonte: Souza et al. (2017).**

## 2.2 CARACTERIZAÇÃO DINÂMICA INTEGRADA

Esta abordagem foi apresentada pela primeira vez por Lopes et al. (2004), aplicada para a caracterização de MVEs para a obtenção do módulo dinâmico de cisalhamento com a utilização de um aparato experimental voltado à determinação da função de transmissibilidade. A relação entre transmissibilidade e módulo dinâmico de cisalhamento permitiu obter a propriedade desejada.

A influência da deformação estática na forma de uma pré-carga foi apresentada em Nashif et al. (1985), com o auxílio da teoria de materiais hiperelásticos apresentada por Mooney (1940) e Rivlin (1947),

$$E(\Omega, T, \lambda) = [C_3 F_1(\lambda) + C_4 F_2(\lambda)] \frac{E(\Omega, T)}{6(C_3 + C_4)} \quad (7)$$

$$\eta(\Omega, T, \lambda) = \frac{(C_3 + C_4) F_2(\lambda)}{C_3 F_1(\lambda) + C_4 F_2(\lambda)} \eta(\Omega, T) \quad (8)$$

onde  $\lambda$  representa a deformação extensional, dada por  $\lambda = \varepsilon + 1$ , em que  $\varepsilon$  representa a deformação da engenharia,  $C_3$  e  $C_4$  são parâmetros do material, determinados empiricamente, e  $F_1(\lambda)$  e  $F_2(\lambda)$  são dados por

$$F_1(\lambda) = 2 \left[ 2\lambda^2 + \frac{1}{\lambda} \right] \quad (9)$$

$$F_2(\lambda) = 2 \left[ \lambda + \frac{2}{\lambda^2} \right] \quad (10)$$

Deve ser observado que  $E(\Omega, T)$  e  $\eta(\Omega, T)$  nas equações (7) e (8) são a parte real e a parte complexa, respectivamente, da equação (6).

Para proceder com o processo de caracterização dinâmica integrada, serão necessários os dados experimentais em que o módulo de elasticidade complexo seja medido para cada condição de frequência, temperatura e pré-carga  $[E_E(\Omega, T, \lambda)]$ . Para valores iniciais arbitrados para os parâmetros das equações (7) e (8), será gerada uma matriz simétrica à matriz de dados experimentais  $[E_E(\Omega, T, \lambda)]$ , que será chamada de matriz de dados numéricos:  $[E_C(\Omega, T, \lambda)]$ .

Para o processo de otimização, é definido o erro

$$e_{jkl}(\Omega_j, T_k, \lambda_l) = E_C(\Omega_j, T_k, \lambda_l) - E_E(\Omega_j, T_k, \lambda_l) \text{ com } j=1..p, k=1..q, l=1..r, \quad (11)$$

com  $p$  sendo o número de frequências,  $q$  o número de temperatura e  $r$  o número de deformações relativas a cada valor de pré-carga.

A função-objetivo do processo de otimização  $f(x)$  é dada por,

$$f(x) = \sum_1^r \left\{ \sum_1^q \left[ \sum_1^p (e_{jkl})(e_{jkl})^c \right] \right\} \quad (12)$$

em que o índice C superposto indica conjugado do valor complexo.

O processo de otimização visa minimizar a função objetivo, quando será obtido um vetor solução

$$\mathbf{x}^T = [E_L, E_H, b_o, \beta, \theta_1, \theta_2, T_o, C_3, C_4] \quad (13)$$

Os parâmetros C3 e C4 obtidos no processo de otimização não são verdadeiros. Nas equações (7) e (8) pode ser notada uma relação de autodependência entre estes parâmetros no que diz respeito à solução do problema inverso de identificação. Na prática, os mesmos dados experimentais, no processo de otimização, podem fornecer diferentes valores para cada solução, mas a relação de proporcionalidade entre os mesmos é verdadeira e permanecerá constante em todas as tentativas com os mesmos dados.

O código do programa computacional, em MATLAB, permite, em princípio, o uso de duas funções, FMINCOM e FMINSEARCH. FMINCOM usa o conceito de derivada da função para atingir o objetivo e requer a imposição de restrições para o intervalo de procura. FMINSEARCH usa o método de Nelder e Mead (1965), que não requer restrições, mas necessita de valores iniciais. No entanto, quando novos parâmetros são inseridos no problema de identificação, o estabelecimento de um conjunto de valores iniciais pode conduzir a solução a um mínimo local, pois há falta de referências para estabelecer um conjunto adequado de valores iniciais. Neste caso, a solução pode ser auxiliada pelo emprego de um método híbrido de otimização, com o uso inicial de Algoritmos Genéticos que podem conduzir a um mínimo global, complementado pelo método de Nelder Mead para uma melhora na precisão final. O uso do método híbrido se justifica pelo fato de o método por Algoritmos Genéticos ter alto custo computacional.

### 3 RESULTADOS

A validação da metodologia apresentada pode ser dividida em duas etapas:

1ª Etapa: Valida-se o algoritmo de identificação dos parâmetros, a partir de parâmetros de um material fictício criado para simular dados experimentais. A validação ocorrerá com a obtenção dos parâmetros usados na geração dos dados experimentais simulados.

2ª Etapa: Validação do modelo material matemático, através de dados experimentais verdadeiros.

#### 3.1 1ª ETAPA: VALIDAÇÃO DO MODELO DE IDENTIFICAÇÃO DINÂMICA

Os valores dos parâmetros do material fictício, bem como dos dados de realização dos ensaios virtuais, foram os constantes da Tabela 1, a seguir (OLIENICK, 2017). Nos dados do ensaio experimental foi adicionado um desvio aleatório de até 2,5% sobre os valores exatos, obtidos por meio do modelo fracionário, visando à simulação de uma dispersão característica de dados experimentais.

O Wicket Plot dos dados experimentais, do material virtual, na Figura 4, apresenta o aspecto esperado para um material termoreologicamente simples.

Os resultados obtidos no processo de identificação foram adequados aos propostos:

$E_L = 8,0922$  MPa;  $E_H = 910,38$  MPa;  $\beta = 0,3015$ ;  $b_o = 0,0024$ ;  $q_1 = 10,35$ ;  $q_2 = 163,21$ ;  $C_3 = -8,02$ ;  $C_4 = 36,09$ . Ainda que os resultados sejam expressos por 56 (8 temperaturas x 7 deslocamentos estáticos) gráficos de norma do módulo de elasticidade de Young complexo x frequência, a Figura 5 fornece uma noção dos resultados gerais.

A conclusão é de que a técnica empregada para identificar os parâmetros é plenamente eficaz, considerando um material perfeitamente termoreologicamente simples.

TEMPERATURAS (°C)	-60	-40	-20	0	20	40	60	70
<b>DEFORMAÇÃO DEVIDA À PRE-CARGA</b>								
Obs.: $\lambda = 1 + \varepsilon$								
(+ ) Tração; (-) Compressão								
Amplitude de Deformação Dinâmica Constante: 0,001								
(%)	-0.5	-1	-2	-3	-4	-5	-7	
$\varepsilon$	-0.005	-0.01	-0.02	-0.03	-0.04	-0.05	-0.07	
$\lambda$	0.995	0.99	0.98	0.97	0.96	0.95	0.93	
<b>FREQÜÊNCIAS MEDIDAS</b>								
(Hz)	1	2	4	6	10	15	25	
	50	100	150	200	250	300	350	
	400	450	500	600	700	800	900	
	1000							
<b>PARAMETROS DO MODELO FRACIONÁRIO</b>								
$E_o$	$8.093 \times 10^6$		$\theta_1$	10.33				
$E_{\infty}$	$9.089 \times 10^8$		$\theta_2$	163.11				
$b_o$	0.0024		$C_3$	-8				
$\beta$	0.3018		$C_4$	35				
$T_o$	10							

**Tabela 1: Parâmetros do Modelo Fracionário; Material Fictício**

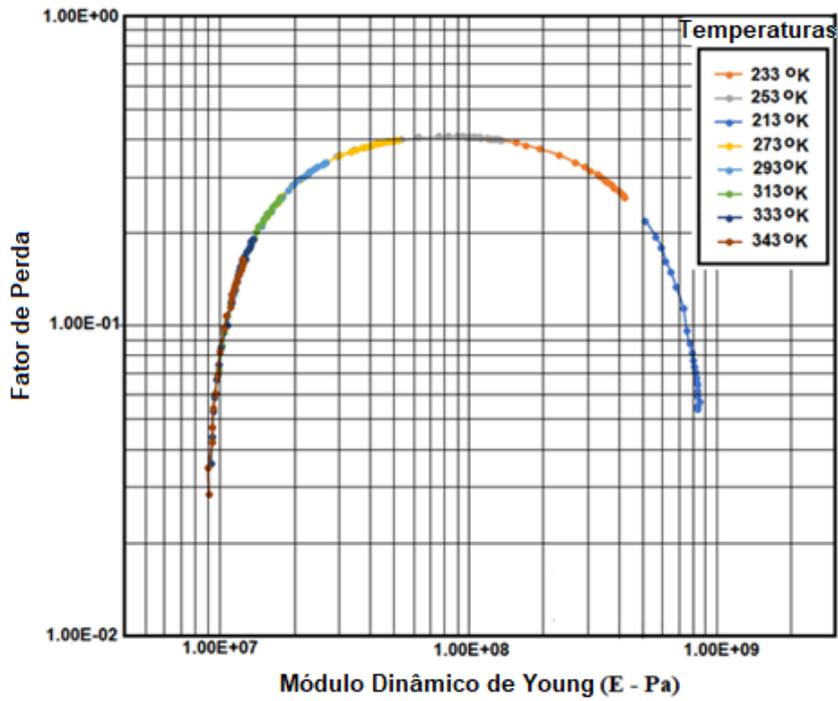


Figura 4: Wicket Plot  
Fonte: Olienick (2017).

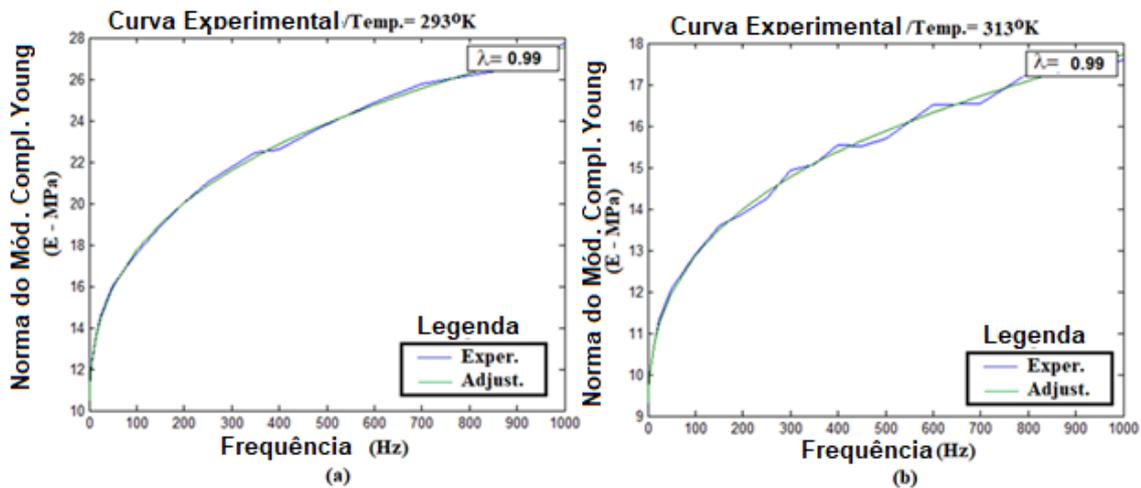


Figura 5: Gráficos de Resultados do processo de identificação integrada para pré-carga de 1% por compressão para 293 °K e 313 °K  
Fonte: Olienick (2017).

### 3.2 2ª ETAPA: VERIFICAÇÃO PARA O MODELO FRACIONÁRIO COM AS INFLUÊNCIAS DE TEMPERATURA E PRÉ-CARGA

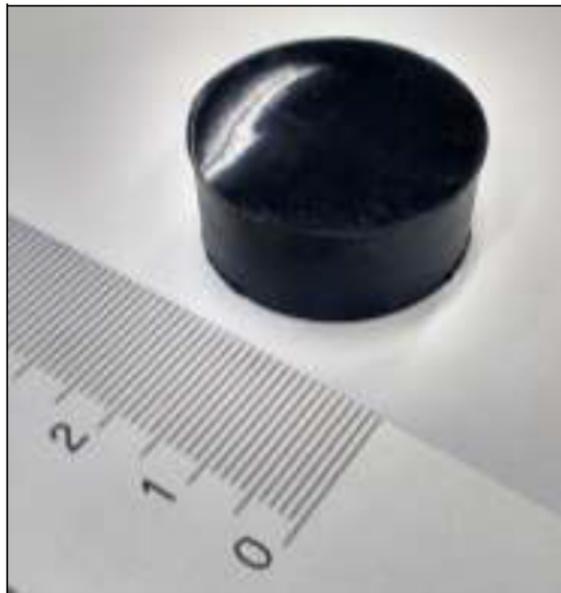
Nesta etapa, é verificado o modelo quanto à descrição do comportamento do material com relação à sua característica termoreologicamente simples e influências dos fatores temperatura e pré-carga para um amplo espectro de frequências. Para tanto, foi utilizado um material real, a borracha butílica, que foi ensaiada em uma máquina MTS 831.50 no Laboratório de Polímeros do SENAI – RS, segundo as recomendações da norma ASTM D5992-96 (Reapproved 2006). As condições de realização dos ensaios podem ser vistas na Tabela 2:

Temperaturas	-50°C; -40°C; -20°C; 0°C; 20°C; 70°C
Modo de deformação	Compressão
Deformações médias <sup>1)</sup>	1%; 3%; 5%; 7%; 10%; 12%; 15%
Amplitude de deformação	±0,01 mm
Frequências de avaliação	1; 3; 5; 7; 9; 10; 12; 14; 16; 18; 20; 25; 30; 35; 40; 45; 50; 55; 60; 70; 80; 90; 100; 120; 140; 160; 180; 200; 250; 300; 350; 400; 450; 500; 550; 600; 700; 800; 900; 1000 Hz

Obs.: 1 - As deformações médias foram tomadas em relação à altura inicial do corpo de prova

**Tabela 2: Condições de Realização dos Ensaios**

O modelo do corpo de prova pode ser visto na Figura 6.



**Figura 6: Corpo de Prova**  
Fonte: Olienick (2018).

Para retratar a condição termorreológica do material, é usado o gráfico Wicket Plot. Este gráfico não considera a variação da pré-carga, sendo, portanto, necessários tantos gráficos quanto valores de pré-carga. A condição esperada e necessária – ser o material termorreologicamente simples – não deve variar com a pré-carga, porém, permite avaliar se há algum problema com dados experimentais. Na seção 3.1 deste artigo, somente um gráfico é suficiente para confirmar a condição termorreológica, no entanto, em condições reais e considerando que o processo é integrado, ou seja, todos os dados experimentais são considerados simultaneamente – é importante que anomalias experimentais não sejam consideradas.

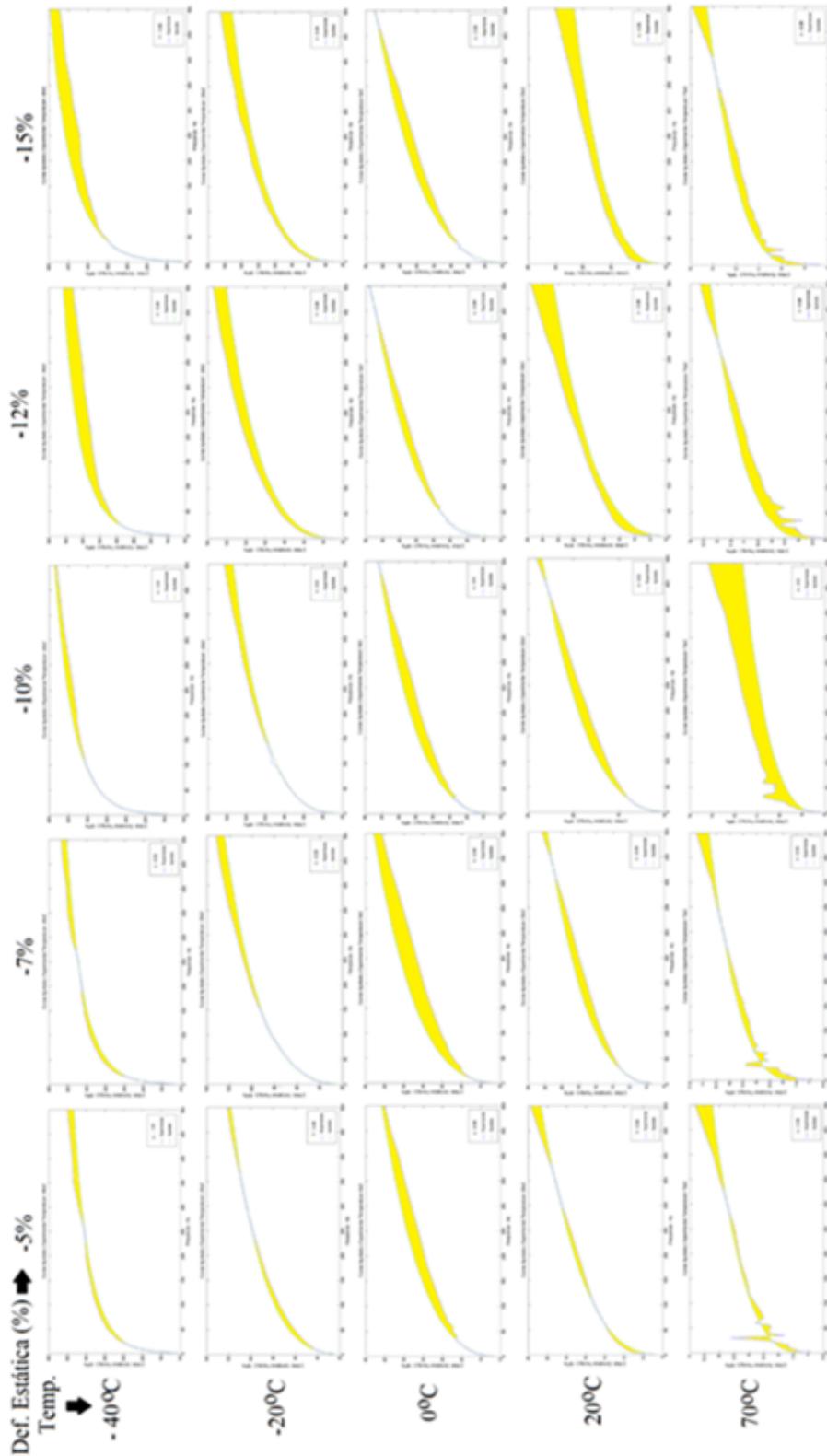
Na prática, nos dados experimentais reais, a condição vista na Figura 4 é difícil de ocorrer, e problemas de dispersão de dados podem estar presentes. Deste modo, neste artigo, foi necessário eliminar alguns resultados, tendo permanecido apenas 5 temperaturas e 5 valores de pré-carga.

Uma visão geral dos resultados pode ser vista na Tabela 3. A Figura 7 fornece uma visão geral dos resultados com relação ao erro no ajuste em comparação com dados experimentais.

$E_L$	$E_H$	$b_0$	$\beta$	$C_3$	$C_4$	$\theta_1$	$\theta_2$	$C_d/C_3$
6,1306E06	4,9657E08	0,0021	0,3166	3,4909E06	-7,6567E06	7,1119	132,71	-2,193

Tabela 3: Resultado da Identificação Integrada

FIGURA 7 -- SÍNTESE DO COMPORTAMENTO ||NORMA DO MÓDULO DE YOUNG COMPLEXO|| X FREQUÊNCIA: TEMPERATURAS E PRÉCARGAS DIVERSAS



Fonte: (Olienick, 2018)

## 4 CONCLUSÕES FINAIS

O método de identificação integrada apresentado é bastante efetivo quando o material cujos parâmetros são identificados pode ser considerado como termoreologicamente simples. Os resultados nas duas análises deste trabalho – do material fictício e do material real – mostram que, mesmo quando o material ou os resultados experimentais fogem ligeiramente ao perfil de material termoreologicamente simples, a metodologia apresentada se mostra bastante robusta, permitindo, assim mesmo, obter resultados bastante promissores. Conclui-se que a metodologia poderá permitir a inserção de novos fatores de influência no comportamento do MVE, com um custo computacional baixo, e que o modelo material adotado, Zener fracionário, também pode ser revisto com a substituição do mesmo por um outro que melhor possa se adaptar ao comportamento do material.

Um dos aspectos interessantes dessa metodologia integrada é a ausência de necessidade de procedimentos auxiliares para a identificação de determinados parâmetros, como o fator de deslocamento, usado na metodologia clássica. Isso permite que fatores de ajuste possam ser integrados de maneira a satisfazer uma identificação mais precisa. Um exemplo disso é a aplicação de um fator de ponderação sobre o erro entre valor estimado e valor experimental. Como o processo de otimização trabalha com a minimização desse erro e há uma grande diferença entre os erros devido ao valor absoluto do módulo complexo de elasticidade variar exponencialmente entre os limites da faixa de transição do material, a aplicação de um fator de ponderação maior permite delimitar uma precisão maior em determinadas regiões de interesse.

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi possível graças ao suporte financeiro do Programa de Recursos Humanos PRH-24 para trabalhos de doutorado e do CNPq por meio das bolsas de produtividade.

## REFERÊNCIAS

- ARIKOGLU A. A new fractional derivative model for linearly viscoelastic materials and parameter identification via genetic algorithms. **Rheological Acta**, v. 53, pp. 219-233, 2014.
- ASTM D5992. Standard Test Method for Measuring Vibration Damping Properties of Materials. ASTM, 1996.
- ASTM E756. Standard Test Method for Measuring Vibration Damping Properties of Materials. ASTM, 1998.
- BAGLEY, R. L. **Applications of generalized derivatives to viscoelasticity**. 1979. Ph.D. (Thesis) – Air Force Institute of Technology, 1979.
- BAGLEY, R. L.; TORVIK, P. J. A generalized derivative model for an elastomer damper. **The Shock and Vibration Bulletin**, v. 49, n. 2, pp. 135-143, 1979.
- BAGLEY, R. L.; TORVIK, P. J. A theoretical basis for the application of fractional calculus to viscoelasticity. **Journal of Rheology**, v. 27, pp. 201-210, 1983a.
- BAGLEY, R. L.; TORVIK, P. J. Fractional calculus – A different approach to the finite element analysis of viscoelastically damped structures. **AIAA Journal**, v. 21, n. 5, pp. 741-748, 1983b.
- BONFIGLIO, P.; POMPOLI, F.; HOROSHENKOV, K. V.; RAHIM, M. I. B. S. A simplified transfer matrix approach for the determination of the complex modulus of viscoelastic materials. **Polymer Testing**, v. 53, pp. 180-187, 2016.
- ESPÍNDOLA, J. J.; SILVA NETO, J. M.; LOPES, E. M. O. A generalized fractional derivative approach to viscoelastic material properties measurement. **Applied Mathematics and Computation**, v. 164, pp. 493-506, 2005.
- FERRY, J. D. **Viscoelastic Properties of Polymers**. New York: John Wiley & Sons, 1980.

- LOPES, E. M. O.; BAVASTRI, C. A.; SILVA NETO, J. M.; ESPÍNDOLA, J. J. Caracterização dinâmica integrada de elastômeros por derivadas generalizadas. In: III CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA. Belém, **Anais...**, 2004.
- MOONEY, M. A theory of large elastic deformations. **Journal of Applied Physics**, v. 11, pp. 582-592, 1940.
- NASHIF, A. D.; JONES, D. I. G.; HENDERSON, J. P. **Vibration Damping**. New York: John Wiley & Sons, 1985.
- NELDER, J. A.; MEAD, R. A simplex method for function minimization. **The Computer Journal**, v. 7, pp. 308-313, 1965.
- OLIENICK FILHO, E. G.; Lopes, E. M. O.; BAVASTRI, C. A. Characterization of viscoelastic materials using the fractional derivative model and considering frequency, temperature and static deformation. Florianópolis: CILAMCE, 2017. Disponível em: <https://ssl4799.websiteseuro.com/swge5/proceedings/PDF/CILAMCE2017-0089.pdf>. Acesso em: 06 dez. 2017.
- OLIENICK FILHO, E. G. Caracterização dinâmica de materiais viscoelásticos termoreologicamente simples em função da temperatura, frequência e pré-carga. 2018. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR.
- PAGNACCO, E.; MOREAU, A.; LEMOSSE, D. Inverse strategies for the identification of elastic and viscoelastic material parameters using full-field measurements. **Materials Science and Engineering A**, v. 452-453, pp. 737-745, 2007.
- RIVLIN, R. S. Large Elastic deformations of isotropic materials IV. Further developments of the general theory. **Phil. Trans. of the Royal Soc. A**, v. 241, n. 835, pp. 379-397, 1948.
- SOUSA, T. L.; KANKE, F.; PEREIRA, J. T.; BAVASTRI, C. A. Property Identification of Viscoelastic Solid Materials in Nomograms Using Optimization Techniques. **Journal of Theoretical and Applied Mechanics**, 2017.
- TORVIK, P. J.; BAGLEY, R. L. On the appearance of the fractional derivative in the behaviour of the real materials. **American Society of Mechanical Engineers Journal of Applied Mechanics**, v. 51, pp. 294-298, 1984.
- XIAO, Z.; HAITIAN, Y.; YIQIAN, H. Identification of constitutive parameters of fractional viscoelasticity. **Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation**, v. 19, pp. 311-322, 2014.
- WILLIS, R. L.; WU, L.; BERTHELOT, Y. H. Determination of Complex Young and shear dynamic moduli of viscoelastic materials. **Journal of the Acoustical Society of America**, v. 109, pp. 611-621, 2001.
- ZOPF, C.; HOQUE, S. E.; KALISKE, M. Comparison of approaches to model viscoelasticity based on frictional time derivatives. **Computational Materials Science**, v. 98, pp. 287-296, 2015.

## **SOBRE OS AUTORES**

### **EDUARDO GREGORIO OLIENIK FILHO**

Possui Graduação em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Paraná (1981) e Mestrado em Engenharia Mecânica e de Materiais pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (2003). O Doutorado foi cursado na Universidade Federal do Paraná, com grau obtido em março de 2018. Tem experiência na área de Engenharia Mecânica, na indústria, nos ramos de projetos e inspeção de equipamentos por meio de ensaios não destrutivos. Em 1996, ingressou na carreira do magistério, como docente, primeiro do Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná (CEFET-PR), depois transformado em Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Atualmente é Professor da carreira de ensino de básico e tecnológico na Universidade Tecnológica Federal do Paraná. [olienick@utfpr.edu.br](mailto:olienick@utfpr.edu.br)

### **CARLOS ALBERTO BAVASTRI**

Possui Doutorado em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil (1997), é Professor do Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) UTFPR e DEMEC (UFPR). Professor da Hochschule für Angewandte Wissenschaften Ingolstadt – University of Applied, Alemanha, Pesquisador com bolsa de produtividade vigente pelo CNPq. [bavastri@ufpr.br](mailto:bavastri@ufpr.br)

# **O BAMBU COMO MATERIAL PARA ENGENHARIA – PRODUTOS, ENSAIOS E MODELAMENTO**

FABIANO OSTAPIV

*Professor de Engenharia Mecânica - Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Pato Branco*

CELSO SALAMON

*Professor de Engenharia Mecânica - Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Curitiba*

## **I INTRODUÇÃO**

Devido a uma série de características, algumas das quais serão discutidas neste trabalho, o bambu é um material alternativo adequado para ser utilizado em diferentes projetos, obras e produtos de engenharia, podendo, em alguns casos, substituir com vantagens o uso de materiais como metais, polímeros e cerâmicas.

Os bambus podem ser utilizados diretamente na forma de colmos ou processados em diferentes tipos de elementos construtivos básicos, como ripas, lâminas, cavacos e pós, com os quais é possível construir uma ampla variedade de produtos tendo como base o material produzido por esta gramínea.

Além de permitir o desenvolvimento de vocações produtivas regionais, o estabelecimento da cadeia produtiva do bambu no Brasil traz oportunidades econômicas e desafios tecnológicos a praticamente todas as áreas da engenharia: agrônômica, florestal, construção civil, mecânica, materiais, produtos, produção, química, alimentos, sanitária, entre outras – existindo muitos desafios nas interfaces entre áreas, como, por exemplo, entre a engenharia mecânica com a área agrícola ou florestal. Como fazer equipamentos seguros, robustos, fáceis de operar e confiáveis para plantar, colher e processar os bambus na floresta?

Nas espécies de grande potencial econômico, praticamente todas as partes da planta podem ser utilizadas economicamente. Os colmos são a parte da planta com maior destaque e visibilidade, pois despertam mais interesse na comunidade em geral. Os colmos de bambu são tubos vegetais segmentados internamente, leves, resistentes, belos e agradáveis ao toque, ou seja: apresentam um conjunto de características que os tornam materiais adequados e confiáveis para uso na engenharia de estruturas e de produtos. Na Figura 1 são mostrados alguns colmos de bambu gigante (*Dendrocalamus asper*) e de bambu cana-da-índia (*Phyllostachys aurea*) armazenados para serem utilizados na construção da estufa agrícola mostrada na Figura 4.



**Figura 1: Colmos de cana-da-índia e bambu gigante. Espécies disponíveis e adequadas para uso estrutural**  
Foto: L. K. Ostapiv (2019).

Assim como as madeiras provenientes de árvores, o material lignocelulósico dos colmos de bambu é estável, de baixa massa específica (300 a 1100 kg/m<sup>3</sup>), apresenta boas propriedades mecânicas e pode ser utilizado como combustível (poder calorífico médio de 4 Mcal/kg).

A “madeira” do bambu normalmente é produzida com baixo consumo de energia, poucos impactos ambientais negativos e muitos positivos. Geralmente seu uso em produtos eleva o grau de sustentabilidade destes produtos. É um material apropriado para diversas aplicações nas engenharias, podendo ser usado para substituir materiais de maior conteúdo energético e impacto ambiental, como os metais e os polímeros derivados de petróleo. A Tabela 1 indica a eficiência do bambu em aproveitar energia para produzir massa.

Material	Energia incorporada (MJ/ kg)	Energia incorporada (MJ/m <sup>3</sup> )
Alumínio	210	567.000
Aço	30	235.500
Fibra de vidro	24	768
Madeira	0,5	300
Bambu	0,2	106

**Tabela 1: Energia incorporada nos materiais construtivos**  
Fonte: Adaptado de Ghavami e Toledo (1992).

Por serem bastante confiáveis, os colmos de bambu são usados há muito tempo pela humanidade, especialmente na construção de habitações e como combustível. Na Figura 2 são mostrados diferentes tipos de carvão de bambu que, além de combustível, é um ótimo material para ser utilizado em filtros, devido à sua capacidade de reter impurezas.



**Figura 2: Carvão de bambu produzido em diferentes tipos de fornos, semicarbonizado, carvão preto e carvão branco produzidos à alta temperatura**  
Fonte: Ostapiv *et al.* (2020).

O Brasil tem a segunda maior biodiversidade de bambus do mundo, mas, apesar de serem facilmente encontrados, são pouco utilizados economicamente. Isso se deve a vários fatores, tais como: ausência de políticas públicas; desconhecimento das espécies, seu uso e potencialidades; falta de técnicas e equipamentos adequados para processamento; desconhecimento das técnicas de construção e de preservação adequadas – são alguns destes os problemas, como relataram Salamon e Ostapiv (2017).

Uma síntese com algumas características das principais espécies econômicas em uso no Brasil pode ser vista na Tabela 2.

Espécies	Valor comercial	Valor rural e industrial	Regenerador ambiental	Clima	Solo	Disponibilidade no Sul do Brasil
<i>Bambusa vulgaris</i>	Baixo	Médio	Alto	Tropical subtropical	Rico a pobre	Alta
<i>Bambusa tuldooides</i>	Médio	Alto	Médio	Tropical subtropical	Rico e médio	Alta
<i>Bambusa tulda</i>	Baixo	Alto	Médio	Tropical subtropical	Rico e médio	Alta
<i>Dendrocalamus sasper</i>	Alto	Alto	Alto	Tropical subtropical	Rico	Média
<i>Guadua angustifolia</i>	Alto	Alto	Alto	Tropical úmido	Rico e médio	Baixa
<i>Phyllostachys aurea</i>	Alto	Alto	Alto	Temperado-subtropical	Rico e médio	Alta
<i>Phyllostachys pubescens</i>	Alto	Alto	Alto	Temperado-subtropical	Rico e médio	Média

**Tabela 2: Principais espécies exóticas e naturalizadas de bambus no Brasil**  
**Fonte: Adaptado de Pereira e Beraldo (2016).**

## 2 USO DE COLMOS DE BAMBU *IN NATURA*

Colmos de bambus lenhosos de várias espécies podem ser usados na construção de diversos tipos de estruturas de engenharia, tais como casas, telhados, pontes, geodésicas, bicicletas, barcos, aviões e automóveis pequenos do tipo Baja, por exemplo, além do uso como tubulação hidráulica e pneumática à baixa pressão.

Para que estas aplicações sejam possíveis, vários desafios tecnológicos precisam ser superados, citando alguns:

- A seleção adequada do material para o uso. Existem muitos fatores a serem considerados, como: a espécie de bambu, grau de maturação do colmo, resistência mecânica, durabilidade, geometria do colmo, presença de defeitos etc.
- A classificação dos colmos por região, base, meio e topo ou por diâmetro e espessura de parede.
- O pré e o pós-tratamento dos colmos.
- As uniões entre os colmos, parafusos, cintas metálicas e poliméricas, concreto, tipos de encaixes, amarração com cordas e arames, uso de buchas e luvas etc.
- A interação do material lignocelulósico com resinas, cimentos, tintas e vernizes.
- Os equipamentos e ferramentas necessários para usinagem interna e externa dos colmos.
- Os testes hidráulicos dos tubos, pressão estática, estanqueidade, perda de carga, durabilidade no solo, durabilidade ao ar livre etc.
- As ações para evitar o fendilhamento dos colmos; programas para secagem dos colmos; revestimento com polímeros e uso de abraçadeiras nas pontas dos colmos.

Apesar das dificuldades iniciais em construir com estes tubos vegetais de geometria não regular, as construções que usam este material tendem a ser: de baixo impacto ambiental, baratas, eficientes,

resistentes, integradas com o meio e rápidas de serem executadas, conforme apresentaram Librelloto e Ostapiv (2019).

Segundo Ghavami e Moreira (1993), devido ao comportamento de deflexão-compressão apresentado, os colmos de bambu lenhosos podem ser considerados colunas de Euler, dentro de alguns limites.

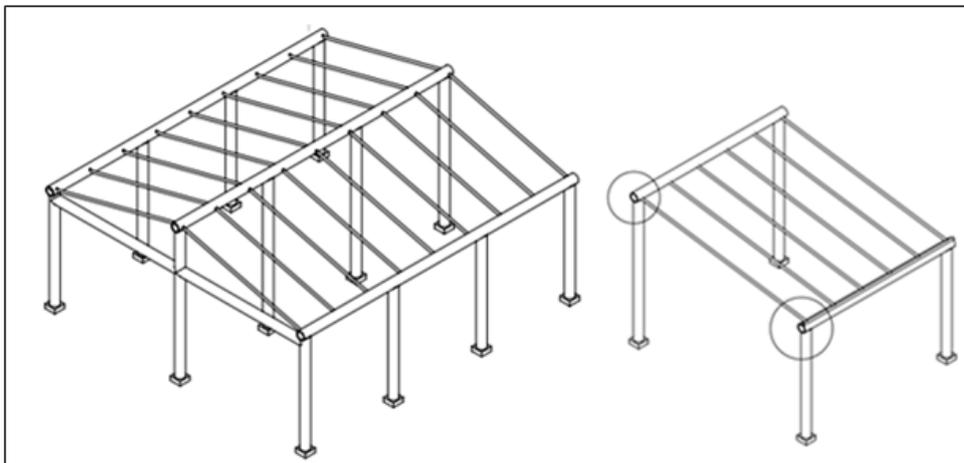
## 2.1 A SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Cada vez mais são utilizados métodos dos elementos finitos (MEF) para análise de problemas estruturais de engenharia, tanto na academia como na indústria. Na maioria das vezes, é impossível a obtenção de soluções analíticas dos complexos problemas estruturais e de transferência de energia existentes na engenharia, daí a importância do uso dos métodos computacionais.

No caso da engenharia de estruturas, o MEF é uma ferramenta altamente eficaz para a obtenção dos campos de deformações e tensões, permitindo a identificação das regiões mais solicitadas das estruturas analisadas. A partir dos resultados da análise numérica, é possível obter um melhor entendimento do comportamento das estruturas, propor e avaliar modificações e soluções alternativas para melhorar o comportamento e reduzir o custo final destas estruturas. Neste capítulo mostra-se a aplicação do MEF em geodésicas, muletas e auxiliares para locomoção de cães, em cujas estruturas foram usados colmos de bambu.

## 2.2 ESTUFAS DE BAMBU

São muitas as possibilidades de construção de habitações onde o bambu, na forma de colmo, ou não, pode ser utilizado em maior ou menor grau. Um caso de especial interesse para proprietários rurais é o uso do bambu para a construção de estufas agrícolas, que podem ter cobertura em arcos ou tradicional, como a mostrada nas Figuras 3 e 4.



**Figura 3: Desenho de uma estufa modular de bambu e detalhe de um módulo**



**Figura 4: Estufa modular de bambu, vista externa e interna em Itapejara do Oeste - PR**

Um dos maiores problemas das estufas agrícolas, especialmente na região Sudoeste do Paraná, é seu comportamento sob a ação dos fortes ventos, que frequentemente assolam a região e rasgam o revestimento das estufas. Este é um tipo de problema onde o uso de metodologias de simulação computacional é muito relevante.

### 2.2.1 ENSAIO E SIMULAÇÃO DE ESTRUTURAS GEODÉSICAS DE BAMBU

Geodésicas são estruturas interessantes. Podem ter uma ou mais camadas reticuladas e serem usadas em diferentes aplicações na engenharia, tais como: coletores de energia, luminárias, habitáculos de veículos, domos e habitações, por exemplo.

Na construção civil, o tempo de montagem das cúpulas geodésicas é considerado muito curto, quando comparado com outras estruturas de dimensões semelhantes. Assim, o uso destas estruturas é indicado para abrigos temporários e de emergência. Também podem ser usadas como formas ou estruturas auxiliares na construção de domos monolíticos de terra ou concretos. Podem, ainda, servir como andaime para deslocamento dos trabalhadores e suporte de materiais usados neste tipo de obra.

No ensaio das geodésicas com carregamentos verticais feito por Ostapiv *et al.* (2018; 2019), os autores concluíram que domos geodésicos de bambu são muito leves e resistentes, pois suportam grandes cargas verticais, com grandes deflexões da estrutura, em relação ao seu peso próprio, sem se romper. Depois de realizarem os ensaios de carregamento e as simulações numéricas para carregamentos verticais, foram localizadas regiões com maiores tensões e possíveis pontos de ruptura da estrutura. Com base nos resultados do MEF, os autores adotaram a alternativa de reforço com o uso de tirantes amarrados na geodésica. Solução simples e efetiva, que pode ser observada na Figura 5B e na Figura 6.

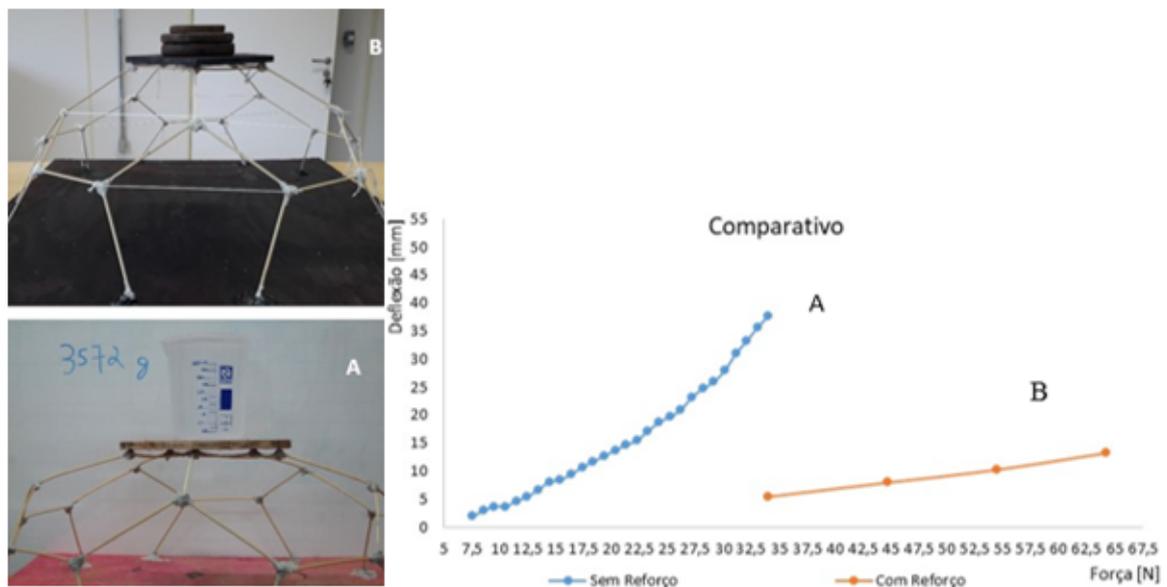
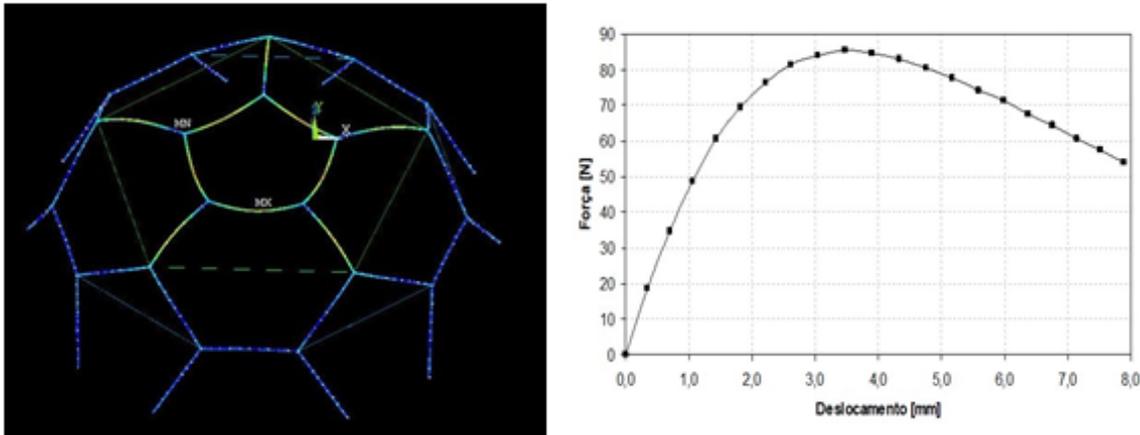


Figura 5: As estruturas com carregamento vertical, (A) sem reforço, (B) com reforço e as respectivas curvas (deflexão x carregamento)

Na Figura 5 também são mostradas as curvas de carregamento e deflexão vertical da parte superior das geodésicas, com e sem reforço de cabos e as imagens destas estruturas, no momento de máxima carga, próximo ao ponto de colapso estrutural.

Na simulação numérica da geodésica de bambu foram usados os seguintes dados de entrada: para as barras maciças de bambu *Phyllostachys pubescens*: módulo de elasticidade (MOE) de 12 GPa, coeficiente de Poisson de 0,26. Para o fio de nylon 6.6 usado como reforço, MOE de 1,25 GPa. O modelo da geodésica foi discretizado com uma malha de 350 elementos de viga e 695 nós. As condições de contorno usadas no modelamento da geodésica foram: deslocamento e rotação nulos para os nós da

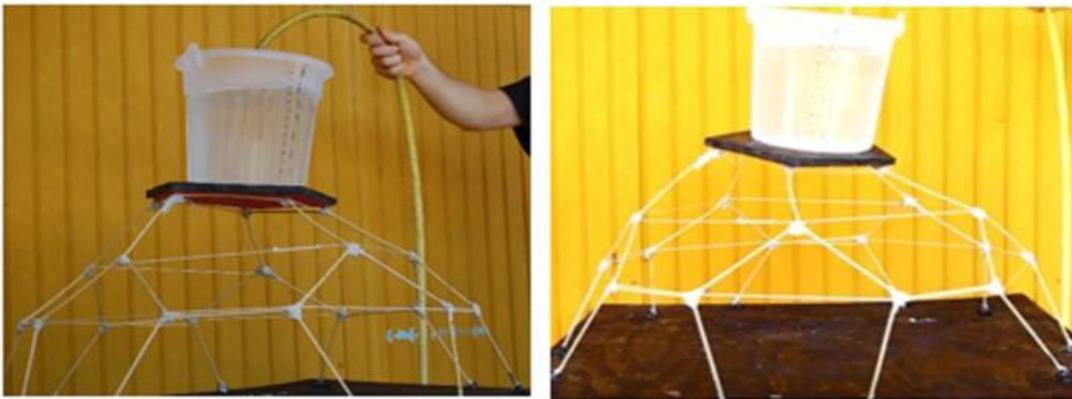
base (condição de engaste) e força vertical definida e distribuída nos cinco nós do plano de topo da estrutura.



**Figura 6: Distribuição de tensões e ponto de colapso elástico da geodésica**

O ensaio de carregamento mostrou que o reforço com tirantes foi eficaz, pois houve um aumento na rigidez e na resistência mecânica final da geodésica de bambu, sem agregar peso significativo ao conjunto. No experimento destrutivo das geodésicas a carga de ruptura foi de 38 N para a geodésica sem reforço; e 72 N para uma estrutura análoga, reforçada com cabos.

Na Figura 7 pode-se observar a geodésica reforçada, instantes antes de ocorrer sua ruptura por carregamento hidráulico vertical. Na mesma figura é possível ver as grandes deflexões que ocorrem nas barras de bambu, especialmente na região superior da geodésica, similar às deflexões previstas pelo modelo computacional mostrado na Figura 6.



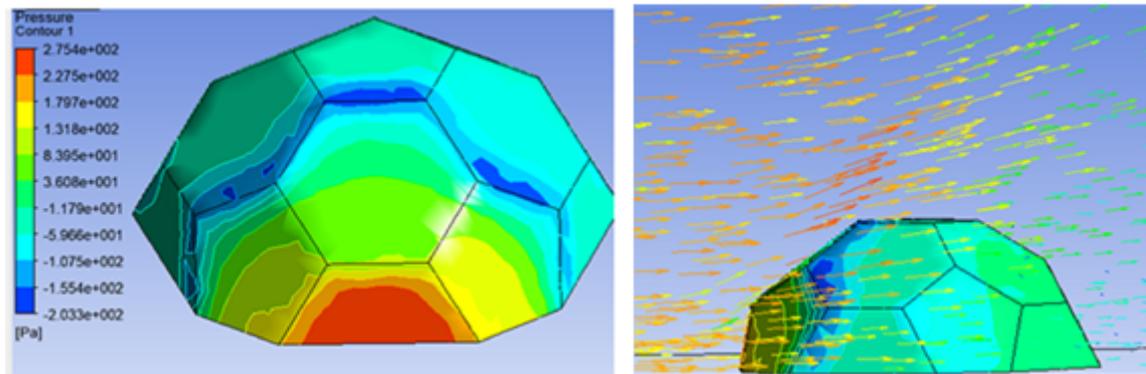
**Figura 7: Geodésicas de bambu com reforço amarrado, próximas do momento de colapso**

Um aspecto importante observado no estudo das geodésicas foi o modo com o qual as estruturas com e sem reforço se deformaram ao carregamento. No caso sem reforço, a partir do carregamento vertical de 25 N, a estrutura apresentou uma taxa elevada de deflexão, mostrando a rápida aproximação do ponto de colapso (*snap through*). Por outro lado, a estrutura reforçada com cabos amarrados de nylon teve um comportamento de deformação praticamente linear, característica desejável para este tipo de estrutura.

### 2.2.2 SIMULAÇÃO DA AÇÃO DO VENTO SOBRE A GEODÉSICA

Outra vantagem do uso das ferramentas de simulação computacional é a possibilidade de ampliar as análises sobre os objetos estudados. Neste caso, além da simulação de carregamento estático, foi avaliada a ação do vento sobre a superfície externa da geodésica. Foi simulado o escoamento de

ar sobre a superfície da geodésica, com velocidade constante de 20 m/s, em condições de pressão atmosférica padrão. O gradiente de pressão dinâmica gerado é mostrado na Figura 8.



**Figura 8: Distribuição de pressão sobre a superfície geodésica causada pelo vento a 20 m/s**

Após incidir frontalmente sobre a geodesica, a trajetória muda e a velocidade de escoamento aumenta, produzindo zonas de baixa pressão e uma força ascendente sobre a superfície, semelhante ao efeito do escoamento de ar sobre uma asa. Pode-se dizer que o vento quer arrancar a geodésica do chão.

Este tipo de análise dinâmica é muito interessante, especialmente para quem busca projetar estruturas leves em locais de vento forte, como é o caso das estufas agrícolas, mas também serve para outros produtos como antenas e coletores solar, por exemplo.

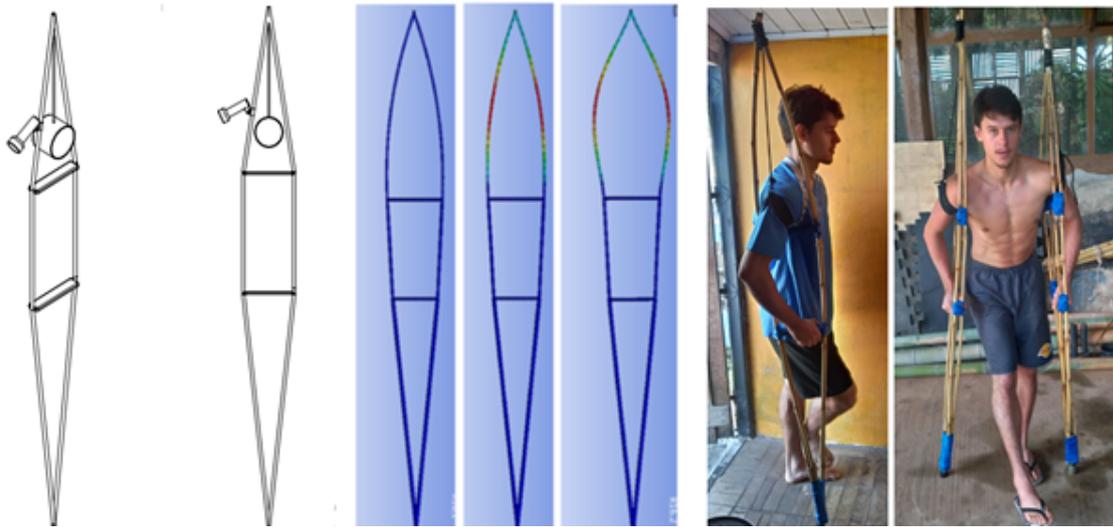
### 2.3 MULETAS DE BAMBU

Muletas são equipamentos essenciais para o auxílio de pessoas que possuem algum tipo de limitação temporária ou permanente na locomoção. No entanto, o uso frequente pode causar diversos tipos de lesões, principalmente nas axilas e nos pulsos dos usuários, devido à pressão causada pela reação dos apoios sobre estas partes do corpo humano.

Foram construídos e testados protótipos de uma muleta de bambu, com formato inovador, chamada de muleta tipo asa. O uso deste tipo de muleta permite diminuir o índice de lesões por uso frequente, bem como ampliar as possibilidades de uso das muletas como elemento fisioterapêutico.

A muleta tipo asa, mostrada na Figura 9, foi projetada, construída, simulada e testada por Ostapiv G. (2020) e mostrou-se mecanicamente resistente, de fácil execução, com baixo custo e funcionalmente eficiente. Por ser mais alta que a cabeça do usuário, o formato de gota permite novas funções de uso, em relação às muletas tradicionais como, por exemplo, suporte para guarda-chuva, lanterna, bolsa de soro ou medicamentos.

Os testes de campo mostraram que a muleta cumpriu o objetivo de diminuir a pressão e o desconforto nas axilas do usuário, devido ao uso dos tirantes elásticos e cintas acolchoadas com Velcro, suportando tranquilamente o peso de uma pessoa de 80 kg, como mostrado na Figura 9.



**Figura 9: Desenho, simulação computacional do modelo e protótipo de muleta alta construída usando bambu**  
**Fonte: Ostapiv (2020).**

Tanto as muletas, como os auxiliares para locomoção de cães, desenvolvidas por Donaduzzi (2019) e mostradas na Figura 10, foram construídas com pedaços de colmos de bambu da espécie *Phyllostachys aurea*, também conhecida como cana-da-índia, provenientes de varas de pesca vendidas comercialmente. O objetivo do uso de varas de pesca para desenvolvimento destes protótipos é permitir a fácil reprodução e a redução do custo produtivo, com o intuito de tornar este tipo de equipamento mais acessível à população de baixa renda.



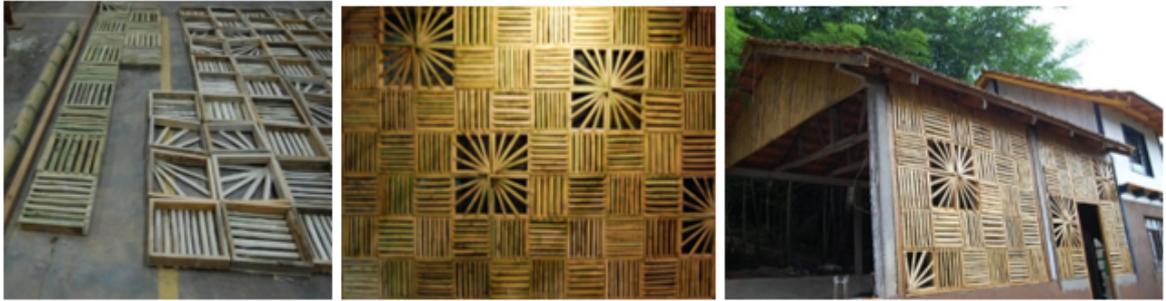
**Figura 10: Auxiliar para locomoção de cães feito em bambu, detalhe do eixo e rodas usado para superar obstáculos no piso e simulação de esforços na estrutura**  
**Fonte: Donaduzzi (2019).**

### 3 USO DE RIPAS DE BAMBU

As ripas de bambu podem ser produzidas manualmente ou com diferentes graus de uso de maquinarias e acessórios. Uma vez produzida as ripas, estas podem ser utilizadas diretamente na construção de deques, paredes, pergolados, cercas ou em produtos como móveis, por exemplo. Na Figura 11 são mostrados exemplos deste tipo de uso de elementos ripados modulares, com os quais é possível construir produtos de grandes dimensões, como paredes e divisórias, mostradas na Figura 12. O maior custo com este tipo de produto semiartesanal é o tempo de mão de obra.



**Figura 11: Deque modular feito com ripas de bambu de forma manual**  
**Fonte: Ostapiv (2018).**



**Figura 12: Painéis e paredes compostos com deques modulares de bambu**  
**Fonte: Ostapiv (2018).**

Outra forma de uso das ripas é a chamada madeira de bambu reconstituída, onde as ripas são unidas por meio de colas e resinas em blocos maciços de maior dimensão, permitindo posteriormente a produção de lâminas para revestimento, pisos, painéis sarrafeados, cabos de ferramentas e mesmo grandes peças estruturais como vigas e colunas em variadas formas.

Nesta classe de produtos o adesivo tem papel fundamental, bem como os equipamentos que geralmente são dispostos em linhas ou células produtivas e apresentam grandes dimensões e capacidade produtiva, além de serem caros e dedicados. Este é o caso, por exemplo, dos equipamentos necessários para a produção de pisos de bambu, estudada por Ostapiv (2007).

#### **4 USO DE LÂMINAS DE BAMBU EM COMPÓSITOS**

Lâminas de bambu como as mostradas na Figura 13 podem ser associadas com os mais diversos tipos de materiais na elaboração dos materiais compostos como os painéis laminados, pranchas de surf e capas para painéis alveolados, por exemplo. Estas lâminas obtidas por torneamento são mais simples de serem obtidas, em relação aos processos ripados, além de poderem ser produzidas com menor gasto de energia e menor custo produtivo, como discutiram Salamon e Ostapiv (2017; 2019).



**Figura 13: Lâminas finas e largas de bambu gigante, obtidas por torneamento**  
**Fonte: Salamon (2009).**

Painéis compostos com lâminas de bambu obtidas por torneamento, como os mostrados na Figura 14, possuem propriedades adequadas para o seu uso em ambientes internos e podem ser usadas na fabricação de móveis e divisórias, por exemplo, podendo substituir o uso de madeira maciça com vantagens (OSTAPIV, 2011).

Uma das principais vantagens do uso das lâminas de bambu em painéis de madeira diz respeito ao revestimento e acabamento superficial e também ao reforço mecânico proporcionado ao conjunto. Como as lâminas de bambu obtidas por torneamento podem ser largas e finas, obtém-se painéis com superfícies contínuas, com pouca ou nenhuma linha de junção colada entre as lâminas.

O usuário não percebe uma descontinuidade na textura e nos desenhos da superfície laminada, o que produz um efeito bastante apreciado. O produto final imita perfeitamente o aspecto de madeira sólida de grandes dimensões, agregando beleza e valor ao produto.

#### 4.1 PAINÉIS CONTRAPLACADOS E SARRAFEADOS



**Figura 14: Painéis sarrafeados de bambu e de eucalipto, revestidos com lâminas de bambu gigante e painel compensado com 3 camadas**

**Fonte: Ostapiv (2011).**

Além do uso como capa de revestimento para os tradicionais painéis compensados, as lâminas de bambu podem ser usadas para o desenvolvimento de produtos inovadores que apresentam alto grau de sustentabilidade ou pequena pegada ambiental. Alguns exemplos de painéis experimentais, desenvolvidos pelos autores nos laboratórios da UNESP no Campus de Itapeva, podem ser vistos na Figura 15.



**Figura 15: Painéis tipo sanduíche, com capa de bambu laminado e miolo de grêmia de pinheiro e de casca de coco. Painel sarrafeado de pinus revestido com lâminas trançadas de bambu do gênero *Merostachys*.**

Ostapiv (2011) revestiu painéis sarrafeados de eucalipto em ambas as faces com lâminas de bambu gigante de 1 mm de espessura, com alinhamento dos feixes de fibras das lâminas de bambu de modo ortogonal às linhas de cola dos sarrafos de eucalipto. Com este arranjo experimental, obteve um aumento significativo na resistência mecânica do painel sarrafeado e uma melhoria no seu comportamento mecânico. Os corpos de prova usados e os resultados obtidos pelo autor são mostrados na Figura 16.

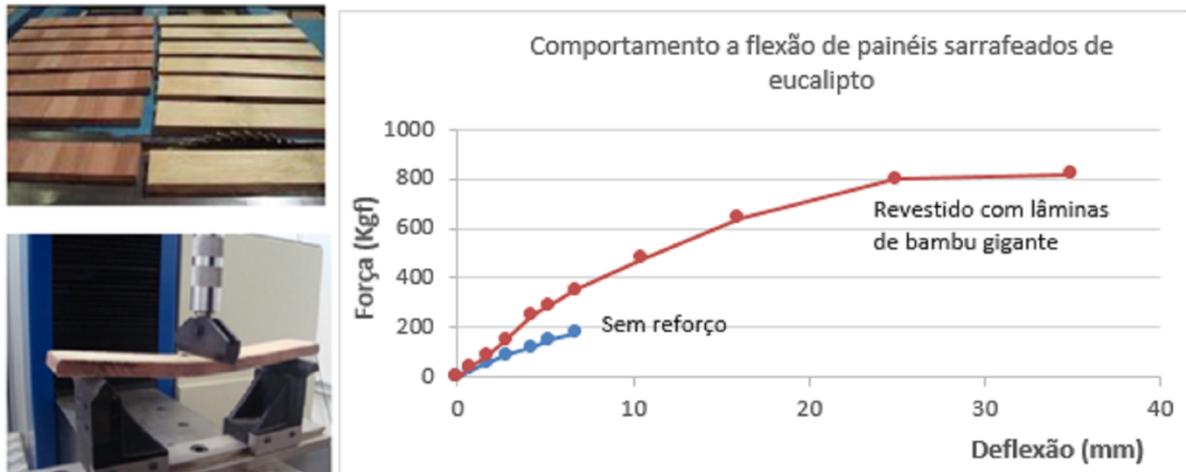


Figura 16: Corpos de prova de painéis de eucalipto sarrafeado revestidos ou não com lâminas de bambu gigante, ensaio de flexão do painel e diagrama de força por deflexão mostrando os resultados

O autor mostrou que o uso de lâminas de bambu pode ampliar as possibilidades de uso para os painéis sarrafeados de madeira. Estes painéis representam uma solução importante para reduzir o desperdício da indústria madeireira, uma vez que os sarrafos são produzidos geralmente com rejeito de madeira serrada ou com reaproveitamento de madeira de pequenas dimensões, tais como os galhos das árvores.

#### 4.2 PRANCHAS DE SURF E SKATE

O uso das lâminas de bambu em produtos é amplo e variado. As lâminas podem ser usadas, por exemplo, para fabricação de painéis, cascos de embarcações, pranchas de surfe e skate. Nas Figuras 17 e 18 são mostrados modelos destas pranchas desenvolvidos pelos autores.



Figura 17: Pranchas de surf de bambu laminado  
Fonte: Salamon e Ostapiv (2011).



**Figura 18: Detalhes das pranchas de skate de bambu ripado laminado por Ostapiv**  
**Fonte; Ostapiv (2020).**

O principal problema na produção das lâminas a partir de bambu ripado é o mesmo da produção de pisos ou de painéis compensados de bambu. A necessidade de investimento em equipamentos e plantas industriais grandes exige muita material-prima, reflorestamento, mudas, suporte de mão de obra especializada, logística etc. No momento, a produção deste tipo de produto é inviável no Brasil, pois são produtos que exigem, além da disponibilidade de material-prima com qualidade, uma cadeia produtiva forte e já estabelecida dentro de um ciclo econômico regional.

Uma alternativa para viabilizar este tipo de produto no Brasil é a adoção de programas de investimento em pesquisa e desenvolvimento de equipamentos e processos para fabricação de painéis de bambu em pequena escala – inicialmente nas universidades e centros de pesquisa e depois em projetos-pilotos com a comunidade empresarial.

## 5 PAINÉIS ALVEOLARES COM NÚCLEO DE BAMBU

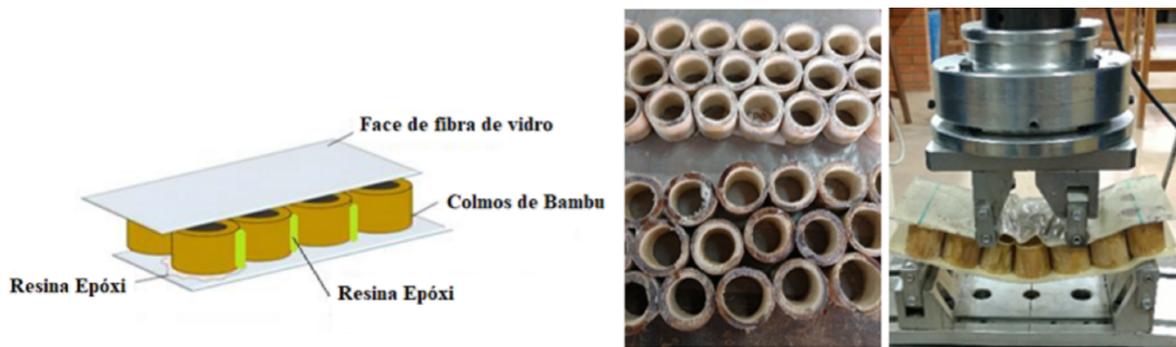
Painel sanduíche com núcleo alveolar é uma classe de material compósito estrutural. É constituído basicamente de um material colchão, ou núcleo que tem geralmente o formato de células hexagonais unidas entre si, semelhantes às células de cera dos favos de mel das colmeias. Tanto o material do núcleo como das capas de revestimento pode ser feito com diversas composições de materiais metálicos, poliméricos e cerâmicos. Daí o nome painel *honeycomb*.

Estes materiais compósitos são muito utilizados na indústria aeronáutica devido às propriedades finais de leveza, resistência mecânica e rigidez apresentada. No entanto, geralmente são muito caros, uma vez que usam materiais refinados, processos de fabricação complexos e energeticamente impactantes, e geram resíduos e produtos obsoletos de difícil reciclagem ou disposição final.

Os painéis de bambu desta classe estrutural se mostraram produtos tecnicamente viáveis, com baixo custo ambiental e consumo de energia primária para produção. Segmentos de colmos de bambu como os mostrados na Figura 19 podem ser utilizados para produção dos núcleos inerciais para este tipo de painel e, por sua vez, podem ser usados na fabricação de muitos produtos como pranchas de skate, por exemplo.

Veríssimo *et al.* (2019) produziram e ensaiaram a compressão e a flexão painéis *honeycomb* com núcleo de segmentos de colmos maduros de bambu da espécie *Bambusa tuldooides* com 20 mm de altura. As capas, de 0,4 mm de espessura, foram produzidas com duas camadas de tecido de fibra de vidro e resina estrutural epóxi.

Os autores concluíram que os painéis *honeycomb* com núcleo de bambu apresentam resistência média à compressão de 14,2 MPa, que estes painéis são bastante rígidos e têm potencial de inovação em diversos setores, como: automotivo, naval, moveleiro, construção civil, entre outros. No setor automotivo, por exemplo, este tipo de painel pode ser usado como para-choques; no naval, como casco ou assoalho de embarcações leves.



**Figura 19: Esquema de composição dos painéis alveolados de bambu com capa de fibra de vidro, segmentos de colmos de *Bambusa tuldooides* e ensaio de flexão do painel**  
**Fonte: Veríssimo et al. (2019).**

## CONCLUSÕES

Os diferentes tipos de estruturas, painéis e produtos à base de bambu mostrados neste trabalho têm enormes potencialidades técnicas e econômicas, elevado grau de inovação tecnológica e de sustentabilidade.

Para que as potencialidades destes produtos experimentais possam de fato se transformar em produtos disponíveis para os mercados consumidores, serão necessárias mais pesquisas e desenvolvimento. Mas somente isso não é suficiente. Além de avançar com os estudos, será necessário organizar agendas e políticas públicas, consolidar as parcerias das universidades com o setor produtivo e fazer os investimentos, público e privado, necessários para o desenvolvimento sustentado da cadeia produtiva do bambu – que poderá, então, trazer riqueza e desenvolvimento para o país.

## REFERÊNCIAS

- BERNDSSEN, R. S.; KLITZKE, R. J.; BATISTA, D. C.; NASCIMENTO, E. M.; OSTAPIV, F. Resistência à flexão estática e à compressão paralela do bambu-mossô (*Phyllostachys pubescens*). **Floresta**, Curitiba, v. 43, n. 3, p. 485-494, jul.-set. 2013. Disponível em: <<https://revistas.ufpr.br/floresta/article/view/29319>>.
- BERNDSSEN, R. S.; KLITZKE, R. J.; BATISTA, D. C.; NASCIMENTO, E. M.; OSTAPIV, F. Mechanical resistance of moso bamboo (*Phyllostachys pubescens*) Part 2: Axial tensile strength, hardness and wear resistance. **Floresta**, Curitiba, v. 44, n. 3, pp. 505-514, jul.-set. 2014. Disponível em: <<https://revistas.ufpr.br/floresta/article/view/33311>>.
- BERNDSSEN, R. S.; KLITZKE, R. J.; BATISTA, D. C.; NASCIMENTO, E. M.; OSTAPIV, F. Propriedades físicas do bambu-mossô (*Phyllostachys pubescens* Mazelex H. de Lehaie) em diferentes idades e posições do colmo. **Floresta**, Curitiba, v. 40, n. 1, p. 183-192, jan.-mar. 2010. Disponível em: <<https://revistas.ufpr.br/floresta/article/view/17109>>.
- CASTRO, G. C. **Ensaio e simulação computacional de estrutura geodésica tipo icosaedro truncado construída com barras de bambu**. 2019. 93f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – UTFPR, Câmpus Pato Branco, Pato Branco, 2019.
- COOK, R. D.; MALKUS, D. S.; PLESHA, M. E. **Concepts and Applications of Finite Element Analysis**. 3. ed. Madison: John Wileyand Sons Ltda., 1988.
- DINIZ, F. R. H. **Muleta híbrida de baixo custo**. 2017. F65. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2017. Disponível em: <[http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/9271/1/PB\\_DAMEC\\_2017\\_2\\_29.pdf](http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/9271/1/PB_DAMEC_2017_2_29.pdf)>.
- DONADUZZI, L. **Projeto, montagem e simulação numérica de um auxiliador de locomoção para cães**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2019.

GHAVAMI, K.; TOLEDO F. R. D. Desenvolvimento de Materiais de Construção de Baixo Consumo de Energia Usando Fibras Naturais, Terra e Bambu. **Revista Engenharia Agrícola**, Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, v. 2, p. 1-19, 1992.

GHAVAMI, K.; MOREIRA, L. E. **Double-layer bamboo space structures**: Space Structures. 4. ed. Thomas Telford Ltda., 1993. pp. 573-581. 1993.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos materiais**. 5. ed. New York: Pearson-Prentice Hall, 2010.

LIBRELLOTO, L. I.; OSTAPIV, F. (Orgs.). **Bambu – Caminhos para o desenvolvimento sustentável no Brasil**. 1. ed. Florianópolis: Virtuhab, 2019. 204p. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/197060>>.

NETO, F. L. **Caracterização de propriedades físicas e mecânicas da espécie de bambu *Phyllostachys aurea* da região de Pato Branco**. 2017. 96p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2017. Disponível em: <<http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/8604>>.

OSTAPIV, F. **Análise e melhoria do processo produtivo de tábuas de bambu *Phyllostachys pubescens* com foco em pisos**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica e Materiais) – PPGEM, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2007. Disponível em: <<https://www.yumpu.com/pt/document/view/34822891/ostapiv-fabianopdf-ppgem-utfpr>>.

OSTAPIV, F. **Resistência mecânica do material compósito: madeira de eucalipto-lâmina de bambu**. 2011. 143f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011. Disponível em: <[https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/103757/ostapiv\\_f\\_dr\\_guara.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/103757/ostapiv_f_dr_guara.pdf?sequence=1&isAllowed=y)>.

OSTAPIV, F. Produção e uso de materiais compósitos bambu-PET na construção civil popular. In: DRUMOND, P. M.; WIEDMAN, G. **Bambus no Brasil, da Biologia à Tecnologia**. 1. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA; ICH-Instituto Ciência Hoje, 2017. p. 494-510. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1078373/bambus-no-brasil-da-biologia-a-tecnologia>>.

OSTAPIV, F. O bambu como material de engenharia; produtos, processos, ensaios e modelamento. **Projeto de Extensão 234/2018**. UTFPR – Campus Pato Branco. Pró-Reitoria de Relações Empresariais e Comunitárias, Diretoria de Extensão, 2018.

OSTAPIV, F. **Os principais bambus no Brasil**. In: LIBRELLOTO, L. I.; OSTAPIV, F. (Orgs.). **Bambu – Caminhos para o desenvolvimento sustentável no Brasil**. 1. ed. Florianópolis: Virtuhab, 2019. p. 13-28. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/197060>>.

OSTAPIV, F.; FAGUNDES, E. Perspectivas para o desenvolvimento da Cultura e da Cadeia Produtiva do bambu no Paraná: tendo como referência a inovação, a educação tecnológica e o modelo produtivo chinês. **Revista Athena**, Curitiba, v. 9, 2008. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/282663084\\_Perspectivas\\_para\\_o\\_desenvolvimento\\_da\\_cultura\\_e\\_da\\_cadeia\\_produtiva\\_do\\_bambu\\_no\\_Parana\\_Tendo\\_como\\_referencia\\_a\\_inovacao\\_a\\_educacao\\_tecnologica\\_e\\_o\\_modelo\\_produtivo\\_chines](https://www.researchgate.net/publication/282663084_Perspectivas_para_o_desenvolvimento_da_cultura_e_da_cadeia_produtiva_do_bambu_no_Parana_Tendo_como_referencia_a_inovacao_a_educacao_tecnologica_e_o_modelo_produtivo_chines)>.

OSTAPIV, F.; SALAMON, C.; GONÇALVES, M. T. T. Cursos Tecnológicos de bambu *Guadua* no Acre – Perspectivas sustentáveis e inovadoras. **Revista Athena**, Curitiba, v. 10, 2008.

OSTAPIV, F.; SALAMON, C.; GONÇALVES, M. T. T.; CORTEZ-BARBOSA, J.; ALVES, M. C. S. Madeira de bambu como um Compósito Natural Funcionalmente Graduado (FGM), propriedades de lâminas torneadas de *Phyllostachys pubescens*. In: XII ENCONTRO BRASILEIRO DE MADEIRAS E ESTRUTURAS EM MADEIRA – EBRAMEM, **Anais...** Lavras MG, julho 2010.

OSTAPIV, F.; SALAMON, C. **Produção e uso de deques modulares de bambu e Madeira. MIX Sustentável**, Florianópolis, v. 5, n. 1, p. 43-51, 2019. Disponível em: <<http://ojs.sites.ufsc.br/index.php/mixsustentavel/article/view/2863>>.

OSTAPIV, F.; SALAMON, C. Guia para construção de cúpulas geodésicas de bambu amarradas. **Manual Técnico**. Florianópolis: UFSC-VIRTUHAB, 2018. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/186638>>.

OSTAPIV, F.; SALAMON, C.; STAHLSCHEMIDT, J.; BETT, C. F. Estudos iniciais para ensaios e construção de cúpulas geodésicas usando colmos de bambu. **MIX Sustentável**, Florianópolis, UFSC, v. 4, n. 1, p. 108-116, 2018. Disponível em: <<http://ojs.sites.ufsc.br/index.php/mixsustentavel/article/view/3867>>.

- OSTAPIV, F.; OSTAPIV, J. P. S. Características biológicas dos bambus. In: LIBRELOTTO, L. I.; OSTAPIV, F. (Orgs.). **Bambu – Caminhos para o desenvolvimento sustentável no Brasil**. 1. ed. Florianópolis: Virtuhab, 2019. p. 29-42. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/197060>>.
- OSTAPIV, F.; OSTAPIV, J. P. S. Insetos e pragas que atacam os bambus In: LIBRELOTTO, L. I.; OSTAPIV, F. (Orgs.). **Bambu – Caminhos para o desenvolvimento sustentável no Brasil**. 1. ed. Florianópolis: Virtuhab, 2019. p. 71-80. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/197060>>.
- OSTAPIV, F.; OSTAPIV, G.; CASTRO, G. C.; STAHLSCHEMIDT, J. Computational simulation and vertical loading tests in bamboo geodesic domes. In: 25<sup>th</sup> INTERNATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING – ABCM, **Anais...** Uberlândia, MG, out. 2019.
- OSTAPIV, F.; OSTAPIV, G.; CASTRO, G. C.; STAHLSCHEMIDT, J. Simulação e avaliação experimental de estruturas geodésicas de bambu reforçadas com cabos. In: ENSUS 2020 – VIII ENCONTRO DE SUSTENTABILIDADE EM PROJETO – UNISUL, **Anais...** Palhoça, 12 a 14 de maio de 2020.
- OSTAPIV, F. G.; CASTRO, G. C.; STAHLSCHEMIDT, J.; OSTAPIV, G. Simulação e avaliação experimental de estruturas geodésicas de bambu reforçadas com cabos. **MIX Sustentável**, Florianópolis, UFSC, v. 6, n. 3, p. 71-82, 2020. ISBN 10.29183/2447-3073. Disponível em: <<http://ojs.sites.ufsc.br/index.php/mixsustentavel/article/view/3867>>.
- OSTAPIV, G.; OSTAPIV, F. Projeto e simulação de muleta de bambu tipo asa. **Mix Sustentável**, Florianópolis, UFSC, v. 6, n. 3, 2020. Disponível em: <[https://issuu.com/revistamixsustentavel/docs/mix\\_18\\_\\_1\\_\\_v6\\_\\_n2](https://issuu.com/revistamixsustentavel/docs/mix_18__1__v6__n2)>.
- PEREIRA, M. A. R.; BERALDO, A. L. **Bambu de corpo e alma**. 2. ed. Bauru: Canal 6, 2016. 348p.
- SALAMON, C.; OSTAPIV, F. Planificação de Colmos de Bambu para Produção de Painéis. **Mix Sustentável**, Florianópolis, UFSC, v. 3, n. 1, p. 73-83. UFSC, 2017. Disponível em: <<http://ojs.sites.ufsc.br/index.php/mixsustentavel/article/view/3867>>.
- SALAMON, C.; OSTAPIV, F. Processo de manufatura para o bambu. In: LIBRELOTTO, L. I.; OSTAPIV, F. (Orgs.). **Bambu – Caminhos para o desenvolvimento sustentável no Brasil**. 1. ed. Florianópolis: Virtuhab, 2019. p. 127-150. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/197060>>.
- SALAMON, C. **Ensaio para viabilizar a laminação do bambu *Dendrocalamus giganteus* em operações de torneamento sem centros**. 2009. 114p. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2009. Disponível em: <[https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/103741/salamon\\_c\\_dr\\_guara.pdf?sequence=1](https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/103741/salamon_c_dr_guara.pdf?sequence=1)>.
- SALCIDO, J. C.; RAHEEM, A. A.; RAVI, S. Comparison of embodied energy and environmental impact of alternative materials used in reticulated dome construction. **The International Journal of Building Science and its Applications**, Elsevier, pp. 22-34. 2016.
- VASATA, A. C. D. P.; NOVAK P. R.; OSTAPIV, F. Study of Compressive Stress Mechanical Property of Bamboo of the *Bambusa tuldooides* Species. In: 25<sup>th</sup> INTERNATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING – ABCM, **Anais...** Uberlândia, MG, out. 2019.
- VASATA, A. C. D. P. **Análise das propriedades estáticas e dinâmicas das espécies de bambu *Bambusa tuldooides* e *Phyllostachys aurea***. 2020. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade tecnológica Federal do Paraná, Campus Pato Branco, Pato Branco, 2020.
- VERÍSSIMO, W. B.; RANZAN, G. C.; PRESTES, S.; MEDEIROS, B. B.; OSTAPIV, F. Characterization of Bamboo's Honeycomb Panel with castor resin and fiberglass faces. In: 25<sup>th</sup> INTERNATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING – ABCM, **Anais...** Uberlândia, MG, out. 2019.
- VERÍSSIMO, W. B.; RANZAN, G. C.; PRESTES, S.; MEDEIROS, B. B.; OSTAPIV, F. Caracterização de painel tipo honeycomb de bambu sob compressão. In: XXIV SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA – SICITE – UTFPR, Pato Branco, PR, nov. 2019.
- VERÍSSIMO, W. B.; RANZAN, G. C.; PRESTES, S.; MEDEIROS, B. B.; OSTAPIV, F. Processo de fabricação e análise de absorção de energia em um compósito de bambu com faces de fibra de vidro. In: XXIV SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA – SICITE – UTFPR, Pato Branco, PR, nov. 2019.
- VERÍSSIMO, W. B.; RUIZ, P. F.; FRIZON, F.; OLIVEIRA, P. S.; MEDEIROS, B. B.; OSTAPIV, F. Absorção de impacto em painéis honeycomb de bambu. In: JASPER, M. (Org.). **Fontes de Biomassa e Potenciais de usos 2**. Ponta Grossa: Atena, 2020. Disponível em: <<https://www.atenaeditora.com.br/post-artigo/36319>>.

## **SOBRE OS AUTORES**

**FABIANO OSTAPIV**, Prof. Dr.

Atualmente é chefe do Departamento Acadêmico de Mecânica da UTFPR Campus de Pato Branco. Fez aperfeiçoamento na China (CBRC, 2006), mestrado (PPGEM-UTFPR-CT, 2007) e doutorado (UNESP-FEG, 2011) em Engenharia Mecânica, estudando o mundo do bambu.

**CELSO SALAMON**, Prof. Dr.

Professor Titular de Engenharia Mecânica da UTFPR-Campus Curitiba, responsável pelas disciplinas e laboratórios de hidráulica e pneumática. Tem doutorado (UNESP-FEG, 2009) em Engenharia Mecânica, estudando métodos e equipamentos para processamento seguro e eficiente do bambu.

# **VIRTUAL REALITY AND AUGMENTED REALITY: A PRACTICAL APPROACH OF TOPICS RELATED TO ENGINEERING**

FELIPE BARRETO CAMPELO CRUZ

*Professor of Mechanical Engineering Course - UTFPR - Campus Ponta Grossa, PR*

## **1. INTRODUCTION**

This work aims to explore the practical and operational side of the topic in question. This has been the subject of previous works, Cruz (2019), where a theoretical approach was made. It is hoped, with this complementary work, to enable the user to implement the techniques of Virtual Reality (VR) and Augmented Reality (AR) for now discussed in topics related to engineering.

In this work, an effort was made, especially in the scope of engineering disciplines that require a spatial view of objects or clarity regarding the kinematic and dynamic behaviors of a system in motion.

It all started with a pre-selection of disciplines where it was found that, among the contents taught, there were some that had images that were difficult to interpret and that, with the aid of AR techniques, could eventually have this difficulty remedied, in addition to generating an improvement in student learning. Among the disciplines analyzed, technical design and mechanisms stood out, as they require the student, respectively, the ability to interpret solids through their two-dimensional views, as well as to interpret and obtain three-dimensional drawings, and the ability to analyze originally dynamic systems, but that are being represented by printed (static) figures.

In the sequence, software for the development of AR was sought that would allow easy modeling and be available for any user to implement.

## **2. METHODOLOGY**

For this work, it is necessary that some files and programs are already available for their execution. The following are some of those programs that were selected based on their compatibility with Unity, which will be our AR development software. They are: Maya, 3D Studio, 3D Studio Max, Cheetah3D, Cinema 4D, Blender, Modo, Autodesk, Carrara, Lightwave, XSI 5, SketchUp Pro, Wings 3D, Wavefront, Drawing Interchange Files.

The electronic address (hiperlink) for obtaining Unity is listed in Table 1. It will also be necessary the Artoolkit library (HITLAB, 2020) for Unity, which can be downloaded through another electronic address (hiperlink) also shown in Table 1. After downloading the software and the mentioned files, these must be extracted inside separate folders as they will be used in the implementation phase. From the file formats accepted by Unity, the selection of the computerized drawing software that the user is most familiar with is made. In the present work, Solid Edge ST8 software, educational version<sup>1</sup> (SOLIDEDGE ST8, 2020) was used. It is worth mentioning that Solid Edge is not directly compatible with Unity, however the models built from it can be exported first to 3D Studio Max, educational

---

<sup>1</sup> Solid Edge ST8 – Code: 9765C8E0DB10

version<sup>2</sup> (3D STUDIO MAX, 2020) and later to Unity. 3D Studio Max will also be used in a second stage of the work with the purpose of animating the generated models. For this purpose, Microsoft Visual Studio 2015 software is also used, responsible for creating the scripts for this animation process.

Table 1, described below, previously referenced, lists the programs and files that were used in the present work, accompanied by their respective electronic addresses (hiperlinks). It is recommended to install the programs in the order shown in the table. It is sufficient to install the standard tools for each software.

**Table 1 - List of programs and files used in the present work**

(UNITY PERSONAL, 2020)	<a href="https://store.unity.com/pt/download?ref=personal">https://store.unity.com/pt/download?ref=personal</a>
(GETTING STARTED WITH ARTOOLKIT + UNITY PLUGIN (OPEN SOURCE AR), 2020)	<a href="http://www.arreverie.com/blogs/getting-started-with-artoolkit-unity-plugin/">http://www.arreverie.com/blogs/getting-started-with-artoolkit-unity-plugin/</a>
(3D STUDIO MAX, 2020)	<a href="https://www.autodesk.com/education/free-software/3ds-max">https://www.autodesk.com/education/free-software/3ds-max</a>
(VISUAL STUDIO, 2020)	<a href="https://www.visualstudio.com/pt-br/vs/whatsnew/">https://www.visualstudio.com/pt-br/vs/whatsnew/</a>

### 3. KNOWING THE UNITY

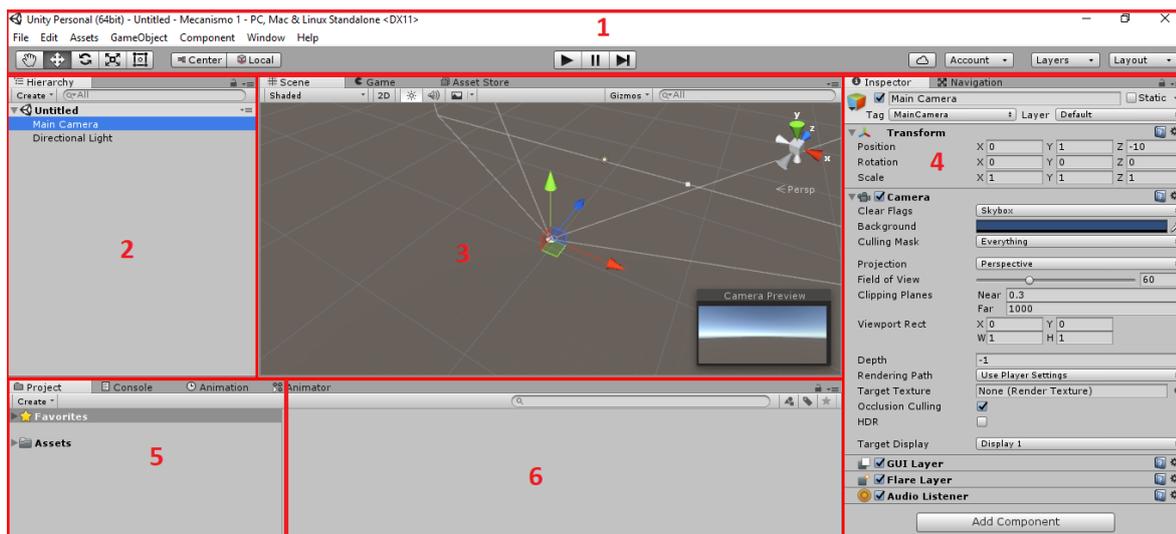
Unity is a software for developing programs, applications and games for various platforms (UNITY, 2020). For the present work, it will be used as a base program, due to the several resources that it has and that facilitate the programming and the visualization of the stages of the creation of the programs.

The basic operation of Unity for AR implementation will be presented below, starting with its layout and tools.

For its installation, start the downloaded executable. It is a download wizard that will download and install the program files, remembering that, during the installation, just install the basic packages.

Once installed and started, the program will open an initial screen for selecting recent projects. However, when starting for the first time, this list appears empty.

To create a new project, click on the “New” button and then select the “3D” option. An initial work screen will be opened, shown in Figure 1, which, in the present text, appears divided into frames for better guidance as to the steps to be described next.



**Figure 1 - Unity initial work screen**

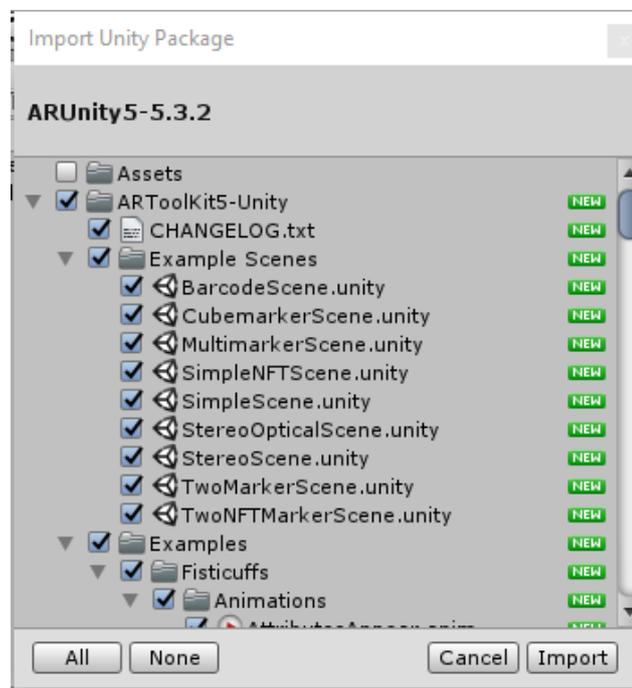
In this screen it is possible to identify six fields (frames): the 1st frame is the “menu” of tools, the 2nd frame is the field reserved for the “scenes” of the program and the “scene objects”. These will be

2 3D Studio Max – Product Key: 128|1 – Serial Number: 900-79022419

the elements that will compose the program, which will be able to present more than one scene with its respective objects. For a better understanding, imagine any program that has a window that serves as an input “menu” and there are buttons that give access to other windows. Each one of those windows would be a scene of the program. The 3rd frame provides a preview of what is being created, allowing the user to interact with the elements of the program. The 4th frame is where the properties and settings of each object in the scene will appear. The 5th frame is a directory that indicates the location of the folders containing the libraries that will be imported according to the user’s needs. Finally, the 6th frame shows the files contained within each of these folders located in the previous frame.

#### 4. STARTING BASIC IMPLEMENTATION

After running Unity and creating a new project, with the initial screen already open, the next step would be to import the Artoolkit library into Unity. To do this, just click on the “Assets” tab, located in the “menu” of the 1st frame, and then go to “Import Package/Custom Package”. This action will open the search window (Figure 2) for the user to locate the file downloaded from Artoolkit. Make sure that all files are selected and click “Import”.



**Figure 2 - Search/import window for Unity**

Note that the files will appear in the 4th frame. Open the “Assets” folder and then “ARToolKit5-Unity\Example Scenes”. That done, some files will appear in the 5th frame. These files are examples of scenes, already pre-configured, ready for the user to test the AR.

To assist in understanding how this software works, these sample scenes will initially be used as a first application. Later it will be learned how to build a scene from scratch.

Now looking at the 2nd frame, there is a bold name: “Untitled”. This is the default opening scene. Whenever a new project is created, this scene is created automatically. There are two objects in it: “Main Camera”, which is the main camera responsible for showing the program, and “Directional Light”, which is the light source.

Among the available sample scenes, it will be chosen to open the “SimpleScene”. With this, the scene “Untitled” changes its name to “SimpleScene”, in which new objects will appear. In the 3rd frame a red cube will appear. If it does not appear, double click on the “cube” object located in “Scene root\Marker scene” in the 2nd frame.

If this example scene is implemented, the user will already be able to interact with the AR using a pre-existing marker called HIRO, available in the Artoolkit library. In this case, having the marker in question via print, just click on the “play” button located in the center of the 1st frame. Once this is done, the camera configuration window will open. Click “ok” in both windows that appear making the image of the camera appear. Now placing the marker in the camera’s field of view, a red cube, identical to the one shown in the 3rd frame, will appear on top of the marker.

It is important that, after finishing any test, we must always click on the “play” again to stop the test, otherwise any changes made later will be lost.

## 5. MARKERS

The tracking system used in the present work, compares the position of a reference element with the position of the camera used, allowing the computerized image to be viewed superimposed on that reference element. Such a reference element is called a marker (KATO; BILLINGHURST, 1999).

ARToolkit has a tracking system that uses squares type markers. They have a pattern for their making and must be made on white cards, containing images in the center that identify them, surrounded by black frames with dimensions that respect a pre-established proportionality, as will be seen in the next sections.

### 5.1. CHANGING THE MARKER

To change the marker, click on the “Artoolkit” scene object present in the 2nd frame, according to Figure 3:

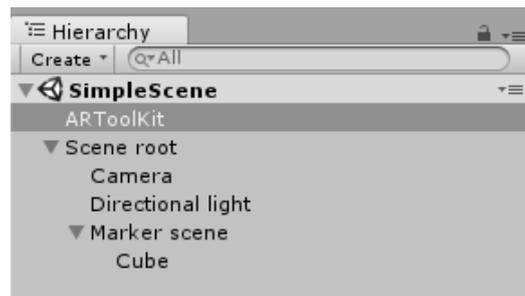


Figure 3 - Change of marker

In its properties, presented in the 6th frame, a tab called “ARMarker (Script)” is displayed, where the option “Pattern file” is found. In it will appear all the markers created. At first, only two markers, “patt.hiro” and “patt.kanji”, will appear available. To change the marker, just select the desired one from those that appear in the list.

The files for these markers can be found inside the “markers” folder in the 5th frame, as shown in Figure 4.

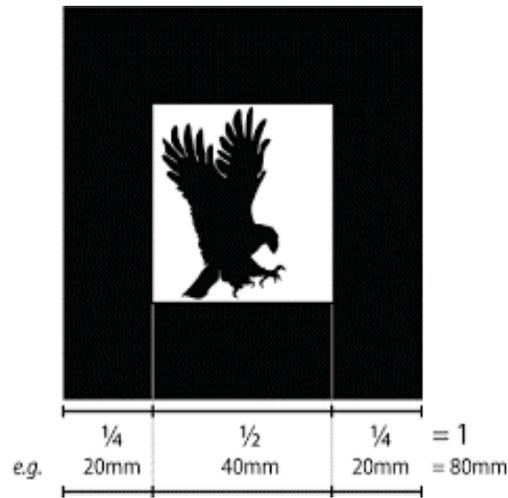


Figure 4 - Folder containing the files for each marker

The files referring to new markers that are created, must also be placed in this folder.

## 5.2. CREATING NEW MARKERS

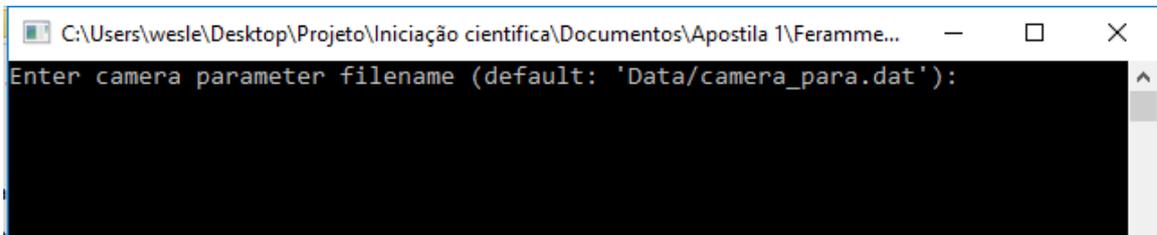
To create a new marker, it's necessary to draw it with the aid of some basic drawing software, such as Paint on the Windows platform. It consists of an image that identifies it, placed in the center of a white card, surrounded by black frames with dimensions that respect the proportionality shown in Figure 5.



**Figure 5 - Square marker model**

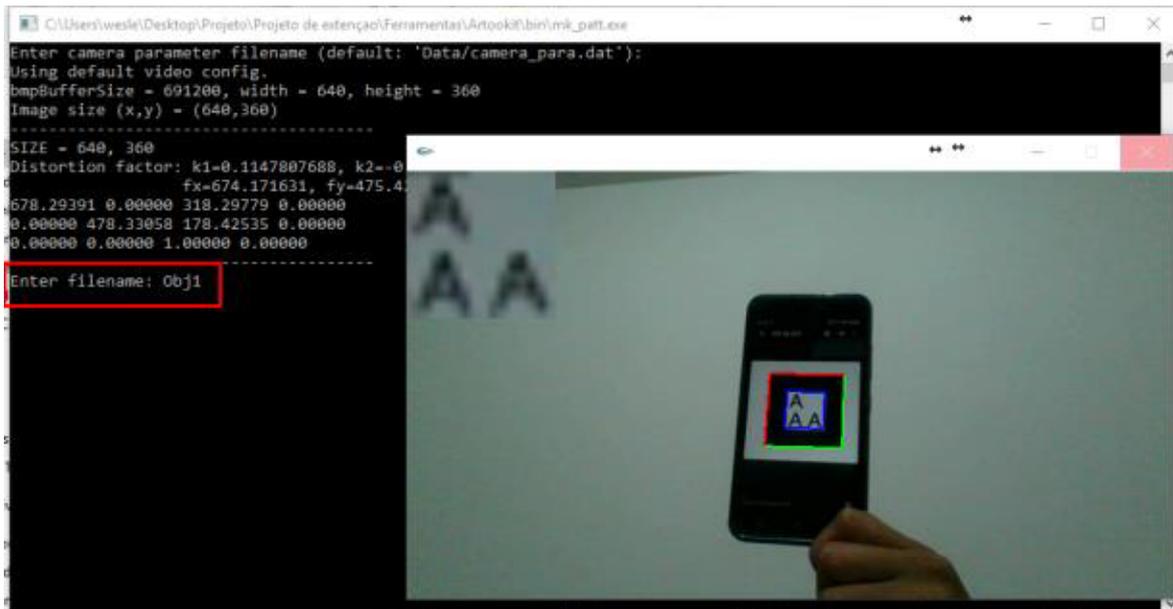
Once created, this marker must be printed so that it can be tested and properly configured. For this, the tool “mk\_patt” is used, which can be found in the “bin” folder of the files extracted from the Artoolkit tools package for Unity.

Running “mk\_patt”, the following command window will open (Figure 6):



**Figure 6 - “mk\_patt” command window**

Clicking “Enter” will open the camera’s configuration window. Selecting “ok” in both windows that appear, activates the camera image. At this point, just place the printed marker image in the camera’s field of view and the window will show a preview of the read image in the upper left corner, as shown in Figure 7. When this image appears, click on it with the mouse, capturing it. The command window will ask for a name to save the file. Name it and press “Enter”. It is important to note that this name cannot contain special characters such as “ç”, “~” or similar. Repeat the process again for as many markers necessary.



**Figure 7 - marker preview window**

At the end of this process, a file will be created in the “bin” folder for each marker with the selected names. Open one of these files using the notepad and a set of numbers will appear. Save this file as text as follows: “patt. <Desired name>”. Finally, just drag this file into the Unity “markers” folder, mentioned above. Clicking again on the scene object “Artoolkit”, it appears that in the option “Pattern file”, also mentioned above, it is already possible to see that the created marker or markers are appearing in the list.

### 5.3. MULTIPLE OBJECTS AND MARKERS

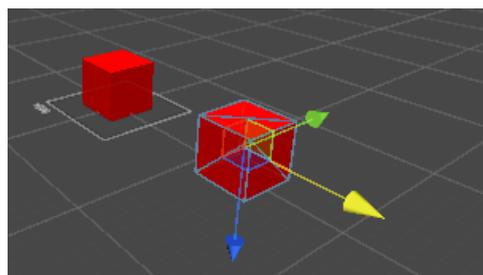
Analyzing the “SimpleScene” in the 2nd frame, the presence of an object called “Marker scene” is verified. This is the object of the marker to which the 3D model of interest is linked, as well as a “script” called “AR Tracked Object (Script)” that defines the marker associated with it.

Duplicating the “Marker scene” object, creating the “Marker scene (1)”, will cause the models to overlap. This problem can be overcome by using the dragging tool (Figure 8), located in the 1st frame.



**Figure 8 - Drag tool**

In the preview screen (3rd frame), the presence of three vectors superimposed on the model associated with the selected object is verified, vectors indicative of the three spatial directions. When one of those vectors is selected, while the drag tool is active, the model will move in the respective direction, thus eliminating that unwanted model overlay effect (Figure 9).



**Figure 9 - Preview screen containing two models positioned properly**

That done, it is necessary to link to the scene object “Artoolkit” a new script “ARMarker” for each new object created. This can be achieved by opening the “Scripts” folder in the 5th frame. There will be several scripts among which will be the “ARMarkers” associated with the objects of interest. Drag them over the “Artoolkit” scene object. When clicking on “Artoolkit” now, it will be seen in its properties that there are more than one “ARMarker” script, one for each model. To link one of them to a specific model, it is enough that the “Marker tag” field is filled with a name that can be associated with the marker to be used, as can be seen in Figure 10. It is noteworthy that this name cannot present special characters.



**Figure 10 - Linking the “ARMarker” script with a specific marker**

Finally, select one of the existing markers, “Marker scene” or “Marker scene (1)”, and in the “Marker tag” field, place the same name that has just been defined for the marker. If the “Got marker” field shows “yes”, as shown in Figure 11, it is because the proposed nomenclature worked.



**Figure 11 - Confirmation of link between object and marker**

Repeat this process as many times as necessary, depending on the number of models wanted for each scene.

## 6. IMPORTING MODELS

Now that it is possible to create scenes, multiply the number of markers and create new markers, it will be seen how to import the models wanted for each scene.

To import a model, it must already be, as previously mentioned, in one of the formats accepted by Unity. Therefore, there are two options: to acquire a ready model from the internet already in one of the compatible formats or to perform the modeling on your own, checking if the modeling software employed can save the model in a compatible format and, if not, find a second software that can read the model created and convert it.

In the present work, Solid Edge ST8 was used to draw the models and, for its conversion, the 3D Studio Max, which also serves as modeling software. If the user has experience with the latest software, it is possible to create the model directly through it, without the need to use other software for conversion.

Once the model drawing is completed on Solid Edge ST8, it must be saved in the “.jt” format and then imported into 3D Studio Max to be converted to the “.FBX” format.

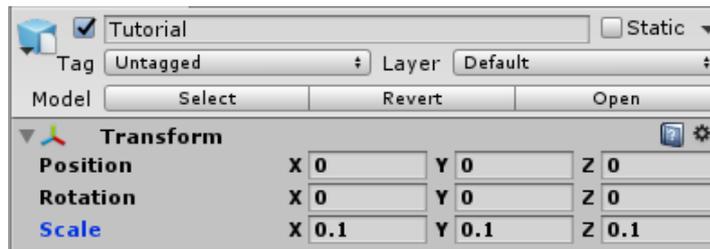
In Unity, it must be created a “models” folder to organize the generated models. This objective is achieved by clicking with the right mouse button on the 4th frame and selecting the option “create/folder”.

Within this folder “models”, in turn, another folder named “model1” is created, which must be opened in a Windows window. To do this, click with the right mouse button on it and select the option “Show in Explorer”. Once this is done, drag the saved model file into it and then return to Unity, which will load it, allowing it to be used in the scene.

Then, drag this imported file into the “Marker scene” object created earlier.

After completing these steps, the model will appear on the preview screen and, in most cases, will show proportions greater than those of the red cube (standard reference model). The scale of its size must then be reduced. This can be done by clicking on the model’s scene object. In its properties, in the 4th frame (Figure 12), the “Transform” tab will appear, which will present three of its parameters

with their respective coordinates: “Position”, “Rotation” and “Scale”. The “Scale” parameter must then undergo a proportional reduction in its coordinates in order to reach the desired size for the model, which in this case would be the size of the red cube.



**Figure 12 - Model properties**

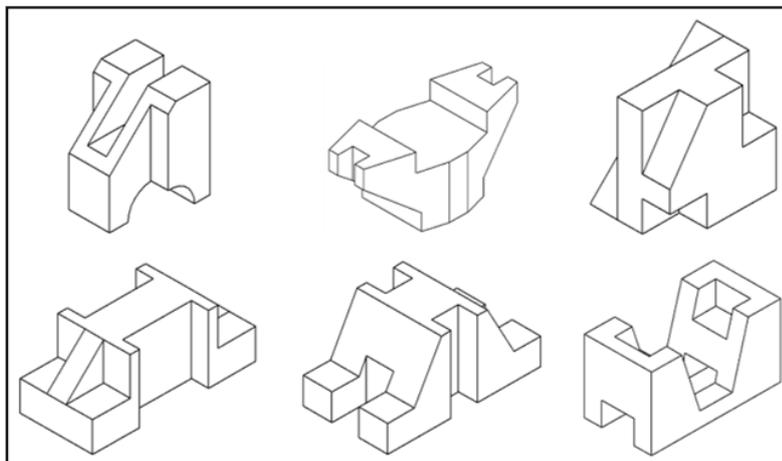
The “Layer” field, which also appears in Figure 12, must have its filling changed from “Default” to “AR background”. Once this is done, the “cube” scene object can be deleted and the scene can be tested with the new model.

With the information provided in this work, it is already possible to create an AR program with “n” objects and “n” distinct markers.

## 7. RESULTS AND DISCUSSION

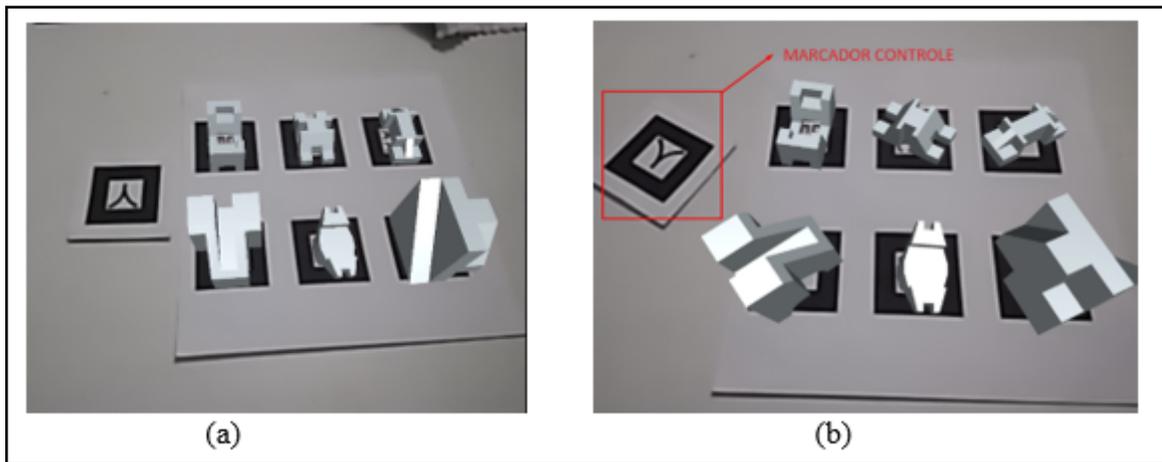
In order to verify the effectiveness of the technique on static objects, we chose to use 6 models of solids presenting geometries with a certain degree of complexity, as shown in Figure 13. Such models were obtained from Speck and Peixoto (2007). The modeling of these solids, as previously mentioned, was done using the SolidEdge ST8 software.

After the modeling phase, we moved on to the implementation phase of these objects in the Unity software.



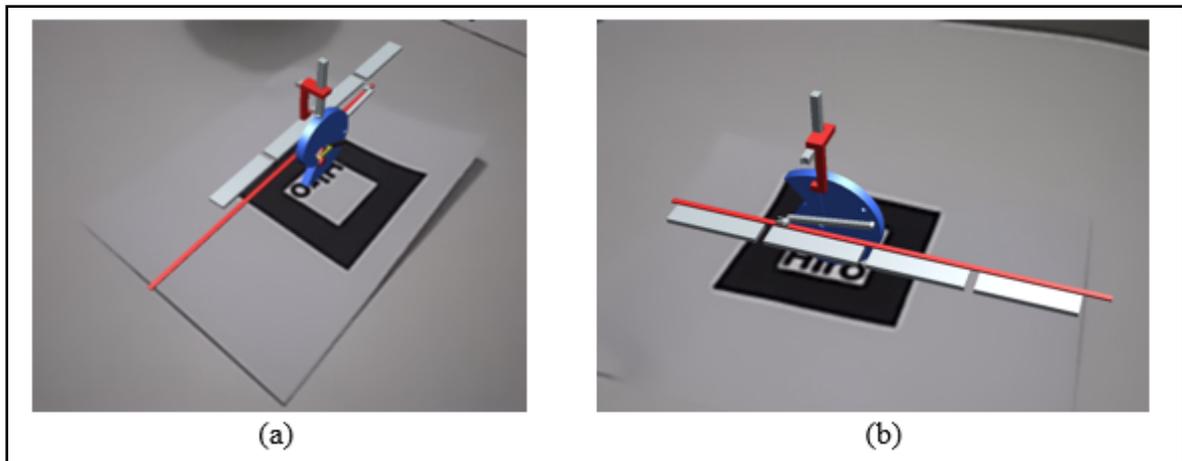
**Figure 13 - Models for implementation (CRUZ, 2019)**

In Figure 14, shown below, it is possible to see the application of AR in the proposed solid models, which appear superimposed on their respective markers.



**Figure 14 - Solid models implemented in AR (CRUZ, 2019)**

In Figure 15, in turn, the result obtained with the application of this technique in a mechanism is exposed. Such a mechanism consists of a set of interconnected rigid elements with relative and complementary movements.



**Figure 15 - Model of the mechanism implemented in AR (CRUZ, 2019)**

It is worth mentioning that the program was compiled into executables that allow the user to work both on the Windows platform and on the Android platform.

## 8. CONCLUSION

With the realization of this work, it was concluded that VR and AR technologies are much more accessible to any user, since many of the tools to be used have free and open source versions.

Furthermore, as illustrated, it is evident that its use in some academic disciplines ends up improving the way of teaching, making classes more didactic, dynamic and participatory.

Finally, based on the results obtained, it is proposed to continue this work, with the expansion and application of these techniques to other disciplines, in addition to making didactic and interactive books that can be used in engineering courses.

## REFERENCES

ARTOOLKIT. Available at: <<http://www.arreverie.com/blogs/getting-started-with-artoolkit-unity-plugin/>>. Accessed on 15 set. 2020.

CRUZ, F. B. C. Realidade Virtual e Realidade Aumentada: Estudo dirigido para a solução e apresentação de problemas relacionados à Engenharia. *In*: MARTINS, F.; JAVAREZ JUNIOR, L.; VILLANOVA, R. L. **A Engenharia Mecânica na UTFPR**. Ponta Grossa: Texto e Contexto, 2019. v. 1. p. 56-65.

HITLAB (HUMAN INTERFACE TECHNOLOGY LABORATORY). ARToolkit: history. Available at: <<https://www.hitl.washington.edu/artoolkit/documentation/history.htm>>. Accessed on 15 set. 2020.

KATO, H.; BILLINGHURST, M. Marker tracking and HMD calibration for a video-based augmented reality conferencing system. *Augmented Reality, 1999. (IWAR '99) Proceedings ... São Francisco, 2ND IEEE AND ACM INTERNATIONAL WORKSHOP, San Francisco, CA, 1999*, pp. 85-94.

SOLIDEDGE ST8. Available at: <<https://www.plm.automation.siemens.com/en/products/solid-edge/>>. Accessed on 15 set. 2020.

SPECK, H. J.; PEIXOTO, V. V. **Manual básico de desenho técnico**. 4ª. ed., Florianópolis, UFSC, 2007.

UNITY. Available at: <<https://unity3d.com/pt>>. Accessed on 15 set. 2020.

UNITY PERSONAL. Available at: <<https://store.unity.com/pt/download?ref=personal>>. Accessed on 15 set. 2020.

VISUAL STUDIO. Available at: <<https://www.visualstudio.com/pt-br/vs/whatsnew/>>. Accessed on 15 set. 2020.

3D STUDIO MAX. Available at: <<https://www.autodesk.com/education/free-software/3ds-max>>. Accessed on 15 set. 2020.

## AUTHOR'S BIBLIOGRAPHY

**FELIPE BARRETO CAMPELO CRUZ** holds a doctoral degree in Mechanical Engineering from UFSC - Federal University of Santa Catarina (2004 - 2010), a master's degree in Mechanical Engineering from UFSC (2001 - 2003), a graduation in Mechanical Engineering from UFC - Federal University of Ceará (1996 - 2000) and a Technologist Course in Mechatronics / Mechanics to be concluded by IFCE - Federal Institute of Education, Science and Technology of Ceará (2000 - Current). He worked as a substitute professor in Representation Methods (Technical Drawing and Descriptive Geometry) at UFSC from March 2009 to December 2010. He is currently an effective professor, associate class 1, with exclusive dedication, in the Mechanical Engineering course at the Federal Technological University of Paraná (UTFPR), Campus Ponta Grossa. Has experience in Mechanical Engineering, with emphasis on Mechanical Systems Design, Hydraulic and Pneumatic Systems, Mathematical Modeling, Control, Automation and Robotics.

Address to access this CV: <http://lattes.cnpq.br/8630348977498378>

# **ANÁLISE DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DA LIGA WASPALOY SUBMETIDA A TRATAMENTO TÉRMICO DE ENVELHECIMENTO POR MEIO DE ENSAIO DE CORRENTES PARASITAS**

GUILHERME HENRIQUE MOLINARI LOPES  
*UTFPR – Campus Ponta Grossa - PR*

SANDRA MARA KAMINSKI TRAMONTIN  
*UTFPR – Campus Ponta Grossa - PR*

ANDERSON GERALDO MARENDA PUKASIEWICZ  
*UTFPR – Campus Ponta Grossa - PR*

## **I INTRODUÇÃO**

É muito comum, nos dias de hoje, encontrar pesquisas cujo foco são formas alternativas de se produzir energia, desligando o tradicional modo de se gerar energia elétrica. Contando com as novas tecnologias existentes, as empresas vêm desenvolvendo técnicas que as tornem autossuficientes, ou seja, uma maneira eficiente de se gerar energia elétrica, reutilizando processos ou produtos por elas desenvolvidos.

Empresas que possuem, como alguns dos produtos, gases provenientes do refino de petróleo, acabam por reutilizar esses gases na produção de energia elétrica para a planta. Esses gases, depois de alguns processos, são encaminhados para uma turbina, que pode gerar assim parte da energia elétrica a ser consumida.

Um fato importante é que esses gases carregam elementos corrosivos que danificam as peças da turbina, podendo gerar graves problemas para todo o sistema. Além disso, pequenas partículas provenientes dos filtros podem atingir as palhetas e discos da turbina, contribuindo para o seu desgaste.

Para minimizar os problemas, superligas de níquel, com excelente resistência térmica e boas propriedades quando submetidas a ambientes em condições severas, são empregadas em elementos importantes das turbinas, aumentando as horas de trabalho empregadas para a geração de energia.

A liga Waspaloy é uma superliga de níquel policristalina, resistente a elevadas temperaturas, conferindo excelente desempenho nas partes quentes de um gerador movido a gás.

O tratamento térmico de envelhecimento faz parte do processamento da liga Waspaloy para que esta atinja a estabilidade térmica e as propriedades mecânicas adequadas para aplicação a elevadas temperaturas.

O poder energético que o calor tem sobre a microestrutura do material altera, dentre tantas propriedades, a forma como o material se comporta quanto a sua dureza e sua resistência ao desgaste.

Para verificação das vantagens de se utilizar a superliga, as peças são geralmente ensaiadas por métodos destrutivos, ou seja, há a retirada de uma amostra da peça que, posteriormente, será tratada e avaliada, sendo que a mesma não poderá reintegrar o corpo de onde foi retirada.

Uma alternativa ao ensaio destrutivo é o ensaio não destrutivo, atualmente pouco aplicado neste tipo de processo. Acredita-se que, pelo tipo de utilização, o ensaio não destrutivo por correntes parasitas,

ou correntes de Foucault, pode auxiliar na análise de desgaste e variações microestruturais da peça, tanto em detrimento de sua velocidade de diagnóstico, como em sua simplicidade de procedimento.

O método de ensaio não destrutivo por correntes parasitas utiliza uma bobina que gera um campo na região a ser ensaiada. Esse campo é revisado instantaneamente pelo equipamento e, caso constatada uma irregularidade no sinal recebido, há a indicação do local da descontinuidade da peça.

O ensaio não destrutivo por correntes parasitas pode se enquadrar como uma metodologia coadjuvante na análise da mudança microestrutural por tratamento térmico, por meio do estudo das variações de condutividade elétrica em relação às possíveis mudanças microestruturais geradas, devido às condições de trabalho em altas temperaturas. Com este método, mesmo que qualitativo, têm-se uma resposta mais rápida e simples de verificação e análise, podendo ser realizado em campo, no conjunto ainda montado.

Esta pesquisa tem como objetivo verificar a aplicabilidade do ensaio de correntes parasitas na caracterização das variações microestruturais da superliga Waspaloy submetida ao ciclo de tratamento térmico de envelhecimento.

## 1.1 TURBINAS PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

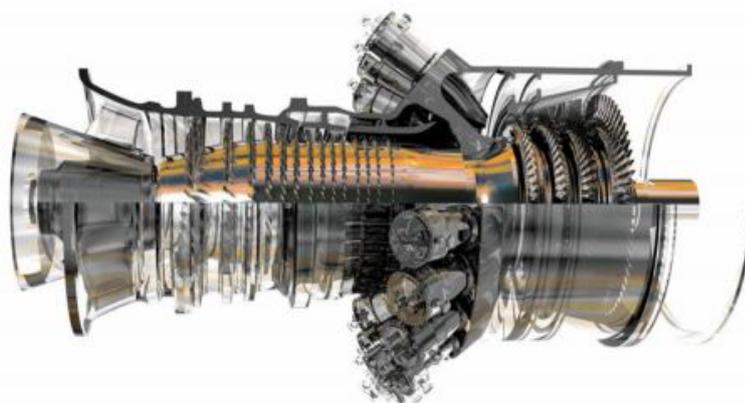
Muitos equipamentos, nos dias atuais, possuem, como principal fundamento, o movimento de fluidos. Dentre uma gama de produtos existentes no mercado, as turbinas se destacam por sua versatilidade. Desde a geração de energia até a propulsão de aviões, as turbinas vêm sendo requisitadas há anos.

Com tantas aplicações, há de se estudar este equipamento. Peng (2008) subdividiu as turbinas entre aquelas movidas a gás, a vapor, eólicas e hidráulicas.

Define-se a turbina como sendo o equipamento gerador de trabalho em um eixo por meio de energia cinética e térmica de um fluido – gás, vapor, ar e água (PENG, 2008).

## 1.2 TURBINAS A GÁS

Pode-se observar um esquema básico de uma turbina a gás na figura 1. Na turbina, o ar retirado do ambiente é sugado pelas pás do rotor e encaminhado por uma sequência de novos rotores de diâmetros gradativamente menores, aumentando a pressão do fluido. Em seguida, o ar comprimido é impelido à câmara de combustão, onde recebe a adição de fluido combustível. O gás quente expande na turbina, gerando rotação para o eixo. A mistura que resultou da ignição do ar comprimido com o combustível é lançada para um conjunto menor de rotores que possuem seus diâmetros maiores ao longo do comprimento, diminuindo pressão e temperatura para darem propulsão ao sistema (FRANKLIN, 2018).



**Figura 1: Sistema de uma turbina a gás em corte**  
**Fonte: Freire Neto (2018).**

As palhetas das turbinas estão aplicadas em um ambiente de condições adversas, visto que a alta temperatura e a corrosividade do resultado da combustão são altos, além do alto dano causado pelo oxigênio ao metal (GENTIL, 1982).

Como a temperatura age em uma seção muito pequena da palheta, é importante trabalhar com metais que possuam propriedades físicas e mecânicas adequadas à elevada temperatura (GODOY, 1996).

Godoy (1996) demonstra que os metais mais utilizados nestes componentes são resultados de ligas baseadas em níquel e cobalto, por manterem suas propriedades em trabalhos mesmo em elevadas temperaturas.

### 1.3 SUPERLIGAS DE NÍQUEL

Roger Reed (2006) enumera três características principais que uma liga resistente à alta temperatura deve ter. A primeira é a de que o material deve estar apto a trabalhar próximo da temperatura de fusão. Teoricamente, para que se considere a temperatura como temperatura alta de operação, a razão entre temperatura de operação e temperatura de fusão ( $T_{\text{operação}}/T_{\text{fusão}}$ ) tem que ser maior ou superior a 0,6. A segunda característica trata da capacidade do material a resistir mecanicamente por um longo período de tempo de trabalho. Como é impossível, na prática, considerar que os elementos de uma turbina a gás não sofram deformação, o autor apresenta como ideal taxas reduzidas de deformação acumulada. A terceira característica apontada é a tolerância do sistema em operar em condições ambientais severas. O combustível é queimado pouco antes de chegar na turbina. Os gases de combustão, produzidos durante a queima do combustível, possuem elementos químicos altamente corrosivos, além das impurezas do ar, que atingem as palhetas da turbina mecanicamente.

Existem alguns motivos, segundo Reed (2006), que tornam as superligas de níquel mais vantajosas que as outras, quando utilizadas em processos de altas temperaturas. O primeiro deles considera a estrutura cristalina. O níquel, dentre os metais de transição, faz parte de uma gama de elementos que tem a sua estrutura apresentada como Cúbica de Face Centrada, que confere uma alta taxa de energia de ativação de normalização e baixa difusividade no ponto de fusão. Essas características tornam o níquel mais resistente e dúctil, devido a ligações fortes entre os elétrons externos. Tal elemento é estável até o ponto de fusão, o que impede o aparecimento de uma fase conhecida como fase de transformação, onde o metal sofre expansão e contração, o que é indesejado quando se trabalha em altas temperaturas. Como já descrito, o trabalho com altas temperaturas requer uma deformação pequena. Metais com baixa difusividade apresentam baixas taxas de deformação em detrimento da temperatura, o que, mais uma vez, eleva o potencial das superligas de níquel. Como é de se esperar, a aplicação depende de custos. Se compararmos as superligas de níquel com as de outros materiais, veremos que apenas as de cobalto são tão aplicáveis quanto. Fato é que existem ligas de cobalto aplicadas em sistemas de alta temperatura, no entanto, o custo destas é alto, o que retorna às ligas de níquel a preferência.

Outra propriedade que influencia na microestrutura das superligas em geral é a presença de mais de uma fase. As fases são formações microestruturais que correspondem à solubilização do material (REED, 2006).

A fase correspondente à base do material, também chamada de matriz, é a fase  $\gamma$ . Aqui, a predominância do elemento níquel aumenta a solubilidade da fase. Quando se adicionam outros elementos na solução sólida, há um travamento das discordâncias, conferindo maior resistência e criando a fase  $\gamma'$ . Por consequência do alto ponto de fusão dos elementos adicionados, há uma considerável mudança na resistência da matriz em altas temperaturas (GEDDES et al., 2010).

Essa junção de elementos da fase  $\gamma'$  é intermetálica, ou seja, possui uma distribuição estequiométrica definida e fica precipitada na matriz, resultando em excelente estabilidade (REED, 2006). As superligas ainda contam com a fase  $\gamma''$ , que é uma fase metaestável, isto é, uma fase que pode perder a estabilidade em baixas temperaturas, mas confere excelentes resultados quando a temperatura passa dos 700 °C, graças à iteração que ela faz com os defeitos cristalinos (REED, 2006).

## 1.4 LIGA WASPALOY

Das superligas de Níquel, o Waspaloy foi desenvolvido para trabalhar em altas temperaturas em turbinas a gás. Mais precisamente, a utilização desta superliga é encontrada em discos de turbinas, servindo como base para as palhetas do equipamento e nas próprias palhetas. Sua estrutura policristalina não é tão boa se comparada a outras, com relação à deformação acumulada, porém tem como vantagem um comportamento mais estável, atingindo temperaturas da ordem de 800 °C (REED, 2006).

A Tabela 1 apresenta dados de composição de algumas superligas de níquel, para efeito de comparação.

**Tabela 1: Composição de elementos comuns na superliga (%)**

Superliga	Cr	Co	Mo	W	Nb	Al	Ti	Ta	Fe	C	B	Zr
Astroloy	15,0	17,0	5,3	---	---	4,0	3,5	---	---	0,06	0,030	---
Hastelloy S	15,5	---	14,5	---	---	0,3	---	---	1,0	---	0,009	---
Incoloy 905	---	13,0	---	---	4,7	0,03	1,5	---	42,0	0,01	---	---
Inconel 740	25,0	20,0	0,5	---	2,0	0,9	1,8	---	0,7	0,03	---	---
Waspaloy	19,5	13,5	4,3	---	---	1,3	3,0	---	---	0,08	0,006	---

**Fonte: Adaptado de Reed (2006).**

## 1.5 ENSAIOS MECÂNICOS NÃO DESTRUTIVOS

Os métodos de ensaios não destrutivos (END) estão entre as principais ferramentas de controle da qualidade nas mais variadas áreas de aplicação. Eles possuem como objetivo principal a melhoria de bens e serviços, reduzindo custos e preservando os equipamentos e o meio ambiente em que estes estão inseridos (ABENDI, 2017).

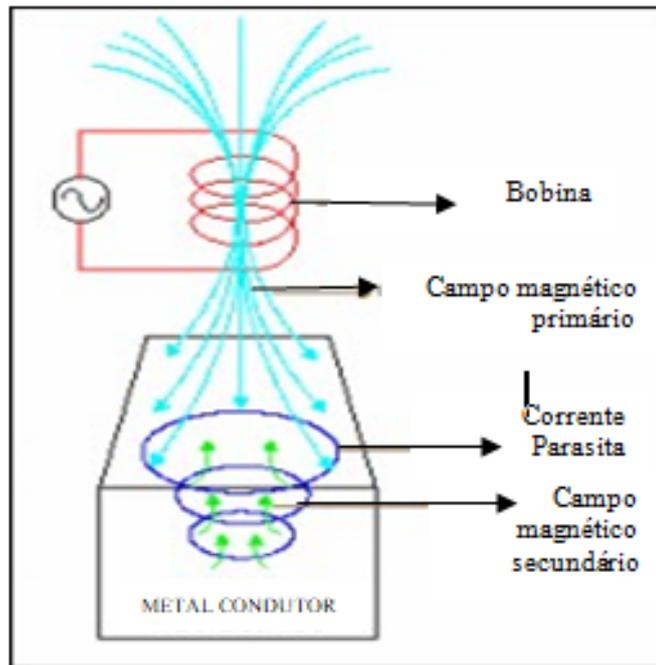
Dentre os inúmeros métodos, os ensaios eletromagnéticos podem ser destacados, graças ao princípio de criar perturbações no campo eletromagnético de um sistema em detrimento da presença de um objeto nesse campo, auxiliando, assim, na detecção de condições inerentes ao processo de fabricação ou utilização do objeto (SOARES, 2009).

## 1.6 CORRENTES PARASITAS

O ensaio não destrutivo por correntes parasitas é considerado uma das principais técnicas na classe dos eletromagnéticos, graças à sua ampla faixa de aplicação e facilidade de processo (SOARES, 2009). Ele consiste em um campo magnético gerado por uma bobina alimentada por corrente alternada, que produz correntes induzidas no objeto a ser ensaiado (MENDES, 2009).

O ensaio por correntes parasitas pode ser aplicado tanto em materiais ferromagnéticos como em não ferromagnéticos e tem sido largamente utilizado na indústria, detectando trincas ou pontos de corrosão em componentes. Além disso, tem-se aplicado o método para a obtenção de descontinuidades, determinação de características, medição de espessura de camadas e diferenciando os materiais em função de sua composição química, microestrutura e dureza (OLIVEIRA, 2016).

Para se efetuar o ensaio, uma bobina alimentada por corrente alternada é colocada sobre a superfície do corpo de prova (encostada ou não, dependendo da necessidade e geometria da peça). Na região do entorno da bobina é gerado um campo magnético, conhecido como campo primário. Este campo induz um campo secundário, que tem sentido oposto ao primário e dá origem às correntes parasitas, como visto na Figura 3 (MENDES, 2009).



**Figura 3: Geração de correntes parasitas no corpo de prova**  
**Fonte: Adaptado de Mendes (2009).**

A lei de indutância de Faraday enuncia que uma variação de densidade de fluxo magnético induzido ao longo do tempo produz uma corrente induzida em um condutor elétrico (PEREIRA, 2014).

Assim, há, nessa região induzida, uma superposição dos campos magnéticos, onde o campo secundário se opõe ao primário, contribuindo para a geração de um sinal que carrega informações como as características elétricas, magnéticas e geométricas do corpo de prova (SOARES, 2009).

A impedância de uma bobina, ou seja, a relação entre tensão e corrente da mesma, que pode ser definida por um número complexo (com parte real e imaginária), pode ter sua parte real alterada pelo aumento da dissipação de energia. É com os valores desse parâmetro que se consegue relacionar informações essenciais como condutividade e composição do material estudado (GARCIA-MARTIN, et al., 2011).

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 MATERIAIS

Para realização do ensaio não destrutivo por correntes parasitas foram utilizadas 9 amostras de Waspaloy UNS N07001, sendo uma amostra sem tratamento (como recebido), 4 amostras somente tratadas termicamente e 4 amostras tratadas termicamente e revestidas. As amostras foram retiradas de uma barra Waspaloy seccionada transversalmente.

Uma amostra foi separada como padrão, sem qualquer tipo de tratamento. Em seguida, oito amostras, também de Waspaloy UNS N07001, foram submetidas ao tratamento térmico para envelhecimento, dividido em três ciclos de aquecimento e resfriamento controlados, conforme a sequência descrita a seguir:

- Etapa 1: Solubilização a 996 °C por 2 horas, seguido de resfriamento ao ar.
- Etapa 2: Estabilização a 843 °C por 4 horas, seguido de resfriamento ao ar.
- Etapa 3: Precipitação a 760 °C por 16 horas, seguido de resfriamento ao ar.

## 2.2 ENSAIOS POR CORRENTES PARASITAS

O ensaio não destrutivo de correntes parasitas foi realizado para comparar a condutividade das amostras sem tratamento, tratadas e tratadas e revestidas. O equipamento de correntes parasitas utilizado foi o *Olympus Nortec® 500D*, no Laboratório de Materiais da Universidade Tecnológica Federal Campus Ponta Grossa. Acoplado ao equipamento de correntes parasitas, foi utilizada a sonda de superfície *Olympus SL 300Hz-10kHz* ligada ao aparelho pelo cabo *Olympus CL/SC/6*.

Para padronizar as curvas representadas, foi utilizada uma barra de calibração do equipamento Olympus, com cinco metais padrões e suas respectivas classificações IACS.

Após a medição entre os dois materiais da tabela, foi possível comparar os valores dos ângulos de fase criados entre o material de 1,10% IACS e o de 29,84% IACS. Os valores dos ângulos de condutividade foram comparados com os valores da amostra de Waspaloy, sem tratamento algum. Para isso, posicionou-se a sonda de superfície no material de 1,10% IACS da calibração, apertou-se ERASE, no canto esquerdo do equipamento, retirou-se a sonda e reposicionou-se ela na área da seção transversal da barra sem tratamento, apertando a tecla FREEZE, também do lado esquerdo do equipamento. No computador, de posse do programa *EddyMaster500*, clicou-se em “Capture Instrument Screen to Bitmap”, capturando a imagem e depois clicando em “Copy Bitmap to Clipboard”, autorizando o envio para o programa Microsoft Word®, onde foram salvas as imagens.

O mesmo procedimento foi utilizado para comparar a amostra de Waspaloy sem tratamento com o material de 29,84% IACS. O comparativo entre a amostra de Waspaloy sem tratamento térmico e o primeiro corpo tratado foi feito por meio do posicionamento da sonda de superfície na área de seção transversal do primeiro corpo tratado; em seguida apertou-se a tecla ERASE, levantou-se a sonda, colocando a mesma na área de seção transversal da amostra de Waspaloy sem tratamento.

Foi comparada a curva de condutividade entre a amostra de Waspaloy sem tratamento e o primeiro corpo de prova tratado. Foram então comparados os corpos de prova tratados e revestidos. Para verificar a homogeneidade dos resultados, foi aproximada a sonda de superfície da área de seção transversal em várias posições de contato.

## 2.3 ENSAIO DE MICRODUREZA VICKERS

Para o ensaio de microdureza foram utilizadas amostras previamente embutidas em baquelite não condutor. Essas amostras foram separadas em sem tratamento e com tratamento térmico.

Foi utilizado o polimento das amostras em pano de polimento com 3 µm de altura. O fluido de polimento foi a suspensão de diamante 3 µm, *Diapoly SGB Diamond Suspension Polycrystalline*, da fabricante Schneider. O primeiro polimento foi realizado em 10 minutos, com força de 15 Newtons no cabeçote da politriz.

O segundo polimento utilizou pano de polimento de 0,25 µm e suspensão de diamante 0,25 µm, *Diapoly SWB Diamond Suspension Polycrystalline*, da Schneider, por 10 minutos e força de 20 Newtons.

Foram realizadas 15 identações por amostras, respeitando determinação de norma técnica, e estipulou-se um valor de 80 µm de distância entre uma identação e a próxima.

## 2.4 MICROSCOPIA ÓTICA

Para a caracterização microestrutural da liga Waspaloy, tratada e não tratada termicamente, utilizou-se um microscópio ótico *Lenz® Axio Imager A2m*, no Laboratório de Materiais da Universidade Tecnológica Federal Campus Ponta Grossa. As amostras, após etapa de polimento, foram atacadas com o reagente *Waterless Kallings* por 30 segundos, lavadas com álcool e secas com ar quente.

## 2.5 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

As amostras preparadas metalograficamente foram levadas ao equipamento de microscopia eletrônica de varredura *X-Act*, da Oxford Instruments, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Ponta Grossa, e com o auxílio do software *VejaTC*, e, ajustando-se as configurações específicas, iniciou-se a microscopia eletrônica por varredura.

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Apresentam-se, neste item, resultados das medições produzidas pelo ensaio de correntes parasitas e ensaio de microdureza Vickers e as discussões acerca do tema abordado.

A Tabela 2 apresenta as comparações feitas na prática entre os valores medidos de condutividade e os ângulos de cada amostra analisada, em relação ao eixo horizontal. Por meio de interpolação linear, foi possível determinar a porcentagem referente à escala IACS de condutividade para cada corpo ensaiado.

É possível analisar uma variação pequena entre os corpos de prova que foram submetidos ao mesmo procedimento. Essa homogeneidade entre as peças permite escolher um representante para cada etapa.

**Tabela 2: Valores encontrados e comparados durante o ensaio de correntes parasitas**

Corpo ensaiado	Ângulo com relação a horizontal (graus)	Valor de condutividade (IACS)
Material 1 - barra de calibração	82,22°	1,10%
Material 2 - barra de calibração	132,45°	29,84%
Material 1 - barra de calibração	81,33°	1,10%
Amostra de Waspaloy sem tratamento	85,84°	3,64%
Amostra de Waspaloy sem tratamento	85,91°	3,69%
Material 2 - barra de calibração	132,17	29,84%
Amostra de Waspaloy sem tratamento	Entre 85,64° e 86,58°	Entre 3,54% e 4,07%
Amostra de Waspaloy sem tratamento	85,88°	3,67%
Corpo de prova 1 com tratamento	82,02°	1,49%
Corpo de prova 1 com tratamento	Entre 81,59° e 82,59°	Entre 1,25% e 1,81%
Corpo de prova 1 com tratamento	82,55°	1,79%
Corpo de prova 2 com tratamento	82,17°	1,57%
Corpo de prova 2 com tratamento	82,17°	1,57%
Corpo de prova 3 com tratamento	82,17°	1,57%
Corpo de prova 3 com tratamento	82,33°	1,66%
Corpo de prova 4 com tratamento	82,33°	1,66%
Corpo de prova 1 com tratamento	82,57°	1,80%
Material 1 - barra de calibração	82,18°	1,10%

**Fonte: Autoria própria.**

A Tabela 3 mostra os valores médios obtidos por cada etapa em que as amostras foram submetidas e ensaiadas.

**Tabela 3: Valores médios de ângulo e condutividade por fase de processo**

Fase do processo	Ângulo com relação a horizontal (graus)	Valor médio de condutividade (IACS)
Sem tratamento	85,82°	3,64%
Após tratamento térmico	82,38°	1,69%

**Fonte: Autoria própria.**

A Tabela 4 traz valores absolutos de resistividade das médias das amostras avaliadas por correntes parasitas.

**Tabela 4: Valores de condutividade e resistividade absolutos para as amostras ensaiadas**

Fase do processo	Valor médio de condutividade ( $\frac{1}{\Omega m}$ )	Valor médio de resistividade ( $\Omega.m$ )
Sem tratamento	2,146.10 <sup>6</sup>	0,466.10 <sup>-6</sup>
Apenas com tratamento térmico	0,996.10 <sup>6</sup>	1,003.10 <sup>-6</sup>

**Fonte: Autoria própria.**

Após constatada a mudança de resistividade por meio do tratamento térmico, foi necessário conferir a variação de dureza entre as amostras e entender seu comportamento. A Tabela 5 apresenta os valores encontrados no ensaio para a amostra sem tratamento e a amostra com tratamento térmico.

**Tabela 5: Valores medidos no ensaio de microdureza Vickers**

Medição	Amostra sem tratamento térmico (HV)	Amostra com tratamento térmico (HV)
1	365	423
2	370	426
3	338	432
4	315	427
5	349	433
6	362	421
7	351	434
8	370	435
9	360	421
10	353	426
11	378	417
12	362	428
13	355	422

**Fonte: Autoria própria.**

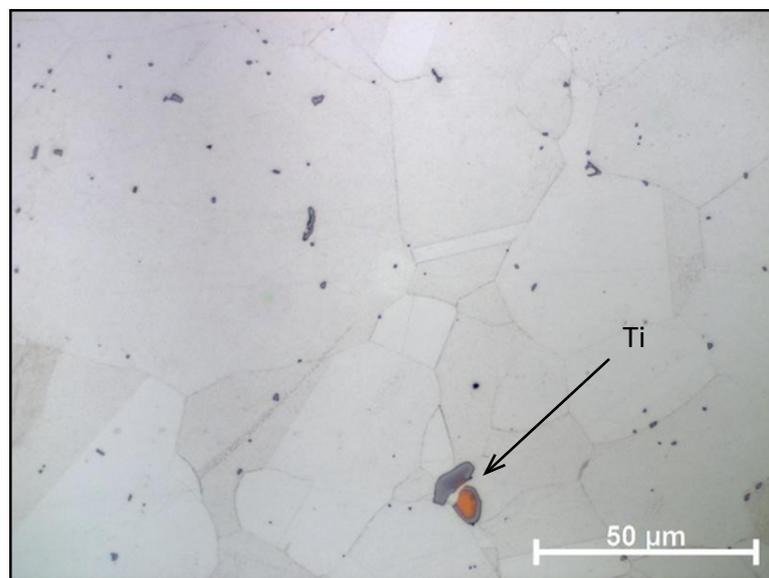
Dos 15 ensaios produzidos em cada amostra, dois foram retirados por se encontrarem muito longe da média dos dados relevantes. A Tabela 6 apresenta os valores médios e desvio-padrão de dureza na escala Vickers para a amostra não tratada e a tratada termicamente.

**Tabela 6: Valores médios e desvio-padrão de dureza para as amostras ensaiadas**

Amostra	Valor médio dureza (Vickers)
Sem tratamento térmico	356 ± 16
Com tratamento térmico	427 ± 6

Fonte: Autoria própria.

A Figura 4 mostra como é a microestrutura do Waspaloy sem tratamento térmico.



**Figura 4: Amostra de Waspaloy, sem tratamento térmico, atacada com reagente Waterless Kallings por 30 segundos e aumento de 1000 vezes**

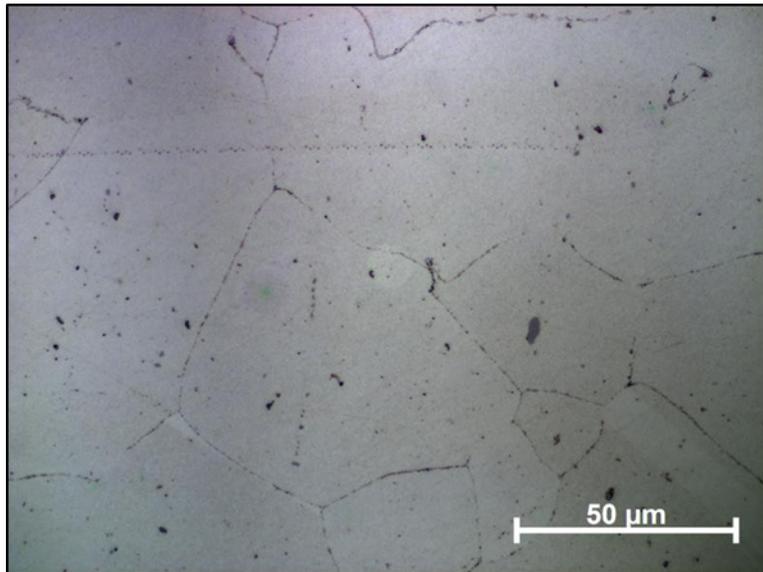
Fonte: Autoria própria.

É possível observar precipitados distribuídos de forma heterogênea e aleatória, alocando-se principalmente no interior dos grãos. Nesta região da amostra, observa-se também um grande precipitado, de cor alaranjada, de titânio, conforme foi verificado pela técnica de EDS via Microscopia Eletrônica de Varredura.

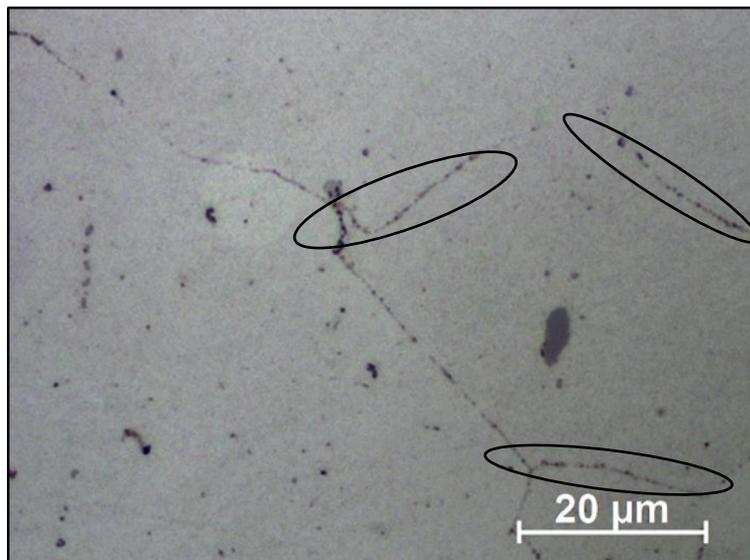
Na amostra de Waspaloy tratada termicamente por envelhecimento, Figura 5, observa-se que os precipitados, anteriormente dispersos, agora se apresentam refinados e mais bem distribuídos na matriz, agrupando-se preferencialmente na região dos contornos de grão, região que foi mais bem avaliada com a microscopia eletrônica de varredura.

Ocorreu a formação de precipitados no contorno de grão, influenciando a dureza da peça, visto que a fase intermetálica presente interage com os defeitos microestruturais, impedindo a movimentação de discordâncias. Ainda, por muitos precipitados serem de materiais intermetálicos, a grande quantidade deles no contorno de grão pode representar mudança na resistividade da peça.

A Figura 6 apresenta uma região da figura anterior com maior ampliação, para evidenciar a observação dos precipitados distribuídos no contorno de grãos.

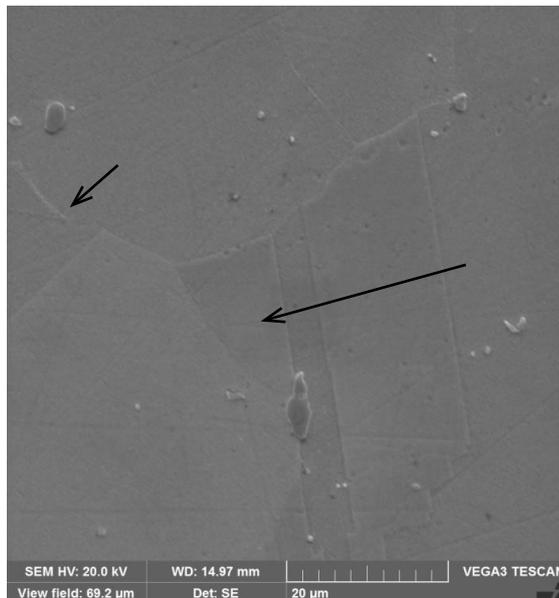


**Figura 5: Amostra de Waspaloy após tratamento térmico, microscopia ótica, atacada com reagente Waterless Kallings por 30 segundos e aumento de 1000 vezes**  
**Fonte: Autorial própria.**

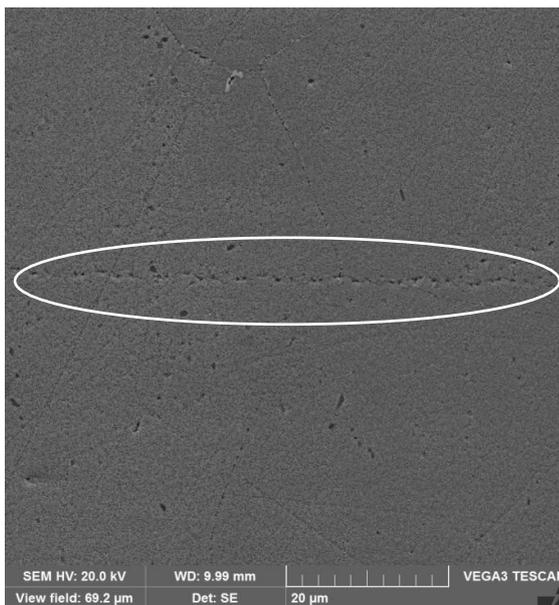


**Figura 6: Aproximação de uma região de contorno de grão após tratamento térmico, 2000 x, reagente Waterless Kallings, 30s. Microscopia ótica**  
**Fonte: Autorial própria.**

No ensaio com o microscópio eletrônico de varredura, a diferença entre as microestruturas das amostras ficou ainda mais evidente. Nas Figuras 7 e 8, pode-se observar uma região com contorno de macla e a divisão entre grãos, de maneira uniforme.

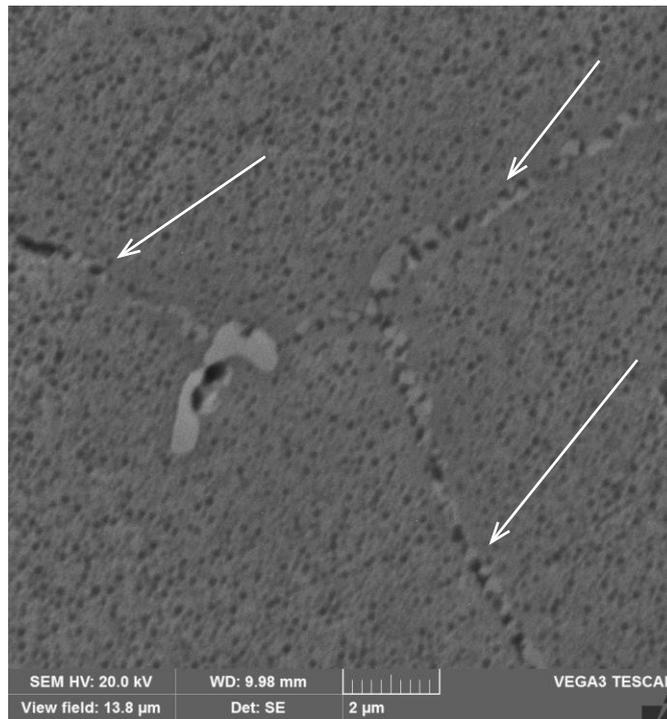


**Figura 7: Grãos e macla da amostra sem tratamento térmico, Aumento de 2000x por Microscopia Eletrônica de Varredura**  
**Fonte: Autoria própria.**



**Figura 8: Precipitados na amostra tratada termicamente, Aumento de 2000x por Microscopia Eletrônica de Varredura**  
**Fonte: Autoria própria.**

Nesta mesma amostra tratada realizou-se uma análise na região dos contornos de grãos, resultando em uma melhor visualização dos precipitados nesta região, conforme observa-se da Figura 9.



**Figura 9: Detalhe dos contornos de grãos na amostra tratada termicamente, aumento de 10000x por Microscopia Eletrônica de Varredura  
Fonte: Autoria própria.**

É possível perceber que a amostra tratada termicamente (figuras 8 e 9) apresenta grande quantidade de precipitados dispostos tanto nos contornos quanto no interior dos grãos. Estes precipitados são de fases  $\gamma'$  e  $\gamma''$ , enquanto a solução sólida na amostra sem tratamento térmico não possui a diferenciação das fases tão evidente.

Na Figura 9 observa-se mais detalhadamente a concentração de precipitados na região de contorno de grão e homogeneamente distribuídos no interior dos grãos. Estes precipitados intermetálicos, ou seja, a combinação entre os metais e a liga, acarretam propriedades específicas ao material tratado termicamente, conforme comprovado nos ensaios de microdureza e correntes parasitas.

## CONCLUSÃO

O tratamento térmico de envelhecimento ao qual as amostras foram submetidas causou alteração microestrutural na superliga de níquel Waspaloy e esta alteração pôde ser observada por microscopia ótica e eletrônica de varredura.

A alteração microestrutural obtida na liga promoveu um ganho médio de dureza de 19,81%, conforme os resultados obtidos no ensaio de microdureza Vickers.

Por meio do ensaio de correntes parasitas, observou-se que as amostras com tratamento térmico obtiveram redução de aproximadamente 46,41% no valor médio de condutividade elétrica.

O ensaio de correntes parasitas mostrou-se sensível na detecção das mudanças microestruturais da superliga estudada, relacionando esta variação com a sua variação de condutividade elétrica.

Os precipitados intermetálicos presentes na amostra com tratamento térmico conferiram uma redução da condutividade elétrica da amostra quando distribuídos uniformemente no interior dos grãos e principalmente nos contornos de grãos.

## REFERÊNCIAS

- ABENDI. **Ensaaios não destrutivos e inspeção**, 2017. Disponível em: <<http://www.abendi.org.br/abendi/default.aspx?mn=709&c=17&s=&friendly=>>. Acesso em: 14 nov. 2017.
- AMERICAN WELDING SOCIETY. **Thermal Spraying: practice, theory and applications**. Miami: [s.n.], 1985.
- ASM INTERNATIONAL. **Handbook of Thermal Spray Technology**. Thermal Spray Society, 2004.
- CALLISTER, W. D.. **Fundamentos da ciência e engenharia de materiais: uma abordagem integrada**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006.
- CIMM. **Descrição dos processos de revestimento por adição de camadas**, 2016. Disponível em: <[https://www.cimm.com.br/portal/material\\_didatico/6376-descricao-dos-processos-de-revestimento-por-adicao-de-camadas#.W-np75NKjIV](https://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6376-descricao-dos-processos-de-revestimento-por-adicao-de-camadas#.W-np75NKjIV)>. Acesso em: 10 out. 2018.
- CUNHA, L. A. C. G. **Estudo dos mecanismos de degradação em revestimentos PVD baseados em nitretos metálicos no processamento de materiais plásticos**. 2000. Tese (Doutorado) – Universidade do Minho, Braga, 2000.
- FICKETT, F. R. **Electrical properties of materials and their measurement at low temperatures**. Colorado: National Bureau of Standards Boulder, 1982.
- FRANKLIN, E. M. **Turbinas a gás**. Disponível em <[http://www.fem.unicamp.br/~franklin/ES672/pdf/turbina\\_gas.pdf](http://www.fem.unicamp.br/~franklin/ES672/pdf/turbina_gas.pdf)>. Acesso em: 15 nov. 2017.
- FREIRE NETO, I. A. **Estudo das inovações na área da turbina a gás**. 2018. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2018.
- GARCIA-MARTIN, J.; GÓMEZ-GIL, J.; VÁZQUEZ-SÁNCHEZ, E. Non-destructive techniques based on eddy current testing. **Sensors**, pp. 2525-2565, 2000.
- GEDDES, B.; LEON, H.; HUANG, X. **Superalloys: Alloying and Performance**. Ohio: ASM International, 2010.
- GENTIL, V. **Corrosão**. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1982.
- GODOY, J. **Turbinas a gás**. Rio de Janeiro: IBP, 1996.
- MARQUES, B. S. B. **Aplicação da técnica de correntes parasitas para detecção de defeitos em aço Duplex 2205 com diferentes tratamentos térmicos**. 2017. Monografia (Projeto de Graduação) – Graduação em Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.
- MENDES, G. M. **Separação de diferentes composições químicas de aço pelo método de correntes parasitas: Otimização dos parâmetros de ajuste**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia, Modalidade Profissional, Especialidade Siderurgia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.
- PENG, W. W. **Fundamentals of turbomachinery**. New Jersey: John Willey & Sons, 2008.
- PEREIRA, D. **Avaliação do método de correntes parasitas para caracterização microestrutural e inspeção de defeitos à base de níquel**. 2014. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Porto Alegre, 2014.
- REED, R. C. **The Superalloys: Fundamentals and Applications**. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.
- SOARES, A. **Correntes Parasitas**. 2. ed. São Paulo: ABENDI, 2009.
- WANG, D. Y.; LI, Y-M.; CHANG, C-L.; HO, W-Y. **Deposition of high quality (Ti, Al)N hard coating by vacuum arc evaporation process**, 1999.

## **SOBRE OS AUTORES**

### **SANDRA MARA KAMINSKI TRAMONTIN**

Possui Graduação em Engenharia de Materiais pela Universidade Estadual de Ponta Grossa (1995), Especialização em Engenharia de Segurança do Trabalho pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (1999) e Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais pela Universidade Estadual de Ponta Grossa (2003). Atualmente é Professora Titular da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Tem experiência na área de Engenharia de Materiais e Metalúrgica, com ênfase em ensaios mecânicos destrutivos e não destrutivos, tratamentos térmicos de ligas ferrosas e não ferrosas. stramontin@utfpr.edu.br

### **ANDERSON GERALDO MAREDA PUKASIEWICZ**

Possui Graduação em Engenharia de Materiais pela Universidade Estadual de Ponta Grossa (1998), Mestrado em Engenharia de Materiais pela Universidade Federal do Paraná (2002), Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais pela Universidade Federal do Paraná (2008) e está realizando Pós-Doutorado na Universidade de Barcelona em manufatura aditiva por Cold Spray. Atualmente é Professor de ensino básico técnico e tecnológico da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Tem projetos de pesquisa com diferentes empresas da área de produção de energia na área de Engenharia de Materiais e Metalúrgica, com ênfase em aspersão térmica, revestimentos para elevadas temperaturas, cavitação, soldagem, aço inoxidável martensítico e revestimentos de carbonetos. anderson@utfpr.edu.br

### **GUILHERME MOLINARI LOPES**

Técnico em Mecânica pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Ponta Grossa (2009). Possui Graduação em Engenharia Mecânica pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Ponta Grossa (2018). Pós-Graduando em Engenharia de Manutenção 4.0 pela Universidade Federal do Paraná, Campus Curitiba (previsão para 2021). Atualmente é Analista de Operação Sênior na Rumo Logística. Trabalha com projetos de melhoria contínua, melhoria de processos e projetos de equipamentos mecânicos. guilhermehlopes@yahoo.com.br

# **ESTUDO COMPARATIVO ENTRE O PROCESSO DE ALARGAMENTO E FURAÇÃO COM BROCA HELICOIDAL COM DIFERENTES ÂNGULOS DE PONTA EM AÇO SAE 4140**

HENRIQUE AJUZ HOLZMANN

*Professor de Tecnologia em Manutenção Industrial - UTFPR – Guarapuava – PR*

CARLA LUIZA COSTA DOS SANTOS

*Estudante de Engenharia Mecânica - UTFPR – Guarapuava – PR*

IGOR VILCZEK

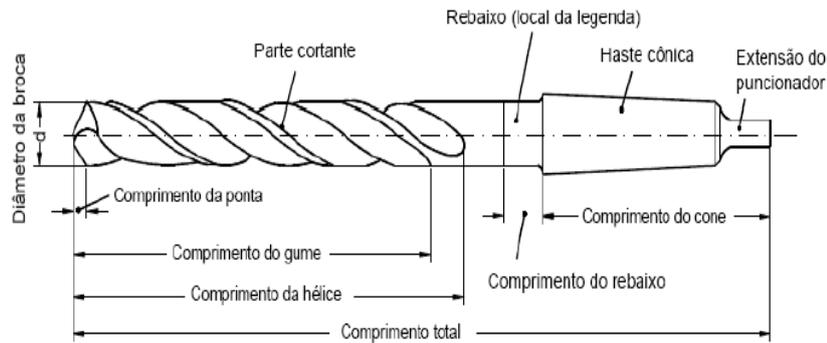
*Estudante de Engenharia Mecânica - UTFPR – Guarapuava – PR*

## **1 INTRODUÇÃO**

A manufatura pode ser entendida como a transformação da matéria-prima em produtos acabados, por meio da utilização de uma sequência de processos bem definidos. Já o termo fabricação é empregado de uma forma mais restrita, limitando-se aos processos nele envolvidos. A fabricação é geralmente referenciada como uma sequência de operações, onde cada etapa individual conduz a matéria-prima a um estado mais próximo do objeto final (GROOVER, 2007).

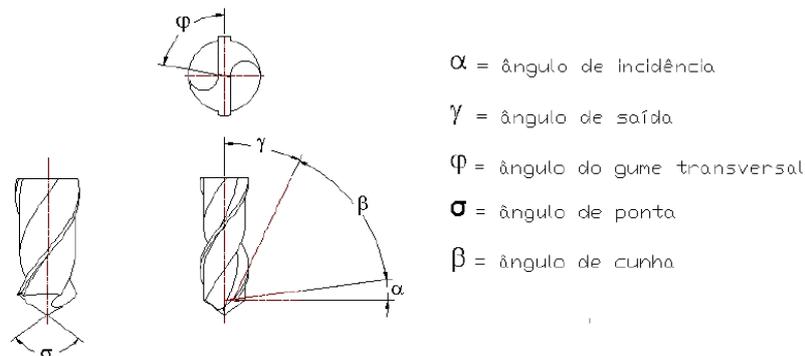
Um dos processos de transformação mais empregados no setor metalúrgico é o processo de usinagem, sendo entendido como o processo que confere à peça sua forma, dimensões e acabamento por meio da remoção de material sobressalente na forma de cavacos (FERRARESI, 2018). Uma das principais classificações divide os processos de usinagem em convencionais e não convencionais. Dentre eles, o processo de furação possui um papel de inegável importância, devido à sua grande aplicabilidade dentro da indústria.

A furação é um processo que visa à obtenção de furos geralmente cilíndricos, por meio de movimentos relativos de rotação entre a peça e a ferramenta. Dentre as ferramentas utilizadas no processo de furação, cerca de 25% utilizam brocas helicoidais (KÖNIG; KLOCKE, 1997). Estas brocas apresentam forma construtiva composta de uma haste cilíndrica e um corpo cortante, podem apresentar diferentes configurações com dois ou mais gumes a fim de reduzir os erros de posicionamento, melhorar o fluxo de saída do cavaco e reduzir as forças de corte. De maneira geral, as brocas helicoidais possuem as partes apresentadas na Figura 1 (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2006).



**Figura 1: Partes de uma broca helicoidal comum**  
**Fonte: Castillo (2005).**

Desta forma, selecionar corretamente o tipo de broca adequado à operação a ser realizada é de grande importância, e para isto se deve conhecer os principais ângulos presentes na mesma, a fim de se produzir um furo com as tolerâncias geométricas adequadas e com o acabamento superficial exigido. Os principais ângulos presentes nas brocas helicoidais são os apresentados na Figura 2 – ângulo de incidência ( $\alpha$ ), de saída ( $\gamma$ ), do gume transversal ( $\varphi$ ), de ponta ( $\sigma$ ).



**Figura 2: Principais ângulos de uma broca helicoidal**  
**Fonte: Stemmer (2005).**

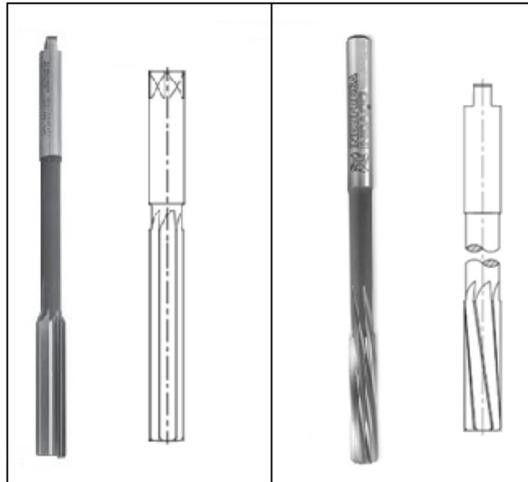
Dentre os ângulos, pode-se destacar o ângulo de ponta ( $\sigma$ ), o qual é formado pelos dois gumes principais da ferramenta. Este influencia diretamente a espessura do cavaco formado, o avanço e o tempo de usinagem para uma mesma operação. A resistência mecânica e a dissipação de calor da ferramenta também são influenciadas pelo ângulo de ponta, sendo que ângulos elevados reforçam os gumes, mas dificultam o posicionamento da ferramenta (STEMMER, 2005; STEMMER, 2007; BORK, 1995).

De uma maneira geral, as brocas helicoidais são classificadas de acordo com o material a ser usinado e seus respectivos ângulos geométricos, podendo ser divididas entre H (indicadas para materiais duros e frágeis ou que produzam cavaco curto, podem variar com  $\sigma = 80^\circ$ ,  $\sigma = 118^\circ$  e  $\sigma = 140^\circ$ ), N (indicadas para materiais com tenacidades medianas, podem variar com  $\sigma = 118^\circ$  a  $\sigma = 130^\circ$ ) e W (indicadas para materiais macios ou que produzem cavaco longo, possuem  $\sigma = 130^\circ$ ).

O processo de furação com brocas helicoidais possui algumas limitações, como a imprecisão do furo gerado em casos onde se necessita de tolerâncias geométricas e dimensionais apertadas. Geralmente, com a utilização destas brocas se consegue um furo com grau de tolerância na ordem de IT 11. Outro problema gerado é em relação ao comprimento da ferramenta utilizada, a qual deve manter uma relação comprimento/diâmetro abaixo da ordem de três unidades, dificultando o uso destas brocas em furos de pequeno diâmetro (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2006; STEMMER, 2005).

Em casos onde se faz necessária a obtenção de furos com maior precisão, costuma-se utilizar operações de acabamento, como o alargamento. De acordo com a norma DIN 8589, o alargamento é um processo de usinagem de precisão que proporciona algumas mudanças nas características de um furo já existente, como aumento do furo, melhorias no acabamento superficial e de geometria, podendo se obter um grau de tolerância na ordem de IT 6 (STEMMER, 2005).

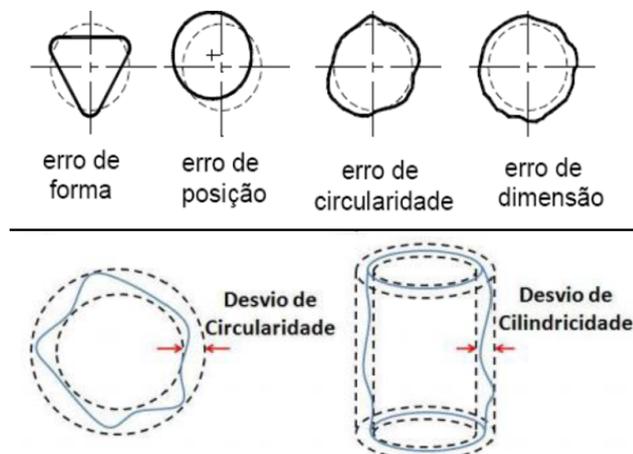
Nas operações de alargamento se utiliza ferramentas com geometria definida, multicortante, com corpo cilíndrico ou cônico e possuindo dentes retos ou helicoidais, conforme apresentado na Figura 3.



**Figura 3: Alargadores - (a) de dentes retos - (b) de dentes helicoidais**  
**Fonte: Indaço (2020).**

Este tipo de ferramenta é indicado para um desbaste de furos já existentes, onde é requerida uma maior precisão, buscando reduzir defeitos gerados durante a furação convencional. Os principais problemas encontrados são os erros de cilindridade (forma), de posicionamento do furo, circularidade e de dimensão, apresentados na Figura 4(a) (VILLARROEL, 1991).

Os erros de cilindridade ou forma são definidos como a diferença radial entre dois cilindros coaxiais entre os quais deve estar localizada a superfície real da peça, Figura 4(b). Já a circularidade é um caso especial de cilindridade, quando se considera uma seção do cilindro perpendicular à sua geratriz, sendo equivalente à distância radial mínima entre duas circunferências concêntricas, dentre as quais deve estar contido o perfil real da peça (SOUZA, 2013; SOUZA, ARENCEBIA; SATO, 2011). Outro problema bastante comum são os erros de dimensão, os quais são influenciados diretamente pelos gumes da ferramenta e pela rigidez do conjunto máquina/ferramenta.

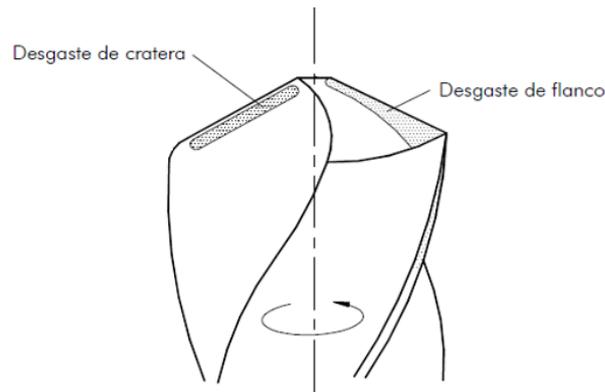


**Figura 4: Erros geométricos no processo de obtenção de furos**  
**Fonte: Villarroel (1991).**

Um dos principais fatores que levam a problemas no processo de furação ou alargamento são os desgastes ocorridos na ferramenta, sendo que em muitos casos estes podem inutilizar as mesmas. Dentre os principais problemas encontrados, destacam-se o desgaste de quina ( $W$ ), de flanco ( $V_b$ ), da guia lateral ( $M_w$ ) e de cratera ( $K$ ), sendo os mesmos apresentados na Figura 5 (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2006).

Entretanto, os desgastes que geralmente são mensurados são os de flanco e o de cratera, que servem como critério para o fim de vida da ferramenta (SCHROETER, 1999). Tais desgastes podem ser mais bem compreendidos por meio da observação da Figura 5.

O desgaste de flanco ocorre na superfície de folga da ferramenta, levado pelo contato entre a mesma e peça (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2006). O desgaste de cratera geralmente ocorre na superfície de saída da ferramenta, devido ao atrito com o cavaco.

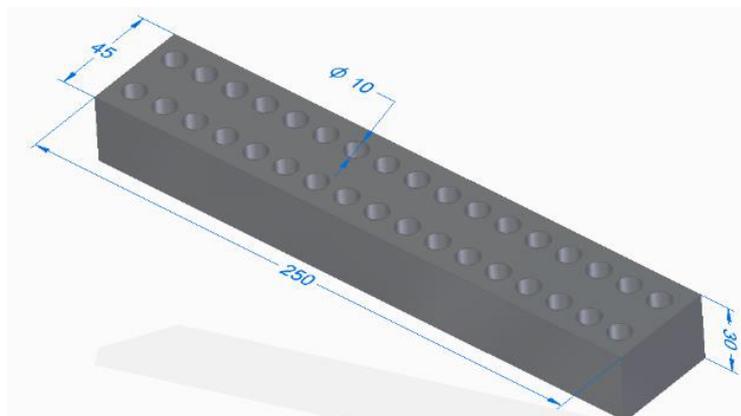


**Figura 5: Desgastes na ferramenta de corte**  
Fonte: Moraes (2009).

Desta forma, estudar diferentes ferramentas no processo de furação é de grande importância, buscando-se aliar produtividade com características de acabamento e tolerâncias, com vistas à otimização do processo.

## 2 METODOLOGIA

Inicialmente se delimitou os materiais a serem utilizados, o corpo de prova selecionado foi uma barra chata de aço SAE 4140, a qual foi submetida ao processo de fresamento, em uma fresadora marca Diplomat modelo FVF 2500. Para uniformização das superfícies, foram preparadas 4 amostras, conforme Figura 6.



**Figura 6: Esquema de furação nas amostras preparadas**

Para os ensaios de furação utilizou-se três tipos de brocas helicoidais de aço rápido HSS com diâmetro de 10 mm, variando seu ângulo de ponta de 100°, 120° e 140, ambas da marca Dormer

– DIN 338 – forma N – perfil de tolerância H8 – ângulo de ponta de 118° e diâmetro nominal 10 mm. Para obtenção dos ângulos de ponta utilizados, as mesmas foram retificadas em gabarito afiador, mantendo-se as características construtivas básicas.

Para o processo de alargamento dos furos, utilizou-se uma broca helicoidal marca Dormer – DIN 338 forma N – constituída de aço rápido (HSS – M2) – perfil de tolerância H8 – ângulo de ponta de 118° e diâmetro nominal 9,5 mm, para obtenção dos pré-furos e na sequência um alargador máquina marca Dormer – norma DIN 212B – perfil de tolerância h7 e diâmetro nominal de 10 mm.

Com os materiais delimitados e preparados, os ensaios foram realizados em fresadora marca Diplomat, modelo FVF 2500, presente no laboratório de usinagem da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Guarapuava, utilizando-se dos parâmetros apresentados na Tabela 1. Ambos os ensaios foram realizados a seco, com furação em cheio passante com 30 mm de profundidade de corte.

**Tabela 1: Parâmetros de corte utilizados no processo**

	Parâmetro de corte		
	Furação	Pré – Furação	Alargamento
n	1000 RPM	1000 RPM	1500 RPM
f	0,08 mm/rot	0,08 mm/rot	0,16 mm/rot
vf	80 mm/min	80 mm/min	160 mm/min

Foram efetuados 16 furos com cada uma das ferramentas, sendo que se mediu o desgaste de flanco a cada ciclo de 4 furos. O desgaste de flanco foi medido através do microscópio estereoscópio marca Zeiss, modelo Stemi 200C. A obtenção das imagens se deu a partir da câmera digital Canon modelo Power Shot G6 montada no referido microscópio. A imagem do desgaste foi adquirida pelo software Zoom Browser Ex 6.1.1, que permitia a medição do desgaste e seu armazenamento em arquivo digital através do software Axio Vision Le, ambos presentes no laboratório de microscopia óptica do Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Estadual de Ponta Grossa.

Após os processos de furação os corpos de prova foram levados à máquina de medir por coordenadas, Figura 7, marca Mitutoyo, modelo Crysta Apex S 574, pertencente ao Laboratório de Metrologia da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Guarapuava. Em cada furo foram realizadas 5 medições de varredura em relação ao diâmetro. Posteriormente foi obtida a média dos diâmetros e o desvio-padrão. Após a verificação do diâmetro real, deu-se início ao estudo sobre a circularidade. Para tal, definiu-se pontos internos centrais no furo 1, furo 8 e furo 16 realizados por cada processo, especificou-se uma tolerância geométrica no equipamento, que para esse caso foi IT11, e assim foi medido esse desvio. Já o desvio de cilindricidade foi medido em função do processo realizado. A medição se deu por meio da obtenção de pontos igualmente divididos entre entrada e saída de cada furo.



**Figura 7: Máquina de medir por coordenadas**

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### A. DESGASTE DE FLANCO

Os resultados observados referentes ao desgaste de flanco das brocas e do alargador estão expostos na Tabela 2, onde é possível observar o comportamento do desgaste de flanco a cada ciclo de quatro furos realizados (0, 4, 8, 12 e 16).

**Tabela 2: Valores obtidos de desgaste de flanco**

Desgaste de Flanco ( $\mu\text{m}$ )					
Furos	0	4	8	12	16
Broca 10 mm (ângulo de ponta 100°)	2,34	92,78	137,79	154,57	277,47
Broca 10 mm (ângulo de ponta 120°)	3,12	76,55	120,03	145,81	250,69
Broca 10 mm (ângulo de ponta 140°)	2,76	48,2	71,76	108,64	138,25
Alargado 10 mm	2,58	35,9	49,96	75,52	105,77

Nota-se que, apesar do número de ciclos ser reduzido, é possível observar um padrão na progressão dos desgastes, Gráfico 1, tendo que para a furação com brocas com ângulos de ponta de 100° e 120° se deu de forma mais abrupta, o que para a ferramenta com ângulo de 140° não se visualizou. Nesta, verificou-se uma progressão de crescimento mais linear se comparada com as demais. Este fator favorece o controle do processo, pois se pode estimar com maior precisão o desgaste da ferramenta com o passar do uso.

Verificou-se que o desgaste de flanco na broca é mais elevado do que no alargador. Isso pode ser explicado pelo fato de o número de arestas de corte no alargador ser maior, exigindo um menor esforço de corte, devido à distribuição entre seus gumes de corte. Lobo (2015), em seu estudo comparativo do comportamento entre brocas e alargadores, concluiu que quanto maior a quantidade de canais das ferramentas, menor o esforço aplicado sobre cada gume, contribuindo com o aumento da vida útil, preservando-as dos mecanismos de desgaste e eventuais lascamentos.

Uma possível explicação é que, como a força de corte nos gumes da broca é maior, há uma maior geração de energia (calor) nas mesmas. Castillo (2005) estudou o desgaste de flanco máximo em função da velocidade de corte de quatro brocas de um mesmo material e com geometrias diferentes.

Afirmou que os melhores resultados de desgaste foram constatados onde os efeitos da temperatura são menos significativos, proporcionando um maior tempo de vida para as ferramentas. Nota-se, assim, que a temperatura gerada no processo pode ser um fator determinante em relação ao desgaste de flanco.

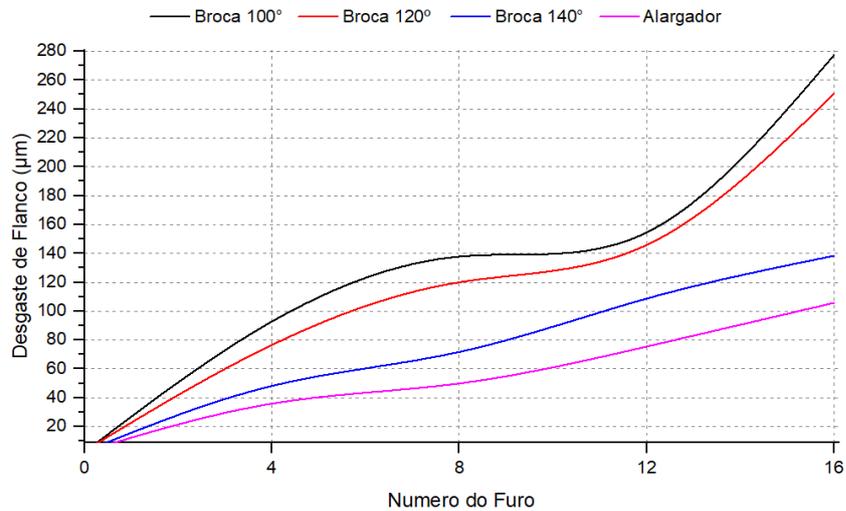


Gráfico 1: Acompanhamento do desgaste de flanco nas ferramentas de corte

Percebeu-se na análise das brocas com ângulo de ponta de  $100^\circ$  e  $120^\circ$  a adesão de material na superfície da ferramenta (APC), ficando evidente na broca com ângulo de  $120^\circ$  que tal fenômeno acarreta um aumento na força necessária ao corte, podendo interferir nos resultados. Esse fenômeno pode ser mais bem observado na Figura 8.

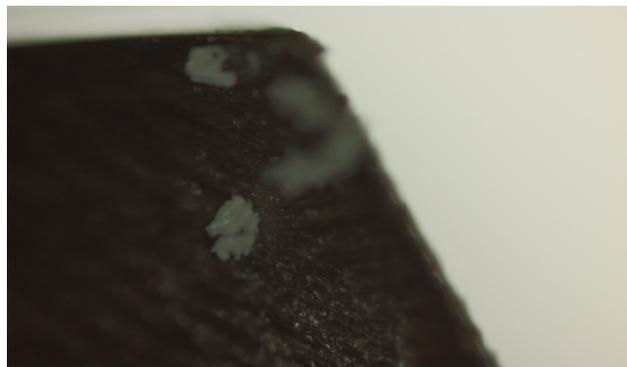


Figura 8: Adesão de material na superfície da ferramenta com ângulo e  $120^\circ$

## B. VARIAÇÃO DIMENSIONAL

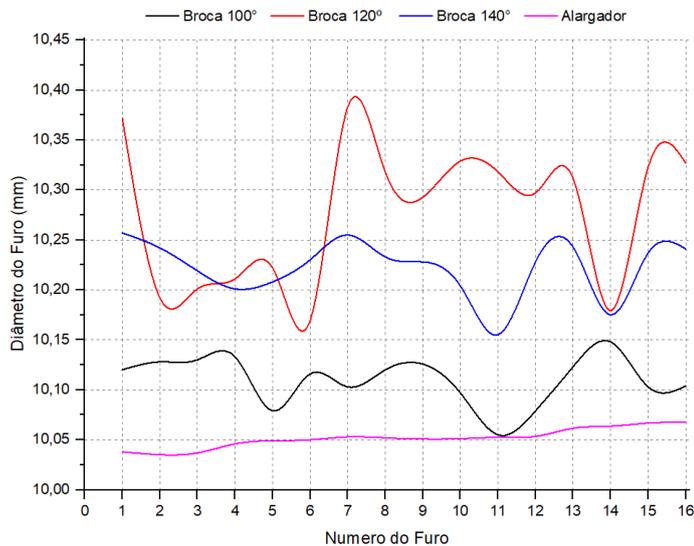
A variação dimensional dos furos obtidos nas diversas condições de ensaio é apresentada na Tabela 3 – os dados são apresentados na unidade milímetros.

**Tabela 3: Valores obtidos para variação dimensional dos furos**

Nº Furo	100°	120°	140°	Alargamento
1	10,12	10,372	10,257	10,038
2	10,128	10,192	10,242	10,0352
3	10,13	10,201	10,219	10,037
4	10,133	10,211	10,201	10,046
5	10,079	10,222	10,208	10,049
6	10,116	10,169	10,23	10,05
7	10,103	10,383	10,255	10,053
8	10,12	10,318	10,233	10,052
10	10,097	10,329	10,204	10,0512
11	10,055	10,318	10,155	10,0526
12	10,079	10,297	10,228	10,0534
13	10,123	10,312	10,243	10,0616
14	10,148	10,179	10,175	10,0638
15	10,103	10,323	10,237	10,0668
16	10,104	10,327	10,241	10,0678
Desvio-padrão	0,0244108	0,0728098	0,0288218	0,010197441
Dispersão	0,24%	0,71%	0,28%	0,10%

Observa-se que no processo de furação com brocas helicoidais a ferramenta com ângulo de ponta de 100° apresentou um furo mais preciso no que se relaciona ao diâmetro, com uma dispersão menor e mais próxima da média. Durante o processo de furação, a broca com um ângulo de ponta de 120° apresentou maior vibração, que pode ser explicada pela formação de APC. Constatado durante a furação e em microscópio, tal efeito pode ter refletido na dispersão de seus resultados. O Gráfico 2 apresenta os resultados obtidos comparados aos níveis de tolerância IT.

Nota-se que, no decorrer da operação de alargamento, ocorre um aumento da média dos diâmetros dos furos, mas relativamente menor se comparado com a furação convencional com broca helicoidal, obtendo-se, assim, um valor muito próximo do valor nominal, atendendo integralmente aos requisitos de tolerância IT10. Bezerra (2001) mostra que, com o aumento do número de arestas de corte, a precisão do diâmetro e o acabamento superficial do furo melhoram, pois há uma redução do avanço por aresta de corte (para a mesma velocidade de avanço) e o aumento da quantidade de guias, o que eleva o efeito de alisamento na parede do furo. Este efeito neutraliza o aumento de vibrações gerado pelas múltiplas arestas de corte, mesmo não sendo simétricas. Explica-se assim o motivo desse processo obter furos mais precisos em relação à furação convencional.



**Gráfico 2: Acompanhamento da variação dimensional dos furos obtidos**

### C. DESVIO DE CIRCULARIDADE

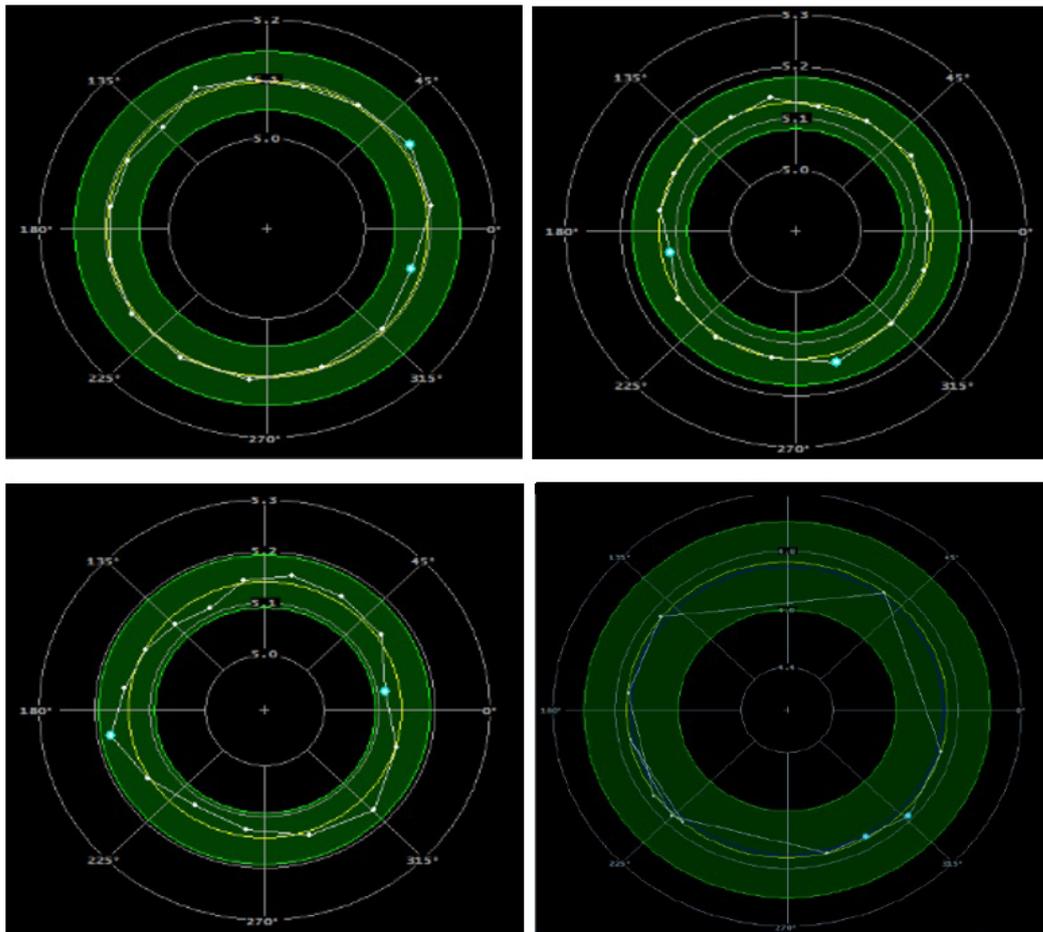
Os resultados obtidos nas medições de circularidade são mostrados na Tabela 4. Nota-se que os desvios são maiores em furos obtidos por meio da furação convencional do que no alargamento. Uma possível explicação para esse fato pode estar relacionada ao desgaste da ferramenta. Segundo Micheletti (1980), o desgaste da ferramenta é o maior responsável pela dispersão nos valores de circularidade do furo. Gumes afiados numa broca garantem uma estabilidade na tolerância de circularidade do furo. E como o desgaste na broca foi significativamente maior do que no alargador, isso explica o fato de o desvio de circularidade ter sido maior no processo de furação convencional. Quanto à variação entre os ângulos de ponta, não se pode analisar uma correlação entre o desgaste e o ângulo de ponta, apenas a circularidade e o diâmetro médio dos furos, que tendem a piorar conforme o desgaste da ferramenta.

**Tabela 4: Valores obtidos para circularidade dos furos**

Nº Furo	100°	120°	140°	Alargamento
1	0,036	0,043	0,054	0,03
4	0,045	0,045	0,062	0,033
8	0,05	0,059	0,079	0,038
12	0,056	0,074	0,096	0,042
16	0,073	0,091	0,098	0,055
Desvio-padrão	0,0138384	0,0202682	0,0197282	0,009762172
Dispersão	26,61%	32,48%	25,36%	24,65%

Analisando os furos obtidos com brocas helicoidais, os mesmos apresentaram tolerâncias geométricas da ordem IT10, IT11 e IT12, respectivamente. Já com o processo de alargamento, nos furos iniciais a ordem foi IT9 e conforme a ferramenta apresentava desgaste na ordem de IT10.

A Figura 9 mostra um exemplo das imagens obtidas pelo equipamento de medição por coordenadas para o furo 16 de cada umas das ferramentas. O círculo amarelo refere-se à circularidade teórica da ferramenta, sendo o diâmetro de 10 mm nominal. A área em verde refere-se à tolerância geométrica da máquina, na ordem de IT11 (intervalo de tolerância geométrica de  $\pm 0,150$  mm), e os pontos a medida real da circularidade do furo.



**Figura 9: Exemplificação das imagens obtidas de circularidade dos últimos furos obtidos, com as diferentes ferramentas de corte utilizadas**

#### D. DESVIO DE CILINDRICIDADE

Percebe-se que o desvio de cilindridade para a ferramenta com o ângulo de  $100^\circ$  apresentou-se mais estável em relação às demais, com patamares menores durante todo o processo. Tal resultado se deve a menor área de contato entre a ferramenta e a peça, o que leva a uma menor força necessária para o corte e uma menor vibração durante a operação.

Já a ferramenta com ângulo de  $120^\circ$  apresentou menor dispersão se comparada com a broca de  $140^\circ$ . A Tabela 5 apresenta os valores obtidos nos processos de furação e alargamento.

**Tabela 5: Valores obtidos de cilindridade dos furos**

Nº Furo	$100^\circ$	$120^\circ$	$140^\circ$	Alargamento
1	0,1179	0,2243	0,0437	0,0198
4	0,1262	0,0585	0,0636	0,0214
8	0,1258	0,2475	0,1234	0,0274
12	0,0733	0,153	0,2148	0,0327
16	0,1137	0,1279	0,1021	0,0374
Desvio Padrão	0,02194053	0,0760712	0,0666568	0,007437607
Dispersão	19,70%	46,89%	60,86%	26,81%

Os melhores valores de cilindridade foram verificados para o processo de alargamento. Há um aumento desse desvio no decorrer do processo. Como mencionado anteriormente, uma possível

explicação para esse fato pode estar relacionada com os maiores esforços gerados durante a usinagem. Segundo Coldwell et al. (2004), em furação os altos esforços na furação estão relacionados com os altos valores de cilindricidade, indicando problemas na evacuação dos cavacos, contribuindo a deformações, além de maiores vibrações ou desbalanceamento da máquina-ferramenta. Tais esforços repercutem negativamente nas tolerâncias de cilindricidade do furo.

## CONCLUSÃO

Em relação ao desgaste das ferramentas, a broca utilizada no processo de furação convencional sofreu um desgaste significativamente maior do que o alargador. Isso se explica pelo fato de o alargador possuir um maior número de arestas de corte, usinando com menor esforço distribuído em seus gumes. Maiores ângulos de ponta ( $140^\circ$ ) geram um menor desgaste na ferramenta porque maiores ângulos levam a uma maior área de corte no gume, tornando-o também mais resistente. A ferramenta com menor ângulo ( $100^\circ$ ) foi a que apresentou o maior desgaste, justificado por uma área menor de gume, o que leva a uma maior força exercida sobre o mesmo, tornando-o mais frágil.

Sobre os desvios estudados durante este trabalho, o processo de alargamento foi o que gerou melhores resultados, tanto no desvio de circularidade, cilindricidade, quanto no diâmetro real, apresentando furos com uma dimensão bem próxima da nominal, com um conjunto de dados mais homogêneos, e com qualidades de trabalho da ordem IT9 e IT10. Já com a furação convencional, obteve-se furos com qualidades de trabalho IT10, IT11 e IT12.

Como ambos os processos foram executados sob as mesmas condições, pode-se concluir que o fato dos desvios de cilindricidade e circularidade terem sido maiores no processo de furação convencional se explica pelo desgaste de flanco na broca ser significativamente maior, ocorrendo uma rápida deterioração dos seus gumes em comparação com os gumes do alargador, perdendo rapidamente a sua afiação à medida que o processo vai sendo realizado. Consequentemente, são gerados maiores esforços de usinagem, que acabam contribuindo para maiores vibrações, deformações, desbalanceamento da máquina-ferramenta, interferindo, com isso, na tolerância.

Acerca dos desvios estudados durante o processo, a ferramenta com menor ângulo de ponta ( $100^\circ$ ) foi a que gerou os melhores resultados, tanto no desvio de cilindricidade, circularidade quanto no diâmetro real. Ela apresentou cortes mais precisos, com menores erros.

Tais resultados mostram que o com o processo de alargamento obtém-se furos com maiores precisões geométricas se comparado com o processo de furação convencional e nos levam a concluir que brocas com maiores ângulos de ponta apresentam uma maior resistência ao desgaste, porém geram furos com menor qualidade se comparadas a ferramentas com ângulos menores. Já brocas com ângulos menores são mais suscetíveis ao desgaste, porém apresentam furos com maior qualidade.

## REFERÊNCIAS

- BEZERRA, A. A.; MACHADO, A. R.; SOUZA, A. M.; EZUGWU, E. O. Effects of machining parameters when reaming aluminium-silicon (SAE 322) alloy. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 112, pp. 185-198, 2001.
- BORK, C. A. S. **Otimização de Variáveis de Processo para a Furacão do Aço Inoxidável Austenítico DIN 1.4541**. 1995. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, 1995.
- CASTILLO, W. **Furação profunda de ferro fundido cinzento GG25 com brocas de metal duro com canais retos**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.
- COLDWELL, H. L.; DEWES, R. C.; ASPINWALL, D. K.; RENEVIER, N. M.; TEER, D. G. The use of soft/lubricating coatings when dry drilling BS L168 aluminium alloy. **Surface and Coatings Technology**, v. 177, pp. 716-726, 2004.
- DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. São Paulo: Artliber Editora, 2006.

- FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Materiais**. 18. ed. São Paulo: Blücher, 2018.
- GROOVER, M. P. **Automation, production systems and computer integrad manufacturing**. New Jersey: Prentice-Hall; Upper Sadle River, 2007.
- INDAÇÃO FERRAMENTAS. Disponível em: <<https://www.grupoindaco.com.br/alargadores>>.
- KÖNIG, W.; KLOCKE, F. **Fertigungsverfahren Drehen. Fräsen, Bohren**, pp. 375-387, 1999.
- LOBO, L. **Estudo comparativo do comportamento entre brocas alargadoras e processo de alargamento na usinagem do ferro fundido cinzento GG30**. 2015. Dissertação (Mestrado) – Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015.
- MICHELETTI, G. F. **Mecanizado por arranque de viruta**. 2. Ed. Barcelona: Editorial Blume, 1980.
- MORAES, P. E. **Tecnologia Mecânica de Fabricação**. Mogi Morim: Faculdade de Tecnologia de Mogi Mirim, 2009. (Apostila)
- STEMMER, C. E. **Ferramentas de corte II: brocas, alargadores, ferramentas de roscar, fresas, brochas, rebolos e abrasivos**. Florianópolis: EdUFSC, 2005.
- STEMMER, C. E. **Ferramentas de corte I**. Florianópolis: EdUFSC, 2007.
- SOUZA, R. F. **Metrologia II**. Sorocaba: ETEc Rubens de Faria e Souza, 2013.
- SOUZA, C. S.; ARENCIBIA, R. V.; SATO, P. V. **Cálculo da incerteza nas medições de circularidade e de cilindridade com máquina de medir por coordenadas: um modelo simplificado**, 2011. Disponível em: <<https://silo.tips/download/calculo-da-incerteza-nas-medioes-de-circularidade-e-de-cilindridade-com-maquim>>.
- SCHROETER, R. B. et al. **Alargamento de precisão em alumínio aeronáutico com ferramentas de gume único regulável**. 1989. 113f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1989.
- VILLARROEL, J. C. **Análise Comparativa entre Furação com Brocas para Furos Curtos de Insertos Reversíveis e Brocas Helicoidais**. 1991. 112p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1991.

## **SOBRE OS AUTORES**

### **HENRIQUE AJUZ HOLZMANN**

Possui Graduação em Tecnologia em Fabricação Mecânica (2010) e Engenharia Mecânica (2013) pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Ponta Grossa, Mestrado em Engenharia de Produção (2014) pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Ponta Grossa e é doutorando em Engenharia de Materiais pela Universidade Estadual de Ponta Grossa, na área de Projeto Mecânico. Atualmente é Professor da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Guarapuava. Trabalhou por quatro anos em indústria na área de fabricação. Tem experiência na área de Usinagem e Soldagem, pesquisando temas referentes a desgaste superficial. [haholzmann@utfpr.edu.br](mailto:haholzmann@utfpr.edu.br)

### **CARLA LUIZA COSTA DOS SANTOS**

Graduanda em Engenharia Mecânica na Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Guarapuava. Desenvolveu trabalho de conclusão de curso na área de usinagem (comparativo entre processo de furação convencional e alargamento de furos). [carlaluiza\\_cs@hotmail.com](mailto:carlaluiza_cs@hotmail.com)

### **IGOR VILCZEK**

Possui Graduação em Engenharia Mecânica (2017) pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Guarapuava. Atualmente atua na área de projetos em manutenção em indústria do ramo de madeira. Desenvolveu trabalho de conclusão de curso na área de usinagem (comparação entre furação com brocas de diferentes geometrias). [igorvilczek@yahoo.com.br](mailto:igorvilczek@yahoo.com.br)

# APLICAÇÃO DAS TÉCNICAS DE ANÁLISES DE SINAIS VIBROACÚSTICAS E REDES NEURAIAS ARTIFICIAIS PARA A OPTIMIZAÇÃO E MODELADO DE PROCESSOS DE SOLDAGEM POR FRICÇÃO E AGITAÇÃO

HIPÓLITO DOMINGO CARVAJAL FALS

*Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Ponta Grossa - PR*

LUCIANO AUGUSTO LOURENÇATO

*Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Ponta Grossa - PR*

ANGEL SÁNCHEZ ROCA

*Universidad de Oriente – Santiago de Cuba, Cuba*

MARIO SÁNCHEZ OROZCO

*Universidad de Oriente – Santiago de Cuba, Cuba*

## 1 FUNDAMENTOS DO PROCESSO DE SOLDAGEM POR FRICÇÃO E AGITAÇÃO

O processo de soldagem por fricção e agitação conhecido como FSW (*Fiction Stir Welding*) foi criado no The Welding Institute (TWI), no Reino Unido, em 1991, sendo o processo uma técnica de união de estado sólido inicialmente aplicado a ligas de alumínio (THOMAS; NICHOLAS; NEEDHAM; MURCH et al., 1995). A realização do processo é relativamente simples: uma ferramenta rotativa não consumível com um ombro e pino especialmente projetados é inserida e movida ao longo da junta entre as duas placas a serem unidas (Figura 1). O material circundante é deformado plasticamente e transferido do lado frontal da ferramenta para o lado posterior, permitindo que as duas placas se unam em um estado sólido.

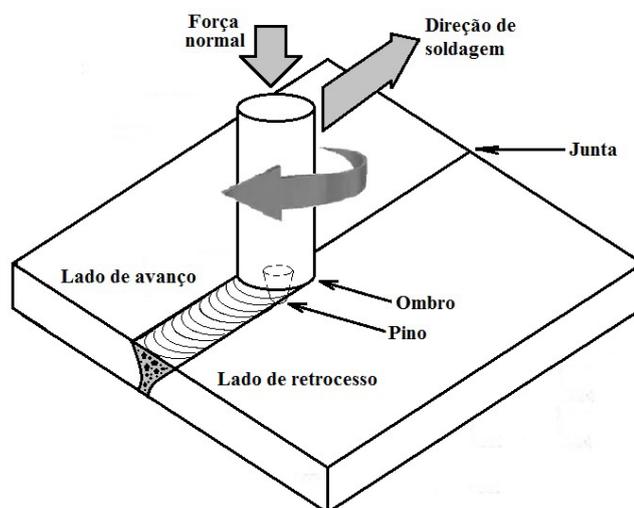


Figura 1: Representação esquemática do processo FSW

No esquema da Figura 1, a ferramenta gira no sentido horário e a direção de avanço da ferramenta é da esquerda para a direita, portanto, o lado de avanço é definido como aquele que está à esquerda, onde o sentido de rotação da ferramenta corresponde à direção de alimentação (direção oposta do fluxo de material); conseqüentemente, o lado posterior está à direita, onde a direção de rotação da ferramenta é oposta à direção de avanço, coincidindo com a direção do fluxo de material.

A ferramenta tem três funções fundamentais, que são aquecer a peça de trabalho, fazer com que o fluxo de material produza a junta e conter o material quente nos limites do ombro. O calor é gerado pelo atrito entre a peça de trabalho, pelo ombro e pino da ferramenta rotativa e também pela severa deformação plástica que a peça de trabalho sofre, ocasionando assim o amolecimento do material em torno do pino que, combinado com a rotação e translação de ferramenta, causa fluxo de material (MISHRA; MAHONEY, 2007).

Quando o processo é bem conduzido, obtém-se na junta soldada uma microestrutura recristalizada, composta por grãos finos e equidistantes, com excelentes propriedades mecânicas, resistência à fadiga, maior conformabilidade e excepcional superplasticidade (JATA; SEMIATIN, 2000; RHODES, 1997), constituindo uma das principais vantagens deste processo. Outras vantagens do processo FSW são a capacidade de unir materiais praticamente impossíveis de soldar por fusão; não requer consumíveis; a ausência de fusão, que resulta em menos contaminação da solda; necessidade de preparação mínima do material a ser soldado; alto controle de processo com alta produtividade e custos relativamente baixos. Além disso, é um processo de eficiência energética e baixo impacto ambiental (AKINLABI; AKINLABI, 2012).

Outra vantagem do processo FSW é a sua versatilidade, pois, embora tenha sido inicialmente criado para a soldagem de ligas de alumínio (MA; FENG; CHEN; SHEN, 2018), atualmente é usado na soldagem de compósitos com matrizes metálicas à base de: alumínio (SALIH; OU; SUN; MCCARTNEY, 2015), cobre e suas ligas (CEDERQVIST; ÖBERG, 2008), titânio e suas ligas (YOON; UEJI; FUJII, 2015), ligas de magnésio (JI; MENG; LIU; HUANG *et al.*, 2017), aços (LIU; NELSON, 2017), plásticos (ZAFAR; AWANG; KHAN, 2017), ligas Cu-Zn (HEIDARZADEH; SAEID; KLEMM, 2016) e na soldagem de materiais dissimilares (OUYANG; YARRAPAREDDY; KOVACEVIC, 2006), entre outros.

Ao contrário do processo tradicional de soldagem por fricção, que é limitado a pequenas peças simétricas que podem ser giradas e pressionadas juntas para formar a junta (CARY, 1988), o processo FSW pode ser aplicado a diferentes tipos de juntas, embora as duas configurações mais convenientes sejam topo e solapa (MISHRA; MA, 2005).

## 1.1 PARÂMETROS DO PROCESSO DE SOLDAGEM POR FRICÇÃO E AGITAÇÃO

Os processos FSW/FSP (*Friction Stir Processing*) envolvem movimento complexo de materiais e deformação plástica. Os parâmetros de soldagem, a geometria da ferramenta e o projeto da junta têm um efeito significativo nos padrões de fluxo do material e na distribuição da temperatura, influenciando também a evolução microestrutural do material. As variáveis mais importantes no processo FSW são (MISHRA; MA, 2005):

- Geometria da ferramenta;
- Velocidade de rotação da ferramenta;
- Velocidade de alimentação ou velocidade de soldagem;
- Força normal;
- Ângulo de inclinação da ferramenta;
- Profundidade de inserção do pino;
- Desenho da junta.

A seleção incorreta desses parâmetros resulta em soldas insatisfatórias devido a problemas operacionais e/ou metalúrgicos, como (BIRD; DUPUIS; LAMARRE, 2003): falta de penetração, falta de adesão, defeitos tipo “buracos de minhoca”, entre outros.

Os dois parâmetros mais importantes no processo FSW são a velocidade de rotação da ferramenta ( $\omega$ , rpm) e a velocidade de avanço da ferramenta ( $v$ , mm/min) ao longo da junta. A rotação da ferramenta provoca a agitação e mistura do material em torno do pino e a velocidade de translação move o material agitado do lado frontal para o lado reverso do pino, realizando o processo de soldagem (NANDAN; DEBROY; BHADESHIA, 2008).

Quanto maior a velocidade de rotação da ferramenta, maior a temperatura gerada, resultando em agitação e mistura mais intensas do material; deve-se notar, entretanto, que o atrito entre a superfície da ferramenta e o metal base determinará o aquecimento. Portanto, um aumento no aquecimento proporcional ao aumento na velocidade de rotação não é obtido, uma vez que o coeficiente de atrito na interface mudará (SATO; URATA; KOKAWA, 2002).

Como resultado de velocidades excessivas no processo, podem ser obtidas juntas soldadas com defeitos como túneis e “buracos de minhoca” (THREADGILL, 2007), daí a importância da seleção correta desses parâmetros.

## 1.2 FERRAMENTAS PARA PROCESSO DE SOLDAGEM POR FRICÇÃO E AGITAÇÃO

No processo FSW, a ferramenta produz a deformação termomecânica e o aquecimento por fricção da peça necessária para a agitação por fricção. Conforme explicado anteriormente (Figura 1), a ferramenta é composta pelo pino e o ressalto. O contato do pino com a peça provoca a deformação mecânica a que o metal plastificado é submetido durante o processo (MISHRA; MAHONEY, 2007). Os pinos podem ser cilíndricos ou cônicos, com ou sem rosca, quadrados, triangulares ou com geometrias complexas (Figura 2).

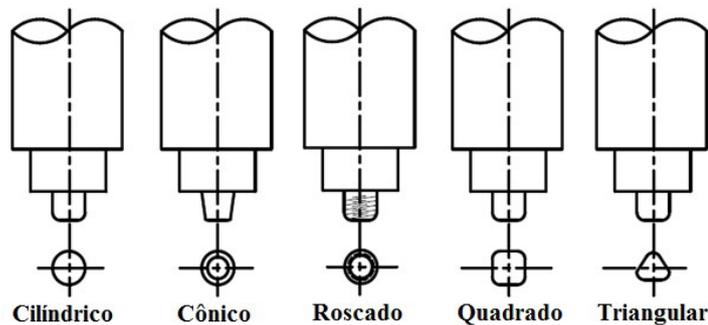


Figura 2: Perfis do pino da ferramenta para FSW (THOMAS; NICHOLAS; SMITH, 2001)

A maior parte do calor gerado durante o processo FSW vem do contato entre o ombro e a peça. O contato também é responsável por restringir a expulsão de material da região de solda, além de promover a movimentação do material ao redor do pino. Os ombros podem ser: planos, convexos ou côncavos (Figura 3).

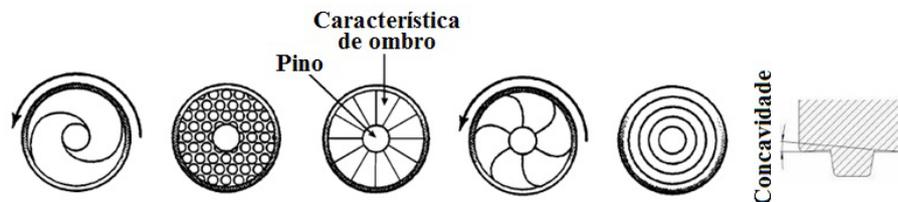


Figura 3: Geometrias do ombro da ferramenta, vista inferior  
Fonte: Thomas; Nicholas; Smith (2001).

De acordo com as pesquisas analisadas, a geometria da ferramenta afeta tanto a geração de calor quanto o escoamento plástico do material. O design da ferramenta varia de acordo com o material que precisa ser unido. A forma do pino da ferramenta deve garantir um fluxo de material que permita

a obtenção de juntas soldadas com boas propriedades mecânicas e sem defeitos (ARBEGAST, 2006; THOMAS; JOHNSON; WIESNER, 2003).

O desgaste da ferramenta é uma grande preocupação para o processo FSW, particularmente para soldagem de ligas de alta temperatura de fusão e dureza. Neste caso em específico, tem sido usadas ferramentas sinterizadas, as quais requerem uma combinação de água de resfriamento para remover o excesso de calor da ferramenta, porém sem influenciar no pré-aquecimento necessário do metal de base, ajudando na redução do desgaste da ferramenta (NANDAN; DEBROY; BHADSHIA, 2008).

### 1.2.1 MATERIAIS PARA FERRAMENTAS

A obtenção de soldas por fricção de boa qualidade requer a seleção de materiais adequados para a ferramenta, o que evita a instabilidade dimensional da ferramenta devido ao desgaste ou, pior, fraturas (MISHRA; MAHONEY, 2007). Vários fatores são considerados na seleção do material da ferramenta, mas o material da peça desempenha um papel fundamental.

Além das propriedades físicas do material da ferramenta, outras considerações práticas precisam ser levadas em consideração para sua seleção. Por exemplo, resistência mecânica e estabilidade em altas temperaturas, resistência ao desgaste, tenacidade, usinabilidade e, não menos importante, a disponibilidade do material, entre outros (MISHRA; MAHONEY, 2007).

Entre os materiais mais utilizados estão os aços ferramenta (H13), carboneto de tungstênio (WC), nitreto de boro policristalino cúbico (PCBN) etc.

### 1.3 GERAÇÃO DE CALOR E FLUXO DE MATERIAL DURANTE O PROCESSO FSW

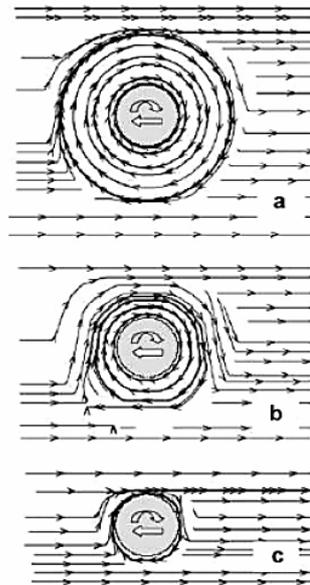
No FSW, o calor é gerado por uma combinação de fricção e dissipação devido à deformação plástica do material. O mecanismo dominante de geração de calor é influenciado pelos parâmetros de soldagem, pela condutividade térmica da peça e pela geometria da ferramenta (MISHRA; MAHONEY, 2007). Várias investigações mostram que a maior geração de calor ocorre na interface ombro/peça (TANG; GUO; MCCLURE; MURR et al., 1998).

A soldagem por fricção e agitação ocorre como resultado de intensa deformação plástica e aumento da temperatura dentro e ao redor da zona de agitação. Isso produz evolução microestrutural significativa, incluindo tamanho de grão, características de contorno de grão, dissolução e espessamento de precipitados e mudança na textura. Uma compreensão dos fenômenos mecânicos e térmicos durante o processo FSW é necessária para alcançar a otimização dos parâmetros do processo, controle da microestrutura e propriedades da solda.

O fluxo de material durante o processo FSW é bastante complexo e depende da geometria da ferramenta, dos parâmetros do processo e do material a ser soldado. Conhecer as características do fluxo de material é de grande importância prática para o projeto ideal da ferramenta e para obtenção de soldas de alta eficiência estrutural (MISHRA; MA, 2005).

Um dos métodos adotados para o estudo experimental do fluxo de material em FSW é o uso de materiais marcadores como traços, com ligas de alumínio que não sejam metais básicos (SEIDEL; REYNOLDS, 2001), lamelas de cobre (GUERRA; SCHMIDT; McCLURE; MURR et al., 2002), pequenas bolas de aço (COLLIGAN, 1999), materiais compósitos (JATA; MAHONEY; MISHRA; LIENE, 2010) e arames de tungstênio (RUBISOFF; SCHNEIDER; NUNES JR, 2009).

Três tipos de fluxo afetam o transporte total de material num estado plástico durante o processo FSW. O primeiro, que ocorre próximo à ferramenta, está associado ao material plastificado que gira em torno da ferramenta. É controlado por sua rotação e atrito ferramenta-material (Figura 4a). O segundo, produzido pelo movimento para baixo do pino adjacente a ele, induz um fluxo ascendente equivalente de material um pouco mais longe do pino (Figura 4b). Por fim, o fluxo provocado pelo movimento relativo entre a ferramenta e o material (Figura 4c). O movimento completo do material plastificado e a formação do cordão resultam da interação simultânea desses três efeitos (REYNOLDS, 2000).



**Figura 4: Traços de fluxo em diferentes planos horizontais: a) 0,35 mm, b) 1,59 mm e c) 2,28 mm abaixo da superfície.**

**Fonte: Reynolds, 2000.**

#### 1.4 PERFIS MACRO Y MICROESTRUTURAIS DA JUNTA SOLDADA POR FSW

Três zonas microestruturais efetivas, devido à ocorrência dos diferentes fluxos de material e mudanças de temperatura associadas, foram identificadas por Threadgill (2007): o núcleo (ZN), a zona termomecânica afetada (ZTMA) e a zona termicamente afetada (ZTA). A Figura 5 mostra o perfil de uma junta de solda de topo realizada na liga AA1050, onde essas três zonas são identificadas (OROZCO; FALS; ROCA, 2013).



**Figura 5: Seção transversal de uma junta soldada da liga AA1050 por FSW**

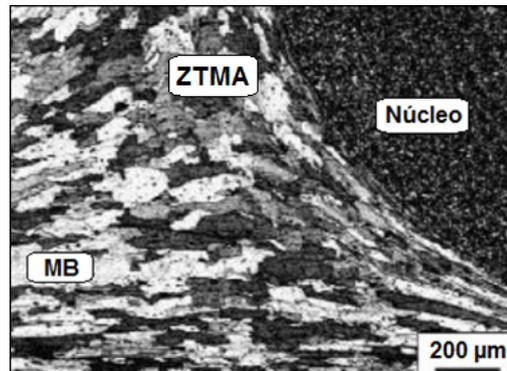
**Fonte: Orozco; Fals; Roca (2013).**

O perfil consiste em um trapézio invertido, composto pela ZTA, onde o material não sofre deformação plástica, mas sim a influência do calor gerado durante o processo, causando algumas alterações microestruturais. No contorno temos a ZTMA, onde o material se deformou e também sofreu a influência do calor. Por último, temos o núcleo, que é a área recristalizada. Além disso, observamos metal de base inalterável (MB), onde não há mudança nas propriedades e na microestrutura do metal de base (Figura 5).

O centro da solda, comumente referido como a zona central (ZN), consiste em uma microestrutura muito fina, variando de 1 a 7  $\mu\text{m}$  (SUTTON; REYNOLDS; YAN; YANG et al., 2006). A maioria dos limites de grão dentro do núcleo tem ângulos largos (a desorientação entre os grãos, sendo maior do que  $15^\circ$ ), e estima-se que seja formada a partir da recristalização dinâmica durante o processo de

agitação. A largura do núcleo depende da combinação do design da ferramenta, dos parâmetros de soldagem e da composição da liga (KARLSEN; FRIGAARD; HJELEN; GRONG et al., 2003).

A ZTMA é uma zona de transição entre o MB e o núcleo, inerente apenas aos processos FSW/FSP. Uma micrografia típica do ZTMA é mostrada na Figura 6.



**Figura 6: Microestrutura da ZTMA no processo FSP da liga AA7075**  
**Fonte: Mahoney; Rhodes; Flintoff; Bingel et al. (1998).**

ZTMA é caracterizada por alta deformação estrutural. Os grãos alongados do metal base foram deformados em um padrão de fluxo para frente ao redor do núcleo. Embora ZTMA sofra deformação plástica, a recristalização não ocorre devido à carga de deformação insuficiente (RHODES; MAHONEY; BINGEL; SPURLING et al., 1997). No entanto, a dissolução de alguns precipitados já foi observada devido à exposição a altas temperaturas durante o processo (SU; NELSON; MISHRA; MAHONEY, 2003).

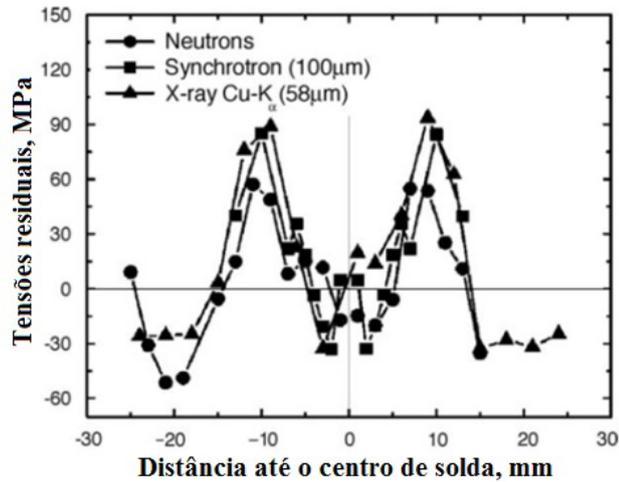
Em torno da ZTMA está a ZTA. Nesta zona ocorre um ciclo térmico, mas não há nenhuma deformação plástica. Sato et al. (1999) definiram a ZTA como uma zona que alcança temperaturas acima de 250 °C para ligas de alumínio com tratamento térmico. O ZTA retém a mesma microestrutura do metal base. No entanto, a exposição térmica acima de 250 °C tem um efeito significativo na estrutura dos precipitados.

## **1.5 PROPRIEDADES MECÂNICAS NA SOLDAGEM SOLDADURA POR FRICÇÃO E AGITAÇÃO**

### **1.5.1 TENSÕES RESIDUAIS**

Embora seja frequentemente assumido que as tensões residuais são mais baixas nas juntas FSW devido à ausência de transformação líquido-sólido, a fixação rígida a que a peça é submetida exerce uma grande limitação na contração da junta durante o resfriamento, superior à maioria dos sistemas usados em processos de soldagem convencionais. A consequência dessa limitação é a geração de cargas residuais tanto no sentido longitudinal quanto no transversal, que podem posteriormente influenciar nas propriedades da solda, principalmente no comportamento de propagação de trincas por fadiga (GHIDINI; DALLE DONNE, 2009; JAMES; HATTINGH; HUGHES; WEI et al., 2004).

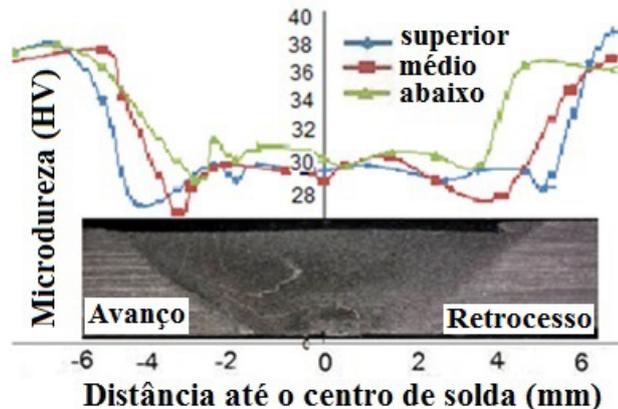
Peel et al. (2003) afirmaram que a distribuição das tensões residuais longitudinais e transversais é na forma de um M. A Figura 7 mostra os perfis característicos da distribuição das tensões residuais longitudinais obtidas por diferentes métodos na soldagem FSW de AA6013-T6.



**Figura 7: Distribuição das tensões residuais longitudinais em FSW de ligas AA6013-T6**  
**Fonte: Peel; Steuwer; Preuss; Withers, 2003.**

### 1.5.2 MICRODUREZA

Vários pesquisadores relataram os perfis de microdureza da soldagem FSW para diferentes materiais (EHRSTROM; BIGOT; CERVI; GERARD, 2003; PAGLIA; BUCHHEIT, 2006; SVENSSON; KARLSSON; LARSSON; KARLSSON et al., 2000). A tendência é obter uma distribuição de dureza em forma de W na junta soldada, com valores mínimos no ZTA em torno da interface ZTA/ZTMA, dependendo do material, da temperatura e da taxa de deformação (Figura 8).



**Figura 8: Perfil de distribuição de microdureza em junta soldada da liga AA1050 obtida por FSW**  
**Fonte: Orozco; Fals; Roca (2013).**

Devido à assimetria das zonas de solda em relação à linha central da junta e ao plano de espessura média, espera-se que a distribuição de dureza varie com a profundidade, ou seja, a distribuição de dureza na face superior da solda seria diferente no meio da seção transversal ou na raiz. É importante estabelecer uma referência fixa para a localização da distribuição do perfil de dureza (KHALED, 2005).

### 1.5.2 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

A eficiência da junta de solda é geralmente usada como um indicador da qualidade da solda, sendo definida como a razão entre a resistência à tração da junta de solda e a do metal base. Pesquisas realizadas revelam que a eficiência da soldagem por FSW está na faixa de 67 a 119% (SATO; KOKAWA, 2001; YAN; REYNOLDS, 2009), valores significativamente maiores do que aqueles obtidos por processos convencionais de soldagem por fusão.

### 1.5.3 RESISTÊNCIA À FADIGA

Para muitas aplicações, tais como estruturas aeroespaciais, veículos de transporte, plataformas e construção de pontes, as propriedades de fadiga são críticas. Portanto, é importante compreender as características de fadiga na soldagem por fricção e agitação devido à ampla gama de aplicações de engenharia desta técnica. Isso tem levado a um aumento do interesse em pesquisas para a avaliação do comportamento à fadiga em juntas soldadas FSW, incluindo o comportamento da resistência quanto ao número de ciclos até a falha (R-N) (BUSSU; IRVING, 2003; KAINUMA; KATSUKI; IWAI; KUMAGAI, 2008) e o comportamento da propagação da fratura por fadiga (HE; YANG; LIU; WANG et al., 2017; LI; GAO; LI, 2018).

Em estudo comparativo realizado com a liga de alumínio AA6005-T5, observou-se que a resistência à fadiga da junta soldada por FSW é superior à soldagem com gás inerte (MIG) e laser. Este resultado foi repetido para outros materiais testados (LI; GAO; LI, 2018).

### 1.5.4 RESISTÊNCIA À CORROSÃO

Como abordado anteriormente, a soldagem por fricção e agitação resulta na geração de várias zonas microestruturais. Essas zonas apresentam diferentes características microestruturais, tais como: tamanho de grão, tensões residuais, tamanho e distribuição de precipitados. Portanto, espera-se que cada zona microestrutural exiba uma susceptibilidade diferente à corrosão.

Vários autores (FRANKEL; XIA, 1999; HU; MELETIS, 2000; PAO; GILL; FENG; SANKARAN, 2001) chegaram a conclusões semelhantes no estudo da corrosão em juntas soldadas por FSW. É relatado que a ZTA, adjacente à ZTMA, é a área mais suscetível ao ataque corrosivo e que este ataque é predominantemente intergranular. Os autores relatam ainda que, em comparação com o metal base, as regiões suscetíveis à corrosão são caracterizadas por uma ampla zona livre de precipitados, nas bordas dos grãos, bem como precipitados reforçados dentro dos grãos.

## 2 MODELAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE SOLDAGEM POR FRICÇÃO E AGITAÇÃO (FSW)

Durante a última década, a aplicação de programas computacionais avançados para simulação numérica, juntamente com o desenvolvimento de meios computacionais, levou à obtenção de modelos do processo FSW. Como resultado, a otimização dos parâmetros do processo tem sido possível, o que reverte para produtos de maior qualidade (TUTUM; HATTEL, 2011). Uma das técnicas mais utilizadas é o método dos elementos finitos (BUFFA; CAMPANELLA; FRATINI, 2013; ZHANG; WAN, 2012). Porém, com o uso desse método, é altamente complexo determinar parâmetros como momento, força e temperatura durante o processo.

A aplicação de técnicas não invasivas na caracterização de processos de fabricação é uma alternativa cada vez mais utilizada (MACÍAS; ROCA; FALS; FERNÁNDEZ et al., 2010; ZHANG; WAN, 2012)2010; ZHANG; WAN, 2012. Dentre elas, as técnicas de monitoramento dos sinais vibroacústicos gerados durante o processo são de particular interesse da comunidade científica internacional. Essas técnicas se caracterizam por fornecer uma representação mais precisa do comportamento dos fenômenos que ocorrem nos processos, embora requeira análises complexas.

Vários autores têm aplicado técnicas de análise de sinais vibroacústicos na caracterização do processo FSW (FERNÁNDEZ; ROCA; FALS; MACÍAS et al., 2012; JIMÉNEZ-MACÍAS; SÁNCHEZ-ROCA; CARVAJAL-FALS; BLANCO-FERNÁNDEZ et al., 2014). A maior parte do trabalho está focada na obtenção das propriedades mecânicas ideais da junta soldada a partir da otimização dos parâmetros do processo. Outra pesquisa mostra o uso de técnicas de análise de sinais vibroacústicos e inteligência artificial na modelagem e otimização do processo FSW (COLMENERO; OROZCO; MACÍAS; FERNÁNDEZ et al., 2019; OROZCO; MACÍAS; ROCA; FALS et al., 2013).

A inteligência artificial, e especificamente as redes neurais artificiais (RNA), oferecem inúmeras vantagens e justificam sua aplicação em múltiplas áreas (ROCA, 2006). Existem vários relatos

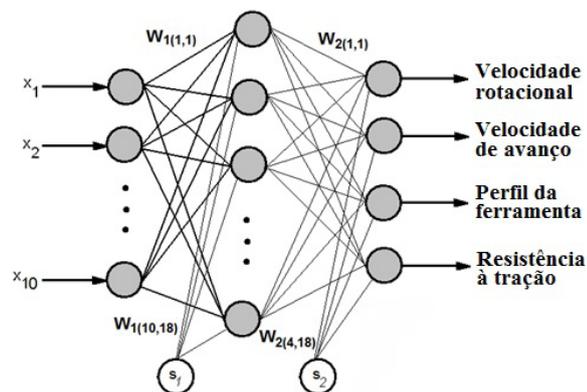
da aplicação desta técnica na área de soldagem (KALYANASUNDARAM; MUKHOPADHYAY; RAJAGOPALAN; RAJ, 2005; LI; SIMPSON; RADOS, 2000), e particularmente no processo FSW (BARAD; RAMAIAH; GIRIDHAR; KRISHNAIAH, 2012; BOLDSAIXHAN; CORWIN; LOGAR; ARBEGAST, 2011).

## 2.1 APLICAÇÃO DE REDES NEURAIS ARTIFICIAIS E TÉCNICAS DE ANÁLISES DE SINAIS NA MODELAGEM DO PROCESSO FSW

As redes neurais do tipo perceptron multicamadas (MLP) estão entre as mais utilizadas e desenvolvidas desde o início nas aplicações em engenharia, devido à sua capacidade de resolver problemas complexos de modelagem e generalização, que nada mais é do que a facilidade de dar resultados satisfatórios a entradas que o sistema nunca viu em sua fase de treinamento (ROCA; FALS; FERNANDEZ; MACIAS et al., 2009).

A estrutura de uma RNA é determinada pelo número de camadas e pelo número de nós em cada uma delas. Uma rede de retropropagação (BP), especificamente uma rede BP padrão, é composta de três camadas, conforme mostrado na Figura 9.

O sistema possui três camadas, que são: a camada de entrada, a camada oculta e a camada de saída. A camada de entrada é composta por vários nós que reúnem todos os fatores de entrada. Os valores de entrada definidos são nomeados como  $x_1$  a  $x_n$ .



**Figura 9: Topologia da RNA de retro propagação estandar**  
Fonte: Orozco; Fals; Roca (2013).

As informações da camada de entrada são então processadas durante a passagem pela camada oculta. Cada neurônio na camada oculta está conectado a todos os nós da camada anterior por meio de um conjunto de links ponderados ( $W_1$ ). Esta soma ponderada é passada por uma função de ativação não linear para produzir o vetor de saída ( $y$ ) na faixa de 0 a 1. A equação (1) mostra a função de saída da RNA, onde  $W_1$  e  $W_2$  representam as matrizes de ponderação de neurônios de entrada ocultos e neurônios de saída ocultos, respectivamente;  $s_1$  e  $s_2$  representam os vieses de cada um dos neurônios na camada oculta e na camada de saída, e  $x$  representa o vetor de entrada da rede.

$$y = f(W_2(f(W_1x + s_1) + s_2)) \quad | \quad (1)$$

A função de transferência para todos os neurônios ocultos são funções tangentes sigmóides, conforme mostrado na equação (2).

$$f(x) = \frac{\exp(x) - \exp(-x)}{\exp(x) + \exp(-x)} \quad (2)$$

Determinar o número de neurônios ocultos é fundamental no projeto de redes neurais. Um superdimensionamento de neurônios ocultos oferece muita flexibilidade, o que geralmente leva a um superajuste. Por outro lado, um número muito pequeno de neurônios ocultos restringe a capacidade de aprendizado da rede e degrada seu desempenho de aproximação.

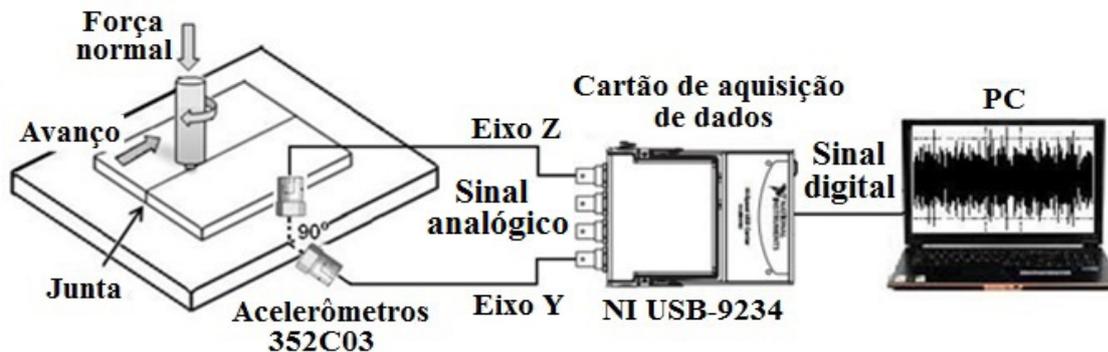
Para determinar o número inicial de neurônios na camada oculta, dois critérios são usados: a Regra da Pirâmide e a Regra baseada em algoritmos genéticos. Finalmente, este número é definido a partir de uma sequência de retreinamento até que o número ideal seja alcançado (OROZCO; FALS; ROCA, 2013).

As funções de transferência para os neurônios de saída são funções lineares, conforme mostrado na equação (3).

$$f(x) = x \quad (3)$$

A metodologia descrita anteriormente foi aplicada na modelagem do processo FSW de chapas de alumínio AA1050 H24 de 3 mm de espessura. Como entradas para o modelo baseado em RNA, foram utilizados os parâmetros obtidos a partir da caracterização dos sinais temporais e sua decomposição pela aplicação da Transformada Wavelet Discreta (TDW) da emissão vibroacústica (EA) gerada durante o processo.

A Figura 10 mostra a instalação experimental utilizada para a realização dos testes, composta por uma fresadora CNC com controle de posição nos três eixos, duas ferramentas, dois acelerômetros piezoelétricos, uma placa de aquisição de dados NI USB-9234 e um computador. A velocidade de rotação da ferramenta ( $\omega$ ), a taxa de avanço ( $v$ ) e a geometria da ferramenta ( $h$ ) foram selecionadas como variáveis de processo. A força axial durante o processo foi mantida constante.



**Figura 10: Representação esquemática da instalação experimental**

**Fonte: Orozco; Fals; Roca (2013).**

A decomposição do sinal em diferentes bandas de frequência foi obtida aplicando-se a filtragem passa-alta e passa-baixa sucessiva do sinal no domínio do tempo. O sinal original  $x[n]$  é inicialmente passado por um filtro passa-alto  $a[n]$  e um filtro passa-baixo  $h[n]$ . Após a filtragem, de acordo com a regra de Nyquist, o sinal pode ser sub-amostrado por um fator 2. Este constitui um nível de decomposição e é expresso matematicamente pelas equações (4) e (5):

$$y_{\text{alto}}[k] = \sum_n x[n] \cdot a[2k - n] \quad (4)$$

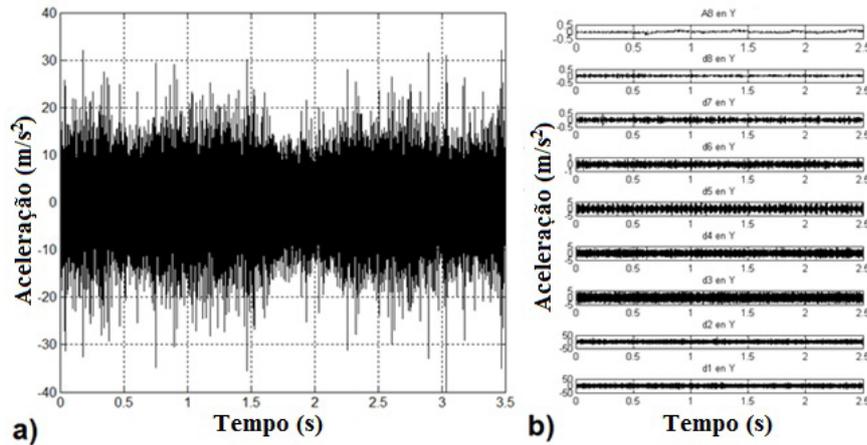
$$y_{\text{baixo}}[k] = \sum_n x[n] \cdot h[2k - n] \quad (5)$$

Onde:  $y_{\text{alto}}[k]$  e  $y_{\text{baixo}}[k]$  são as saídas dos filtros passa-alto e passa-baixo, respectivamente, depois da amostragem por 2 (CHEN; KOVACEVIC; JANDGRIC, 2003).

Nesse caso, a aplicação do TDW equivale ao resultado da passagem dos sinais do EA para cada condição experimental. Os sinais A8 e D1-D8 correspondentes ao resultado da passagem dos sinais EA por um filtro passa-baixo com largura de banda resultante seriam obtidos de [0-100 Hz] para A8 e de [100; 200 Hz], [200;400 Hz], [400; 800 Hz], [800 Hz; 1,6 kHz], [1,6; 3,2 kHz], [3,2; 6,4 kHz], [6,4; 12,8 kHz], y [12,8; 25,6 kHz] para os casos de D8 a D1, respectivamente.

O resultado da aplicação de ANOVA a todos os sinais vibroacústicos mostra que apenas alguns índices estatísticos foram influenciados por mudanças nos níveis dos parâmetros. Neste caso, o valor da Mediana de A8 (MedA8) e os valores RMS para todas as faixas de frequência.

A Figura 11a mostra os gráficos do sinal EA, já filtrado, correspondendo à condição experimental com  $\omega = 450$  rpm e  $v = 40$  mm/min. A Figura 11b mostra os gráficos obtidos como resultado da aplicação de TDW a este sinal.



**Figura 11: a) Sinal temporal de EA; b) TDW das bandas de frequências selecionadas**  
**Fonte: Orozco; Fals; Roca (2013).**

A Tabela 1 mostra as dez entradas escolhidas ( $x_1 \dots x_{10}$ ) para obter o modelo de RNA. Os insumos definidos apresentaram grupos significativamente diferentes quando confrontados com mudanças nos níveis dos parâmetros do processo FSW, como resultado da ANOVA realizada.

Entrada	Parâmetro de la señal de EA	Símbolo
$x_1$	RMS de la Señal Vibro-acústica	$RMS_G$
$x_2$	RMS de A8 (TDW)	$RMS_{A8}$
$x_3$	Mediana de A8 (TDW)	$Med_{A8}$
$x_4$	RMS de D8 (TDW)	$RMS_{D8}$
$x_5$	RMS de D7 (TDW)	$RMS_{D7}$
$x_6$	RMS de D5 (TDW)	$RMS_{D5}$
$x_7$	RMS de D4 (TDW)	$RMS_{D4}$
$x_8$	RMS de D3 (TDW)	$RMS_{D3}$
$x_9$	RMS de D2 (TDW)	$RMS_{D2}$
$x_{10}$	RMS de D1 (TDW)	$RMS_{D1}$

**Tabela 1: Entradas da RNA**

As RNAs, como a usada, requerem treinamento antes de serem utilizadas para seus fins definidos. O treinamento permitirá que calcular os pesos e vieses da RNA, a fim de alcançar a relação desejada entre entradas e saídas. Levando isso em consideração, o RNA foi treinado com 170 padrões retirados aleatoriamente da amostra experimental. Como saída do RNA, foram utilizadas a velocidade de rotação da ferramenta, a velocidade de avanço, o perfil da ferramenta e a resistência à tração.

O treinamento da rede perceptron multicamadas foi realizado de forma supervisionada e por meio da utilização do método de retropropagação de erros. Foram utilizados os algoritmos de treinamento gradiente descendente com momentum e o algoritmo Levenberg-Marquardt (LM).

A Figura 12 mostra as curvas de erro obtidas durante o processo de treinamento (linha azul) para cada um dos algoritmos avaliados, utilizando uma topologia de oito entradas, uma camada oculta com 18 nós e quatro neurônios de saída, ou seja, uma topologia (10-18-4).

A avaliação do RNA mostrou que o algoritmo LM apresentou um erro final inferior. Levando isso em consideração, a operação do modelo baseado em RNA é governada pelas equações (6), (7), (8) e (9), conforme mostrado abaixo:

$$\omega = N_1W_{2(1,1)} + N_2W_{2(1,2)} + N_3W_{2(1,3)} + N_4W_{2(1,4)} + \dots + N_{18}W_{2(1,18)} + s_{2(1,1)} \quad (6)$$

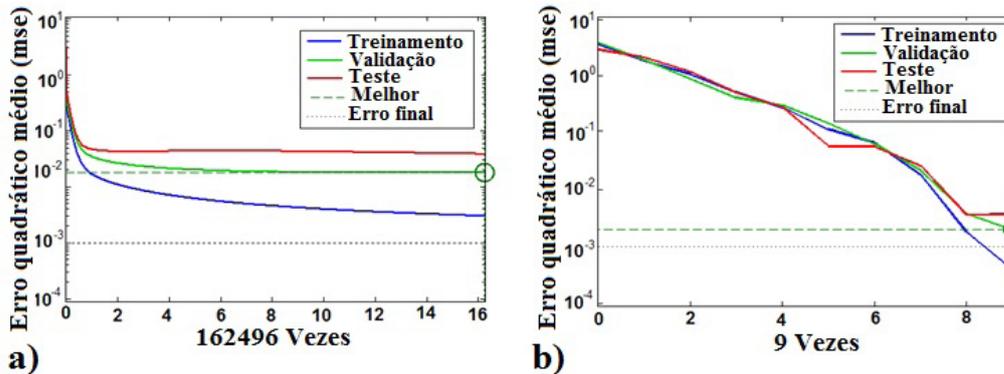
$$v = N_1W_{2(2,1)} + N_2W_{2(2,2)} + N_3W_{2(2,3)} + N_4W_{2(2,4)} + \dots + N_{18}W_{2(2,18)} + s_{2(2,1)} \quad (7)$$

$$h = N_1W_{2(3,1)} + N_2W_{2(3,2)} + N_3W_{2(3,3)} + N_4W_{2(3,4)} + \dots + N_{18}W_{2(3,18)} + s_{2(3,18)} \quad (8)$$

$$R_m = N_1W_{2(4,1)} + N_2W_{2(4,2)} + N_3W_{2(4,3)} + N_4W_{2(4,4)} + \dots + N_{18}W_{2(4,18)} + s_{2(4,18)}. \quad (9)$$

Onde:

$$N_i = f(W_{1(i,i)}x + s_{1(i,i)}) \quad i = 1, 2, 3, 4, \dots, 18$$



**Figura 12: Curvas de erro durante ou treinamento. a) Método do gradiente descendente com momento, b) algoritmo de Levenberg-Marquardt**  
**Fonte: Orozco; Fals; Roca (2013).**

O teste do modelo de rede neural foi desenvolvido por meio do uso de novos conjuntos de dados (30) para validar sua generalização. Uma vez obtidos os valores dos pesos e vieses, eles foram substituídos nas equações (6-9), que regem o funcionamento da RNA.

Como pode ser visto na Figura 12, ao aplicar o algoritmo de treinamento LM (Figura 12b), melhores resultados são obtidos (mse = 0,00196) do que com o uso do algoritmo de gradiente descendente (mse = 0,01775), além de ser feito com economia de tempo considerável. Os valores obtidos na saída do RNA foram introduzidos na etapa de pós-processamento para se alcançar os valores reais dos parâmetros do processo e da resistência à tração das juntas soldadas que foram obtidas.

A grande vantagem dos valores obtidos com a utilização do RNA está na sua capacidade de estimar novos valores dos parâmetros do processo e da resistência à tração, com base em sinais vibroacústicos, utilizando sua generalização e obtendo, assim, juntas soldadas de ótima qualidade.

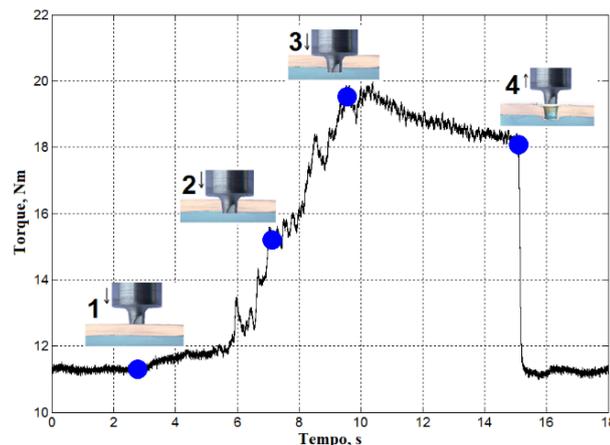
## 2.2 MODELAGEM DO PROCESSO DE SOLDAGEM POR FRICÇÃO E AGITAÇÃO POR PONTOS (FSSW)

O processo de soldagem por fricção e agitação por ponto (*Friction Stir Spot Welding* –FSSW) é uma variante do processo FSW com grande potencial como substituto do processo de soldagem por resistência elétrica a ponto. Este método permite a junção de chapas sem deslocamento da ferramenta, estabelecendo assim uma opção viável para as indústrias automotiva e aeroespacial (MUBIAYI; AKINLABI, 2015).

Ao usar o processo FSSW, a resistência da solda é influenciada pelos parâmetros do processo (velocidade de rotação da ferramenta, profundidade de penetração, geometria da ferramenta e tempo de espera). Se o projeto da ferramenta não variar, então o tempo de espera e a velocidade de rotação da ferramenta serão os principais parâmetros do processo.

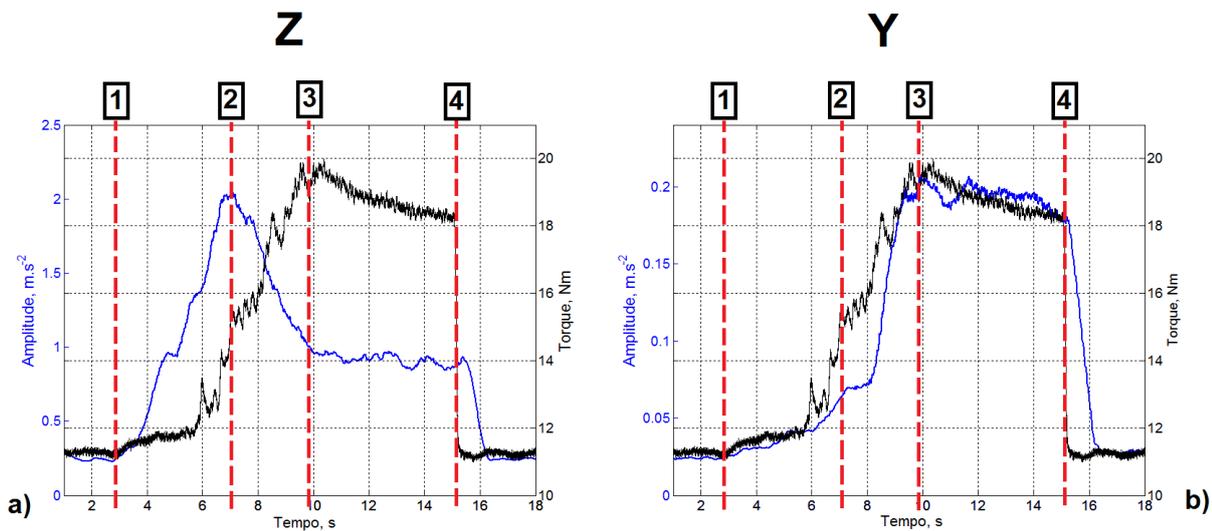
A modelagem e otimização desse processo aplicando técnicas de ensaios não destrutivos, como o monitoramento dos sinais vibroacústicos gerados durante a obtenção das juntas soldadas, têm demonstrado a alta sensibilidade dessas técnicas a mudanças nos parâmetros do processo (FERNÁNDEZ; ROCA; FALS; MACÍAS et al., 2012; MACÍAS; ROCA; FALS; MURO et al., 2015).

Macías et al. (2015) foram capazes de caracterizar as quatro etapas que ocorrem durante o processo FSSW de soldagem dissimilar Al-Cu (Figura 13), por meio da aplicação de técnicas de análise de sinal vibroacústico. A primeira etapa ocorre quando a ferramenta faz contato com a peça. A segunda etapa começa a partir do momento em que o pino penetra na peça. Na terceira etapa, a ferramenta está em contato total com a peça, e a quarta está relacionada à finalização do processo de soldagem e à retirada da ferramenta da peça.



**Figura 13: Etapas do processo FSSW em função do torque da ferramenta**  
**Fonte: Macías; Roca; Fals. Muro et al. (2015).**

Os autores correlacionaram a envolvente do sinal vibroacústico gerado durante o processo, na frequência de 5 a 7 kHz, e a correlação com o sinal de torque da ferramenta (Figura 14). Os resultados obtidos mostraram que existe uma forte relação linear entre o torque da ferramenta e os níveis da envolvente do sinal vibroacústico.



**Figura 14: Evolução do sinal vibroacústico e torque; a) eixo vertical, b) eixo horizontal**  
**Fonte: Macías; Roca; Fals; Muro et al. (2015).**

### 2.3 OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO FSSW APLICANDO A ENERGIA DO SINAL VIBROACÚSTICO

O trabalho de Macías et al. (2015) permitiu o desenvolvimento de uma nova metodologia para prever as propriedades mecânicas de junta soldada dissimilar Al-Cu, a partir da energia do sinal vibroacústico e tomando a relação convolução-torque obtida por esses autores e aplicando a equação (10), definida por Khan et al. (2007). Para o cálculo da energia aplicada durante o processo FSSW, foi obtida a expressão da energia da envolvente do sinal vibroacústico gerado durante o processo – equação (11).

$$Q = \sum_{n=1}^N F(n) \cdot [x(n) - x(n-1)] + \sum_{n=1}^N T(n) \cdot \omega(n) \cdot \Delta t \quad (10)$$

$$EVS = \int_{n=1}^N |z(t)|^2 dt + \int_{n=1}^N |y(t)|^2 dt \quad (11)$$

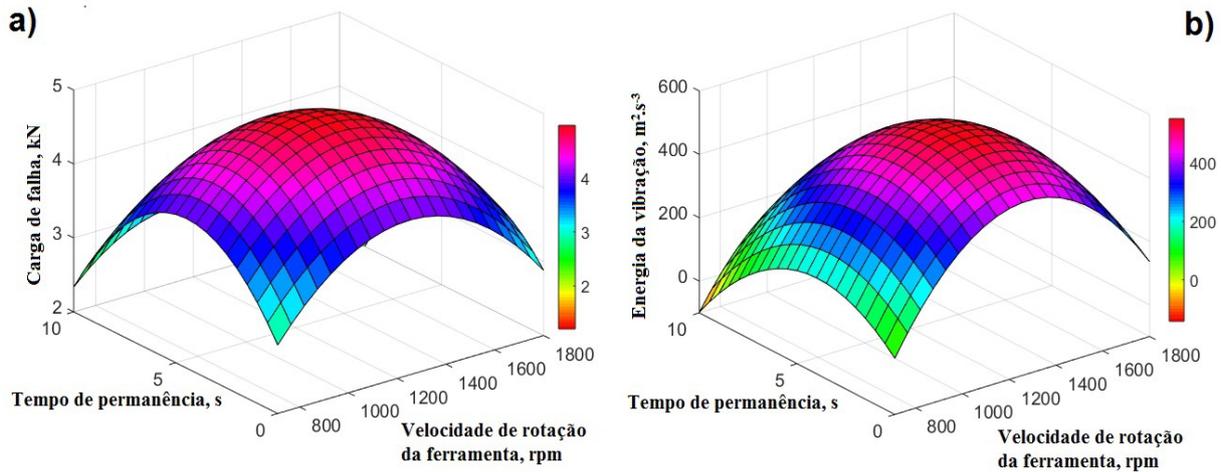
Onde:

$z(t)$  e  $y(t)$  são as componentes da aceleração da vibração gerada durante o processo no eixo vertical  $z$  e horizontal  $y$ , respectivamente.

A otimização do processo FSSW com base na energia do sinal vibroacústico gerado durante o processo visa à obtenção de uma configuração dos parâmetros do processo que permita obter os valores desejados das respostas do modelo. Neste caso, as respostas do modelo são definidas como a resistência ao cisalhamento da junta soldada (SFL) e a energia do involuto do sinal (EVS). As variáveis – independentes do modelo – são a velocidade de rotação da ferramenta e o tempo de espera (COLMENERO; OROZCO; MACÍAS; FERNÁNDEZ et al., 2019).

Como neste estudo duas variáveis de saída são analisadas, o método de superfície de resposta (RSM) foi selecionado, especificamente o método de otimização de resposta múltipla. Este método permite obter uma configuração dos fatores experimentais para as características desejadas de uma ou mais variáveis de resposta por intermédio da construção da função de desejabilidade composta.

O primeiro passo é obter as superfícies de resposta para cada uma das variáveis independentes analisadas. A Figura 15 mostra os gráficos de superfície de resposta para ambas as variáveis, a resistência ao cisalhamento da junta soldada (SFL) e a energia do sinal involuto (EVS).



**Figura 15: Gráficos de superfície de resposta; a) SFL, b) EVS**  
**Fonte: Colmenero; Orozco; Macías; Fernández et al. (2019).**

A análise da Figura 15 mostra a semelhança entre as superfícies obtidas para ambas as respostas. Fica evidente que os maiores valores de SFL correspondem aos maiores valores de EVS, portanto, pode-se dizer que existe uma forte relação entre os dois. Se for garantido que o processo é conduzido na faixa dos valores mais elevados de EVS, serão obtidas juntas soldadas de alta resistência (SFL) e, portanto, de boa qualidade.

Os modelos matemáticos dos quais foram obtidos os gráficos de superfície de resposta apresentados na Figura 15, que permitem prever os valores SFL e EVS, são regidos pelas equações (12) e (13), respectivamente.

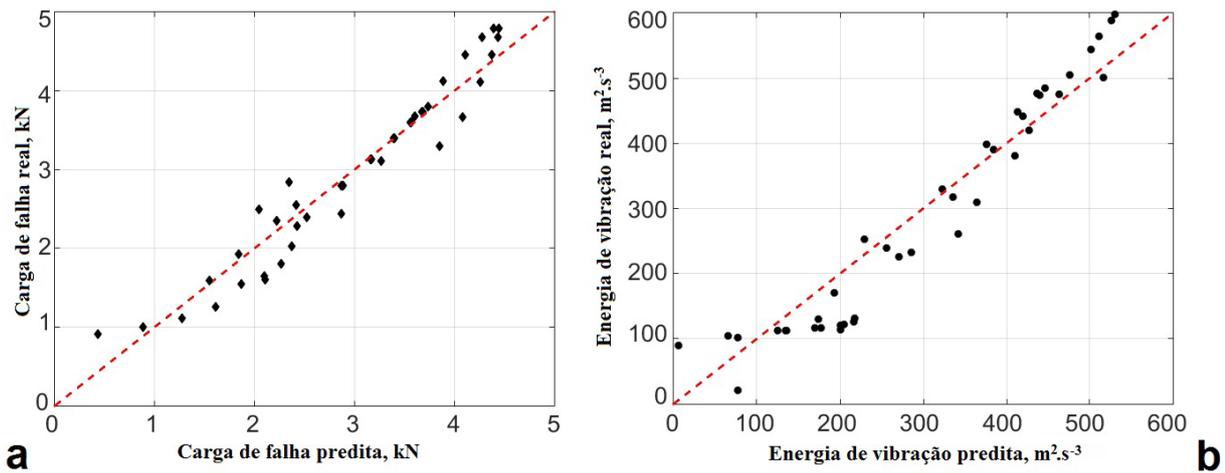
$$SFL = -2.158 + 0.562DT - 0.055DT^2 - 0.0001DT \cdot TRS + 0.01TRS - 0.000004TRS^2 \quad (12)$$

$$EVS = -1418.25 + 70.533DT - 8.142DT^2 - 0.009DT \cdot TRS + 2.916TRS - 0.001TRS^2 \quad (13)$$

A partir de uma análise de variância (ANOVA) realizada, determinou-se que o parâmetro do processo que mais influencia as variáveis de resposta investigadas foi a velocidade de rotação da ferramenta. O tempo de residência não exerceu influência estatisticamente significativa nos valores de SFL e EVS.

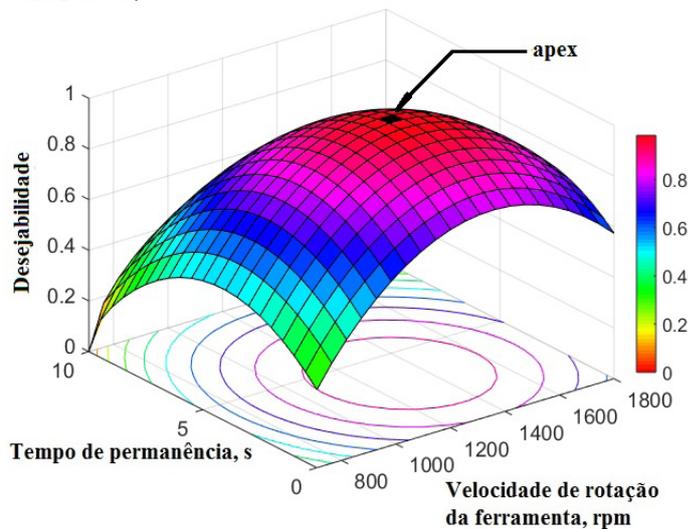
A Figura 16 mostra os gráficos de correlação entre o modelo obtido a partir dos valores reais de SFL e EVS e os valores calculados por meio das equações (12) e (13), respectivamente.

Como pode ser visto na figura, existe uma relação praticamente linear entre os valores obtidos nos dois modelos (o experimental e o matemático).



**Figura 16: Gráficos de correlação entre os valores reais e preditos; a) SFL, b) EVS**  
**Fonte: Colmenero; Orozco; Macías; Fernández et al. (2019).**

A Figura 17 mostra a superfície de resposta da função de desejabilidade composta ( $D$ ). O ápice do gráfico de superfície fornece a combinação ideal de parâmetros de processo que permite atingir o valor máximo de desejabilidade, o qual está relacionado às juntas soldadas da mais alta qualidade. Nesse caso,  $D$  atingiu o valor de 0,997.



**Figura 17: Função composta de desejabilidade**  
**Fonte: Colmenero; Orozco; Macías; Fernández et al. (2019).**

Os maiores valores de SFL e EVS foram obtidos para valores de velocidade de rotação da ferramenta e tempo de residência de 1255 rpm e 4 s, respectivamente. Os testes de confirmação foram realizados com esses valores, consistindo em três execuções experimentais. A partir dos resultados, constatou-se que os valores ótimos de SFL e EVS se aproximaram dos valores calculados a partir dos modelos matemáticos obtidos, com percentual de erro inferior a 3%.

## CONCLUSÕES

- A velocidade de rotação da ferramenta é o parâmetro mais importante nos processos FSW/FSSW. A seleção incorreta deste parâmetro resulta em soldas com baixas propriedades mecânicas e formação de defeitos.
- A análise dos sinais vibroacústicos gerados pelo processo FSW/FSSW é uma técnica viável para a otimização dos processos FSW/FSSW.
- A técnica de rede neural artificial usada é uma ferramenta de inteligência artificial eficaz na modelagem do processo FSW.

## REFERÊNCIAS

- AKINLABI, E. T.; AKINLABI, S. A. Friction stir welding process: a green technology. **World Academy of Science, Engineering and Technology (WASET)**, n. 1536, 2012.
- ARBEGAST, W. J. Friction stir welding after a decade of development. **Welding Journal**, v. 85, n. 3, pp. 28-35, 2006.
- BARAD, S. G.; RAMAIAH, P.; GIRIDHAR, R.; KRISHNAIAH, G. Neural network approach for a combined performance and mechanical health monitoring of a gas turbine engine. **Mechanical Systems and Signal Processing**, n. 27, pp. 729-742, 2012.
- BIRD, C.; DUPUIS, O.; LAMARRE, A. New developments of the ultrasound phased array for the evaluation of friction stir welds. **Friction Stir Welding and Processing II**, pp. 135-141, 2003.
- BOLDSAIKHAN, E.; CORWIN, E. M.; LOGAR, A. M.; ARBEGAST, W. J. The use of neural network and discrete Fourier transform for real-time evaluation of friction stir welding. **Applied Soft Computing**, v. 11, n. 8, pp. 4839-4846, 2011.
- BUFFA, G.; CAMPANELLA, D.; FRATINI, L. On tool stirring action in friction stir welding of work hardenable aluminium alloys. **Science and Technology of Welding and Joining**, v. 18, n. 2, pp. 161-168, 2013.
- BUSSU, G.; IRVING, P. The role of residual stress and heat affected zone properties on fatigue crack propagation in friction stir welded 2024-T351 aluminium joints. **International Journal of Fatigue**, v. 25, n. 1, pp. 77-88, 2003.
- CARY, H. B. **Modern Welding Technology Second Edition**. Upper Saddle River; Nova Jersey: Prentice-Hall Inc., 1988. 0135992834.
- CEDERQVIST, L.; ÖBERG, T. Reliability study of friction stir welded copper canisters containing Sweden's nuclear waste. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 93, n. 10, pp. 1491-1499, 2008.
- CHEN, C.; KOVACEVIC, R.; JANDGRIC, D. Wavelet transform analysis of acoustic emission in monitoring friction stir welding of 6061 aluminum. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 43, n. 13, pp. 1383-1390, 2003.
- COLLIGAN, K. Material flow behavior during friction stir welding of aluminum. **Welding Journal**, New York, n. 78, pp. 229-s, 1999.
- COLMENERO, A. N.; OROZCO, M. S.; MACÍAS, E. J.; FERNÁNDEZ, J. B. et al. Optimization of friction stir spot welding process parameters for Al-Cu dissimilar joints using the energy of the vibration signals. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 100, n. 9-12, pp. 2795-2802, 2019.
- EHRSTROM, J.; BIGOT, A.; CERVI, L.; GERARD, H. **Microstructure and properties of aluminum alloys friction stir welds for aircraft application**. Zurich: Trans Tech Publications Ltda., 2003. pp. 2941-2946.
- FERNÁNDEZ, J. B.; ROCA, A. S.; FALS, H. C.; MACÍAS, E. J. et al. Application of vibroacoustic signals to evaluate tools profile changes in friction stir welding on AA 1050 H24 alloy. **Science and Technology of Welding and Joining**, v. 17, n. 6, pp. 501-510, 2012.
- FRANKEL, G.; XIA, Z. Localized corrosion and stress corrosion cracking resistance of friction stir welded aluminum alloy 5454. **Corrosion**, v. 55, n. 2, pp. 139-150, 1999.
- GHIDINI, T.; DALLE DONNE, C. Fatigue life predictions using fracture mechanics methods. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 76, n. 1, pp. 134-148, 2009.

- GUERRA, M.; SCHMIDT, C.; MCCLURE, J. C.; MURR, L. et al. Flow patterns during friction stir welding. **Materials characterization**, v. 49, n. 2, pp. 95-101, 2002.
- HE, C.; YANG, K.; LIU, Y.; WANG, Q. et al. Improvement of very high cycle fatigue properties in an AA7075 friction stir welded joint by ultrasonic peening treatment. **Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures**, v. 40, n. 3, pp. 460-468, 2017.
- HEIDARZADEH, A.; SAEID, T.; KLEMM, V. Microstructure, texture, and mechanical properties of friction stir welded commercial brass alloy. **Materials Characterization**, n. 119, pp. 84-91, 2016.
- HU, W.; MELETIS, E. I. Corrosion and environment-assisted cracking behavior of friction stir welded Al 2195 and Al 2219 alloys. **Trans Tech Publ.**, pp. 1683-1688, 2000.
- JAMES, M.; HATTINGH, D.; HUGHES, D.; WEI, L. W. et al. Synchrotron diffraction investigation of the distribution and influence of residual stresses in fatigue. **Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures**, v. 27, n. 7, pp. 609-622, 2004.
- JATA, K.; SEMIATIN, S. Continuous dynamic recrystallization during friction stir welding of high strength aluminum alloys. Air force research lab wright-patterson afb oh materials and manufacturing. **Scripta Materialia**, v. 43, n. 8, 2000.
- JATA, K. V.; MAHONEY, M. W.; MISHRA, R. S.; LIENE. **Friction Stir Welding and Processing III**. Nova Jersey: John Wiley & Sons, 2010. 0873395840.
- JI, S.; MENG, X.; LIU, Z.; HUANG, R. et al. Dissimilar friction stir welding of 6061 aluminum alloy and AZ31 magnesium alloy assisted with ultrasonic. **Materials Letters**, n. 201, pp. 173-176, 2017.
- JIMÉNEZ-MACÍAS, E.; SÁNCHEZ-ROCA, A.; CARVAJAL-FALS, H.; BLANCO-FERNÁNDEZ, J. et al. Wavelets application in prediction of friction stir welding parameters of alloy joints from vibroacoustic ANN-based model. **Abstract and Applied Analysis**, Hindawi, 2014.
- KAINUMA, S.; KATSUKI, H.; IWAI, I.; KUMAGAI, M. Evaluation of fatigue strength of friction stir butt-welded aluminum alloy joints inclined to applied cyclic stress. **International Journal of Fatigue**, v. 30, n. 5, pp. 870-876, 2008.
- KALYANASUNDARAM, P.; MUKHOPADHYAY, C.; RAJAGOPALAN, C.; RAJ, B. On-line prediction of quality and shear strength of spacer pad welds of nuclear fuel pins by applying neural network analysis of acoustic emission signals. **Science and Technology of Welding and Joining**, v. 10, n. 1, pp. 7-14, 2005.
- KARLSEN, M.; FRIGAARD, O.; HJELEN, J.; GRONG, O. et al. SEM-EBSD characterisation of the deformation microstructure in friction stir welded 2024 T351 aluminium alloy. Zurich: Trans Tech Publications Ltda., 2003, pp. 2861-2866.
- KHALED, T. An outsider looks at friction stir welding. **Fed Aviat Admin**, n. 25, pp. 27-29, 2005.
- KHAN, M.; KUNTZ, M.; SU, P.; GERLICH, A. et al. Resistance and friction stir spot welding of DP600: a comparative study. **Science and Technology of Welding and Joining**, v. 12, n. 2, pp. 175-182, 2007.
- LI, H.; GAO, J.; LI, Q. Fatigue of friction stir welded aluminum alloy joints: A review. **Applied Sciences**, v. 8, n. 12, p. 2626, 2018.
- LI, X.; SIMPSON, S.; RADOS, M. Neural networks for online prediction of quality in gas metal arc welding. **Science and technology of welding and joining**, v. 5, n. 2, pp. 71-79, 2000.
- LIU, F.; NELSON, T. In-situ grain structure and texture evolution during friction stir welding of austenite stainless steel. **Materials & Design**, n. 115, pp. 467-478, 2017.
- MA, Z.; FENG, A.; CHEN, D.; SHEN, J. Recent advances in friction stir welding/processing of aluminum alloys: microstructural evolution and mechanical properties. **Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences**, v. 43, n. 4, pp. 269-333, 2018.
- MACÍAS, E.; ROCA, A.; FALS, H.; MURO, J. et al. Characterisation of friction stir spot welding process based on envelope analysis of vibro-acoustical signals. **Science and Technology of Welding and Joining**, v. 20, n. 2, pp. 172-180, 2015.
- MACÍAS, E. J.; ROCA, A. S.; FALS, H. C.; FERNÁNDEZ, J. B. et al. Time-frequency diagram applied to stability analysis in gas metal arc welding based on acoustic emission. **Science and Technology of Welding and Joining**, v. 15, n. 3, pp. 226-232, 2010.

- MAHONEY, M.; RHODES, C.; FLINTOFF, J.; BINGEL, W. et al. Properties of friction-stir-welded 7075 T651 aluminum. **Metallurgical and materials transactions A**, v. 29, n. 7, pp. 1955-1964, 1998.
- MISHRA, R. S.; MA, Z. Friction stir welding and processing. **Materials Science and Engineering: R: Reports**, v. 50, n. 1, pp. 1-78, 2005.
- MISHRA, R. S.; MAHONEY, M. W. Friction Stir Welding and Processing. **Materials Park, OH, ASM International**, 2007.
- MUBIAYI, M. P.; AKINLABI, E. T. An overview on friction stir spot welding of dissimilar materials. In: AO, S.-I.; KIM, H. K.; AMOUZEGAR, M. (Eds.). **Transactions on engineering technologies**. New Yrk: Springer, 2015. pp. 537-549.
- NANDAN, R.; DEBROY, T.; BHADOSHIA, H. Recent advances in friction-stir welding–process, weldment structure and properties. **Progress in materials science**, v. 53, n. 6, pp. 980-1023, 2008.
- OROZCO, M. C. S.; FALS, H. C.; ROCA, A. S. **Modelado del proceso de soldadura por fricción-agitación aplicando técnicas de análisis de señales vibroacústicas e inteligencia artificial**. Santiago de Cuba: Editorial Universitaria, 2013. 9591629354.
- OROZCO, M. S.; MACÍAS, E. J.; ROCA, A. S.; FALS, H. C. et al. Optimisation of friction-stir welding process using vibro-acoustic signal analysis. **Science and Technology of Welding and Joining**, v. 18, n. 6, pp. 532-540, 2013.
- OUYANG, J.; YARRAPAREDDY, E.; KOVACEVIC, R. Microstructural evolution in the friction stir welded 6061 aluminum alloy (T6-temper condition) to copper. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 172, n. 1, pp. 110-122, 2006.
- PAGLIA, C.; BUCHHEIT, R. Microstructure, microchemistry and environmental cracking susceptibility of friction stir welded 2219-T87. **Materials Science and Engineering: A**, v. 429, n. 1-2, pp. 107-114, 2006.
- PAO, P.; GILL, S.; FENG, C.; SANKARAN, K. Corrosion–fatigue crack growth in friction stir welded Al 7050. **Scripta Materialia**, v. 45, n. 5, pp. 605-612, 2001.
- PEEL, M.; STEUWER, A.; PREUSS, M.; WITHERS, P. Microstructure, mechanical properties and residual stresses as a function of welding speed in aluminium AA5083 friction stir welds. **Acta Materialia**, v. 51, n. 16, pp. 4791-4801, 2003.
- REYNOLDS, A. P. Visualisation of material flow in autogenous friction stir welds. **Science and technology of welding and joining**, v. 5, n. 2, pp. 120-124, 2000.
- RHODES, C. G.; MAHONEY, M. W.; BINGEL, W. H.; SPURLING, R. A.; BAMPTON, C. C. Effects of Friction Stir Welding on microstructure of 7075 aluminium. **Scr. Materialia**, v. 36, n. 1, pp. 69-75, 1997.
- ROCA, A. **Nuevo criterio para el análisis de estabilidad del proceso de soldadura GMAW, empleando técnicas de Emisión Acústica e Inteligencia Artificial**. 2006. Tese (Doutorado) – Facultad Ingeniería Mecánica, Departamento de Tecnología de Construcción de Maquinaria, Universidad de Oriente, Santiago de Cuba.
- ROCA, A. S.; FALS, H.; FERNANDEZ, J.; MACIAS, E. et al. Artificial neural networks and acoustic emission applied to stability analysis in gas metal arc welding. **Science and Technology of Welding and Joining**, v. 14, n. 2, pp. 117-124, 2009.
- RUBISOFF, H.; SCHNEIDER, J.; NUNES JR, A. **Control of structure in conventional friction stir welds through a kinematic theory of metal flow**.  
Mississippi: Universidade Estadual do Mississippi, 2009.
- SALIH, O. S.; OU, H.; SUN, W.; MCCARTNEY, D. A review of friction stir welding of aluminium matrix composites. **Materials & Design**, v. 86, pp. 61-71, 2015.
- SATO, Y. S.; KOKAWA, H. Distribution of tensile property and microstructure in friction stir weld of 6063 aluminum. **Metallurgical and Materials Transactions A**, v. 32, n. 12, pp. 3023-3031, 2001.
- SATO, Y. S.; KOKAWA, H.; ENOMOTO, M.; JOGAN, S. Microstructural evolution of 6063 aluminum during friction-stir welding. **Metallurgical and Materials transactions A**, v. 30, n. 9, pp. 2429-2437, 1999.
- SATO, Y. S.; URATA, M.; KOKAWA, H. Parameters controlling microstructure and hardness during friction-stir welding of precipitation-hardenable aluminum alloy 6063. **Metallurgical and Materials Transactions A**, v. 33, n. 3, pp. 625-635, 2002.
- SEIDEL, T.; REYNOLDS, A. P. Visualization of the material flow in AA2195 friction-stir welds using a marker insert technique. **Metallurgical and materials transactions A**, v. 32, n. 11, pp. 2879-2884, 2001.

- SU, J.-Q.; NELSON, T.; MISHRA, R.; MAHONEY, M. Microstructural investigation of friction stir welded 7050-T651 aluminium. **Acta Materialia**, v. 51, n. 3, pp. 713-729, 2003.
- SUTTON, M. A.; REYNOLDS, A. P.; YAN, J.; YANG, B. et al. Microstructure and mixed mode I/II fracture of AA2524-T351 base material and friction stir welds. **Engineering fracture mechanics**, v. 73, n. 4, pp. 391-407, 2006.
- SVENSSON, L.-E.; KARLSSON, L.; LARSSON, H.; KARLSSON, B. et al. Microstructure and mechanical properties of friction stir welded aluminium alloys with special reference to AA 5083 and AA 6082. **Science and technology of welding and joining**, v. 5, n. 5, pp. 285-296, 2000.
- TANG, W.; GUO, X.; MCCLURE, J.; MURR, L. et al. Heat input and temperature distribution in friction stir welding. **Journal of Materials Processing and Manufacturing Science**, v. 7, pp. 163-172, 1998.
- THOMAS, W.; NICHOLAS, E.; NEEDHAM, J.; MURCH, M. et al. International Patent Application No. PCT/GB 92/02203 and GB Patent Application No. 9125978.8, Dec. 1991. **US Patent**, n. 5460, p. 317, 1995.
- THOMAS, W.; NICHOLAS, E.; SMITH, S. Friction Stir Welding-Tool Developments, Aluminum 2001. **Proceedings of the TMS**, 2001.
- THOMAS, W. M.; JOHNSON, K. I.; WIESNER, C. S. Friction stir welding – Recent developments in tool and process technologies. **Advanced engineering materials**, v. 5, n. 7, pp. 485-490, 2003.
- THREADGILL, P. Terminology in friction stir welding. **Science and Technology of Welding and Joining**, v. 12, n. 4, pp. 357-360, 2007.
- TUTUM, C. C.; HATTEL, J. H. Numerical optimisation of friction stir welding: review of future challenges. **Science and Technology of Welding and Joining**, v. 16, n. 4, pp. 318-324, 2011.
- YAN, J.; REYNOLDS, A. P. Effect of initial base metal temper on mechanical properties in AA7050 friction stir welds. **Science and Technology of Welding and Joining**, v.14, n. 4, pp. 282-287, 2009.
- YOON, S.; UEJI, R.; FUJII, H. Effect of rotation rate on microstructure and texture evolution during friction stir welding of Ti-6Al-4V plates. **Materials Characterization**, v. 106, pp. 352-358, 2015.
- ZAFAR, A.; AWANG, M.; KHAN, S. R. **Friction stir welding of polymers: an overview**. New York: Springer, 2017. pp. 19-36.
- ZHANG, Z.; WAN, Z. Predictions of tool forces in friction stir welding of AZ91 magnesium alloy. **Science and Technology of Welding and Joining**, v. 17, n. 6, pp. 495-500, 2012.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro do Ministerio de Educación y Ciencia de España, na execução do Projeto DPI 2007-66679.

## SOBRE OS AUTORES

### LUCIANO AUGUSTO LOURENÇATO

Realizou Mestrado (2001), Doutorado (2008) e Pós-Doutorado (2009) em Engenharia dos Materiais e Processos de Fabricação pela Universidade Estadual de Campinas. Possui Graduação em Tecnologia no Curso de Processos de Fabricação pela Faculdade de Tecnologia de Sorocaba – FATEC (1997). Também realizou um Mastère em Concepção, Mecânica e Meio Ambiente na Ecole Nationale Superieure d'Arts et Metiers (ENSAM), na França (2002). Foi Professor Assistente da Faculdade de Tecnologia Mecânica (FATEC) de Mogi Mirim – SP por um ano e meio. Atualmente é professor Associado da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Tem experiência na área de Engenharia Mecânica atuando principalmente nos seguintes temas de pesquisa: desenvolvimento de ligas de alumínio, processamento do material no estado

semissólido, tixoconformação, soldagem de materiais e análise de ciclo de vida de produto. lalouren@utfpr.edu.br

#### **HIPOLITO DOMINGO CARVAJAL FALS**

Possui Graduação em Ingeniería Mecánica – Universidad de Oriente (1986), Mestrado em Engenharia Mecânica pela Universidade Estadual de Campinas (1995) e Doutorado (1999) e Pós-Doutorado (2008) em Engenharia Mecânica pela Universidade Estadual de Campinas. Pós-Doutorado no Laboratorio Nacional de Luz Síncrotron (2009). É Professor Titular da Universidad de Oriente. Atualmente, atua como Professor Visitante na Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Tem experiência na área de Engenharia Mecânica, com ênfase em processos de fabricação, atuando principalmente nos seguintes temas: processos e metalurgia da soldagem, materiais e revestimentos superficiais. hipolitofals@utfpr.edu.br

#### **ANGEL SANCHEZ ROCA**

Possui Graduação em Engenharia de Automação pela Universidad de Oriente, Cuba (1995), Mestrado em Automação (2002) e Doutorado em Ciências Técnicas também pela Universidad de Oriente (2006). Pós-Doutorado (2011 e 2013) na Universidade Estadual de Campinas, Brasil. Actualmente é Professor no Departamento de Manufatura e Materiais da Universidad de Oriente. Tem experiência em automatização com aplicações em processos de fabricação, actuando principalmente nos seguintes temas: monitoramento de processos de soldadura, processamento digital de imagem e sinais, redes neurais e emissão acústica. Trabalha actualmente na linha de investigação de processos de soldagem, com ênfase na monitorização e controle do processo de Soldagem por Atrito (FSW). sanchez@uo.edu.cu

#### **MARIO SANCHEZ ROCA**

Possui Graduação em Engenharia Mecânica, Universidad de Oriente, Cuba (1995), Mestrado em Engenharia de Manutenção, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cuba (1998), Doutorado em Ciências Técnicas na Universidad de Oriente, Cuba (2014) e Pós-Doutorado na Universidade Federal de Uberlândia, Brasil (2014-2015). Atualmente é Professor Titular (2015-atual) do Departamento de Manufatura e Materiais na Universidad de Oriente, Cuba, onde é membro do Comité Académico do Mestrado em Design Mecânico. É também membro do Tribunal Nacional do Grau Científico em Engenharia Mecânica. Tem experiência na área de Engenharia Mecânica, com ênfase em soldagem, otimização do processo de fabricação, processamento de sinais vibroacústicos, tribologia e modificação da superfície, atuando principalmente nos seguintes temas: soldagem, otimização de processos de fabricação, processamento de sinais vibroacústicos, caracterização mecânica de materiais, desgaste, pulverização térmica e inteligência artificial. mario@uo.edu.cu

# ESTUDO DE APLICAÇÃO DO MODELO DE GESTÃO *LEAN STARTUP* E USO DE *UX DESIGN* PARA O DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS VOLTADOS PARA A INTERNET DAS COISAS

JEFFERSON GUND

*Estudante do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial - UTFPR – Curitiba – PR*

CARLOS CZIULIK

*Professor do Curso de Engenharia Mecânica - UTFPR – Curitiba – PR*

## I INTRODUÇÃO

Um dos pontos mais importantes para o avanço da transformação social e econômica do século XXI é a expansão das redes de computadores, primordialmente por meio da expansão das redes sem fio, possibilitando o acesso compartilhado de informações de forma mais efetiva e tendo como elementos fundamentais dispositivos eletrônicos tais como Tablets e Pads. É neste contexto que se fortalece o cenário da Internet das Coisas, ou “*Internet of Things*” (IoT), que tem suas raízes plantadas no final do século passado, por Kevin Ashton, do *Massachusetts Institute of Technology* (MIT), que criou o termo com a intenção inicial de atrair a atenção de executivos de tecnologia para a então recém-criada tecnologia chamada RFID<sup>1</sup> (HASSAN; KHAN; MADANI, 2018). Nesta mesma época, era desenvolvido o conceito de computação ubíqua, criado por Mark Weiser no laboratório da Xerox Parc. O termo “ubíquo” representa algo “onipresente” e faz referência a dispositivos conectados em todos os lugares de forma integrada às ações e aos comportamentos humanos (WEIZER, 1991).

A popularização da IoT possibilita a revolução digital em diversos campos. Pode-se citar algumas das aplicações da IoT (HASSAN; KHAN; MADANI, 2018): i/ **agricultura** (monitoramento da qualidade da produção, monitoramento do ambiente e segurança); ii/ **indústria** (otimização da produção, iluminação, segurança e controle de estoques); iii/ **casas inteligentes** (IoT auxiliando no cuidado clínico de pacientes, monitoramento remoto, biosensores e *wearables*<sup>2</sup>); iv/ **idades inteligentes** (gerenciamento de tráfego, controle de iluminação, monitoramento da qualidade da água, monitoramento e gerenciamento a energia elétrica e monitoramento de resíduos); v/ **transmissão e distribuição de energia elétrica** (*smart grids*<sup>3</sup>, monitoramento de consumo de energia elétrica e monitoramento de detecção de faltas na rede elétrica).

O conceito da IoT muda a forma como o valor do produto é gerado, pois se volta para os serviços disponibilizados ao usuário por meio da conexão do produto à internet, deixando de ser apenas um produto industrial (FERBER, 2013). Para incorporar as soluções baseadas em Internet das Coisas aos produtos e serviços oferecidos, as empresas necessitam se adaptar na pesquisa e no desenvolvimento, nos processos de fabricação, na gestão da cadeia de abastecimento, na manutenção e nos serviços, na abordagem de marketing, vendas e inclusive na forma de relacionamento entre empresa e o cliente após

1 *Radio-Frequency Identification*: tecnologia que utiliza radiofrequência para capturar dados.

2 Traduzido por “Vestíveis”: dispositivos eletrônicos vestíveis, como, por exemplo, pulseiras para monitoramento remoto de pressão arterial.

3 Traduzido por “redes inteligentes”.

a entrega do produto (CAVALCANTE; FETTERMAN, 2017), uma vez que estes continuam a evoluir mesmo depois de entrarem na fase de pós-desenvolvimento, tornando o processo de desenvolvimento contínuo e sem um fim bem definido (CATARINO, 2017).

Para Rozenfeld et al. (2006), o desenvolvimento de produtos é considerado um processo de negócio crítico para a competitividade das empresas, sendo que a implantação de um modelo de gestão deste processo se torna de extrema importância, pois é a interface entre a empresa e o mercado, cabendo a ele identificar e se antecipar às necessidades dos consumidores e propor soluções que atendam às suas demandas. Todavia, o que se percebe é que as orientações contidas nas abordagens clássicas não são diretamente aplicáveis ao segmento de IoT. Assim, o presente artigo pretende lançar discussões sobre esta lacuna identificada.

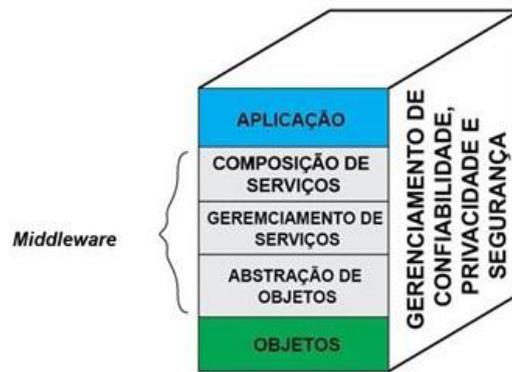
O objetivo deste artigo é apresentar um conjunto de proposições para reduzir desperdícios de recursos no projeto de produtos na área de Internet das Coisas. A abordagem empregada para tanto envolve: i/ caracterização do cenário de emprego das tecnologias de internet das coisas; ii/ caracterização da abordagem tradicional de PDP baseada no modelo de Rozenfeld et al. e na abordagem *Lean Startup*; iii/ exame da metodologia de *UX Design* como diretriz para priorizar o projeto da experiência do usuário em produtos de IoT; iv/ estudo de medidas para aumentar a segurança e proteção de dispositivos eletrônicos e sistemas conectados à internet; v/ definição de um conjunto de proposições para assegurar maior confiabilidade no levantamento de requisitos de produto e reduzir custos de projeto.

Inicialmente, uma busca por referenciais teóricos foi realizada orientando-se por dois macrotemas: o contexto de produtos no âmbito do tema: Internet das Coisas (IOT) e as sistemáticas de desenvolvimento de produtos relacionadas à IOT. A partir deste exame, também se observou a necessidade de considerar mecanismos para aumentar a segurança e proteção de dispositivos conectados à internet. Das discussões e análises reflexivas foi possível derivar o conjunto de proposições para reduzir desperdícios de recursos no projeto de produtos aqui proposto. Uma aplicação descritiva ilustra, por meio de mapeamento com casos derivados da literatura, como as proposições podem ser empregadas.

## 2 INTERNET DAS COISAS: CONTEXTO E DESAFIOS

### 2.1 A INTERNET DAS COISAS

A estrutura mostrada na Figura 1 representa uma das abordagens conhecidas como “Arquitetura Orientada a Serviços” (AOS), que consiste na decomposição de sistemas complexos em aplicações, traduzindo cada um em componentes bem definidos e consistentes (ATZORI; IERA; MORABITO, 2010), e representa a arquitetura básica de um sistema de IoT. A camada de “objetos” ou “dispositivos” (do inglês, “*things*” ou “*edge devices*”) corresponde aos elementos da ponta do sistema que coletam dados do ambiente onde estão implantados; a camada de abstração de objetos possibilita a integração entre diferentes dispositivos por meio de protocolos de comunicação bem definidos; a camada de gerenciamento de serviços realiza o gerenciamento de segurança, serviços e contextualização; a camada de aplicação é a camada acessível ao usuário, onde dados são processados, mostrados e analisados, de forma que se possam tomar ações de controle no ambiente monitorado ou, mesmo, sejam utilizadas para outros propósitos, como veremos mais adiante.



**Figura 1: Arquitetura Orientada a Serviços Para Middleware IoT**  
**Fonte: Adaptado de Atzori; Iera; Morabito (2010).**

A especificação de uma arquitetura determina o desempenho de um sistema de IoT, e é necessário que cada aspecto seja cuidadosamente avaliado pela equipe de projeto. As principais questões envolvendo a implementação de soluções de IoT estão relacionadas aos seguintes fatores (HASSAN; KHAN; MADANI, 2018): i/ interoperabilidade; ii/ padronização; iii/ privacidade; iv/ segurança; v/ confiabilidade; vi/ gerenciamento de dados; vii/ legislação e governança.

### 2.1.1 TIPOS DE DISPOSITIVOS DE IOT

É importante identificar os principais tipos de dispositivos de IoT que são utilizados em um ambiente conectado, sendo os comuns mostrados no Quadro 1, bem como as suas relevantes funcionalidades relacionadas.

### 2.1.2 TECNOLOGIAS DE CONECTIVIDADE

Há diferentes padrões de comunicação em rede para a IoT e, também, diferenças significativas entre estes tipos de dispositivos conectados e entre infraestrutura de redes para comunicação de computadores pessoais. É imprescindível avaliar o quanto uma falha de comunicação entre os dispositivos, seja por intermitência ou latência, pode afetar a responsividade, confiabilidade e a experiência do usuário (ROWLAND et al., 2015). Falhas de comunicação podem ter consequências graves, dependendo do tipo de produto de IoT. Por exemplo, em um sistema de automação residencial, uma falha no envio de comandos de controle de fechamento de travas de portas e janelas pode deixar uma residência desprotegida.

Neste contexto, é importante também definir quais dados devem ser transmitidos e formato da compactação utilizada, o que irá determinar a largura de banda necessária. O tipo de redes sem fio a serem utilizadas na comunicação dos dispositivos deve ser escolhido de modo a equilibrar outros requisitos conflitantes – como alcance máximo de transmissão de dados que a tecnologia permite, vida útil da bateria do dispositivo, largura de banda disponível pelas tecnologias e operadoras e, também, o número de dispositivos conectados por área, o que pode afetar a disponibilidade dos dispositivos em alguns casos por conta da interferência causada por ruído eletromagnético gerado por outros equipamentos. Gubbi et al. (2013) trazem um resumo das aplicações de IoT e alguns aspectos técnicos comumente constatados, conforme mostrado no Quadro 2.

Elemento	Interação com o usuário	Funcionalidade	Processamento
<b>Computador</b>	Interação ocorre através de telas <i>touchscreen</i> e teclados	Uso geral: são capazes de executar diversas aplicações	Processador de alta capacidade
<b>Dispositivo embarcado</b>	Possuem poucos recursos de interação. Geralmente, a interação ocorre por aplicativo ou página <i>web</i>	São especializados para executar funções bastante específicas	Pode possuir um processador ou outro dispositivo como microcontrolador para executar algumas funções e se conectar à internet
<b>Sensor conectado</b>	Interação através de aplicativos para celular e páginas <i>web</i>	São utilizados em tarefas exclusivas para sensoriamento de ambientes	Possuem recursos bastante limitados e os dados coletados são enviados para a nuvem, onde ocorre o seu processamento
<b>Objeto rastreável passivo</b>	Interação através de aplicativos para celular e páginas <i>web</i>	Possuem a única função de identificar objetos	Processamento de dados ocorre na nuvem

**Quadro 1: Tipos de dispositivos conectados**

Fonte: Adaptado de Rowland et al. (2015).

Casas Inteligentes	Varejo Inteligente	Cidades Inteligentes	Agricultura Inteligente	Saneamento Inteligente	Transportes Inteligentes
Pequena	Pequena	Média	Média/Grande	Grande	Grande
Muito poucos; apenas membros da família utilizam	Poucos; pequena comunidade	Muitos; gestores públicos	Poucos; gestores públicos e proprietários rurais	Poucos; governo	Muitos; população em geral
Wi-fi, 3G, 4G LTE, BLE, LPWAN	Wi-fi, 3G, 4G LTE	Wi-fi, 3G, 4G LTE, LPWAN	Wi-fi, Comunicação via Satélite, LTE-M/NB-IOT	Comunicação via Satélite; Links de micro-ondas	Wi-fi, Comunicação via Satélite, LTE
Servidor Local	Servidor Local	Servidor Compartilhado	Servidor Local/ Compartilhado	Servidor Local	Servidor Compartilhado
RFID, Sensores Conectados	RFID, Sensores Conectados	RFID, Sensores Conectados	Sensores Conectados	Sensores Simples	RFID, Sensores Conectados
Baixa	Baixa	Alta	Média	Média	Média/Alta
Baterias recarregáveis	Baterias recarregáveis	Baterias recarregáveis; geração de energia própria (por exemplo, células fotovoltaicas)	Geração de energia própria (por exemplo, células fotovoltaicas)	Geração de energia própria (por exemplo, células fotovoltaicas)	Baterias recarregáveis; geração de energia própria (por exemplo, células fotovoltaicas)

**Quadro 2: Domínios de aplicação de IoT em ambientes inteligentes**

Fonte: Adaptado de Gubbi et al. (2013).

Conforme abordado na seção 2.1, o desenvolvimento de produtos de IoT apresenta-se como um novo paradigma de tecnologias e o seu desenvolvimento depende, em boa parte, de um processo de desenvolvimento de produtos que consiga capturar de maneira eficaz as reais necessidades dos consumidores, de modo a buscar compreender os processos de desenvolvimento de produtos existentes. Serão examinadas nas próximas seções as principais metodologias existentes, bem como a tentativa de identificar as ferramentas e métodos que mais se adequem a produtos de IoT.

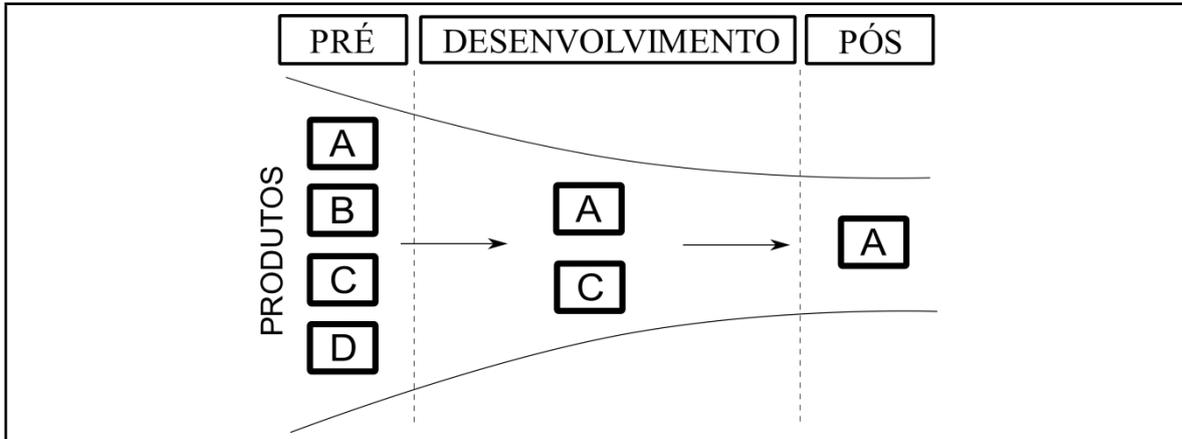
## 2.2 ABORDAGEM TRADICIONAL PARA O PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS

Há diferentes abordagens criadas para sistematizar o processo de desenvolvimento de produtos. Uma definição do que significa o desenvolvimento de produtos para uma empresa, trazida por Rozenfeld et al. (2006), apresenta que:

O processo de desenvolvimento de produtos “consiste em um conjunto de atividades por meio das quais se busca, a partir das necessidades do mercado e das possibilidades e restrições tecnológicas, chegarem às especificações do projeto do produto e de seu processo de produção, para que a manufatura seja capaz de produzi-lo” (ROZENFELD et al., 2006).

Este modelo tradicional, conforme o diz o autor, “é voltado para empresas de manufatura de bens de consumo duráveis e de capital”, pois a macrofase do desenvolvimento compreende as atividades relacionadas à pesquisa e definição de aspectos tecnológicos do produto e é mais bem adaptado a este tipo de empresa. No entanto, as macrofases do pré-desenvolvimento e pós-desenvolvimento podem ser utilizadas em outros tipos de empresa com algumas adaptações, pois são menos específicas.

Considerando o modelo de Rozenfeld et al. (2006), na fase de planejamento de produtos, contida na macrofase de pré-desenvolvimento, são avaliados todo o conjunto de produtos da empresa e a sua relação com o mercado, visando manter um portfólio de produtos capaz de atender a todas as necessidades dos clientes. Na sequência do processo de desenvolvimento é configurado um conjunto de produtos por meio de projetos que poderão seguir adiante ou não nas etapas do desenvolvimento, sempre se avaliando o seu desempenho. No estágio final do desenvolvimento tem-se apenas um conjunto de produtos, geralmente menor do que os inicialmente planejados, dado o grau de incerteza sobre o produto nas fases iniciais do desenvolvimento. Este aspecto do processo de desenvolvimento é conhecido como “funil”, conforme mostrado na Figura 2 (ROZENFELD et al. 2006):



**Figura 2: Relação das macrofases do modelo e a quantidade de produtos**  
**Fonte: Adaptado de Rozenfeld et al. (2006).**

A macrofase do desenvolvimento é composta por diferentes fases, onde a entrega de cada uma delas é um conjunto de resultados que determina a evolução do projeto (ROZENFELD et al., 2006):

a. Projeto Informacional: fase em que é realizada a pesquisa sistemática para levantamento de informações de requisitos de clientes e conversão para requisitos de projeto;

b. Projeto Conceitual: fase onde são utilizadas diversas ferramentas metodológicas para a determinação de aspectos físicos do produto, gerando-se diversos modelos físicos conceituais para o produto e, por fim, a escolha de um dos modelos, que será finalmente detalhado na fase seguinte;

c. Projeto Detalhado: fase onde o produto é detalhado em informações técnicas com a definição de sistemas, subsistemas e componentes do produto. São utilizadas ferramentas de projeto

computacional, onde são especificadas tolerâncias mecânicas dos componentes e é gerada ao final a lista de materiais. Esta etapa é monitorada, sempre se observando os recursos disponíveis em termos de máquinas e equipamentos;

d. Preparação para a produção: fase onde ocorre o *setup* da fábrica para adequar as máquinas, ferramentas e equipamentos para assegurar a produção do produto até a etapa de comercialização.

Neste modelo, uma vez que as entregas de cada etapa sejam consideradas satisfatórias e aprovadas por meio de um processo de avaliação de transição de fase chamado de “*gate*”, não há como voltar no estágio anterior para modificar qualquer aspecto (ROZENFELD et al., 2006). Esta característica rígida de estrutura do PDP é uma das dificuldades em aplicar os modelos tradicionais em ambientes de inovação, como no caso da IoT, pois, em muitos dos casos, é difícil obter informações concretas de como o novo produto ou tecnologia pode impactar os clientes, e, até mesmo, se há de fato um público para o qual a solução proposta será aderente.

A última macrofase é a do pós-desenvolvimento, onde as atividades centrais são o acompanhamento sistemático e documentação das melhorias de produto ocorridas durante o ciclo de vida. Pode-se considerar que o processo de desenvolvimento de produto obteve sucesso quando o produto resultante foi bem aceito no mercado para o qual foi direcionado, quando trouxe a rentabilidade planejada e quando o produto contribuiu para o fortalecimento da marca, permitindo futuros lançamentos de produtos derivados (ROZENFELD et al., 2006).

Faria, Faria e Miarelli (2017) afirmam que os processos de desenvolvimento de produtos tradicionais se mostram ineficazes para atender a demandas de inovação disruptivas (i.e. onde há grau de inovação muito elevado), pois isto implica um elevado grau de incerteza sobre o que se conhece nos modelos tradicionais, como “voz do cliente”. Sendo a IoT um novo paradigma de produtos e serviços, surge a necessidade de se buscar processos alternativos, que sejam mais flexíveis e dinâmicos para reduzir custos e riscos durante a atividade de desenvolvimento, conforme será abordado na seção 2.3.

### 2.3 ABORDAGEM LEAN STARTUP

Em geral, quando se trata de inovação disruptiva, estão intrinsecamente relacionados modelos de negócios que são baseados em incertezas e altos riscos. Denominados de “*startups*”, estes empreendimentos servem como incubação de um modelo de negócios e podem eventualmente vir a assumir um formato de empresa com estruturas organizacionais e estratégias bem definidas. A definição de *Startup* trazida por Ries (2011) delibera que “uma *startup* é uma instituição humana projetada para desenvolver novos produtos e serviços sob condições de extrema incerteza”.

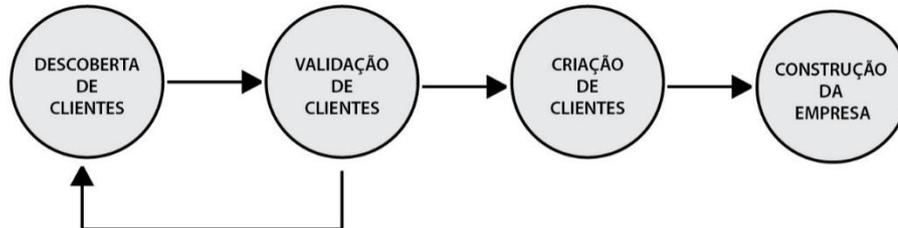
O *Lean Startup*, ou, ainda, “*startup enxuta*”, nasce como abordagem de desenvolvimento de produtos derivada da metodologia de Produção Enxuta (*Lean Manufacturing*), criada por Taiichi Ohno e Shigeo Shingo na indústria automotiva da Toyota (RIES, 2012). Entre os principais elementos da filosofia *Lean* estão a redução de desperdícios no âmbito da produção, por meio de redução dos lotes de produção, do controle de estoque, do reuso de conhecimento e da criatividade dos funcionários e da produção “*just in time*”. O *Lean Startup* é também uma derivação do modelo “*customer development*” (ver Figura 3), criado por Blank (2007), que aplica ao processo de desenvolvimento de negócios o conceito de que valor é o que de fato é percebido como tal pelo cliente, sendo o restante desperdício (RIES, 2011). O modelo de Ries propõe a validação das hipóteses de negócios por meio de protótipos, os quais são denominados de “Mínimo Produto Viável” (MVP: “*Minimum Viable Product*”) e são fornecidos aos clientes. Os clientes, por sua vez, fornecem o *feedback* necessário para validar ou não a hipótese (PINTO, 2015).

O modelo de Blank (2007), mostrado na figura 6, é dividido em:

a. Pesquisa, que envolve: i/ **Descoberta de Clientes**: encontrar onde estão os potenciais clientes para o seu produto e se o problema que se busca resolver é importante para eles. É importante destacar que a definição inicial do produto parte da empresa e não do cliente. Cabe ao time de projeto identificar se há mercado e clientes para a visão do produto ou solução a ser desenvolvida; ii/ **Validação de**

**Cientes:** o objetivo é construir um roteiro para um processo de vendas repetível, para que o time de vendas possa segui-lo mais tarde;

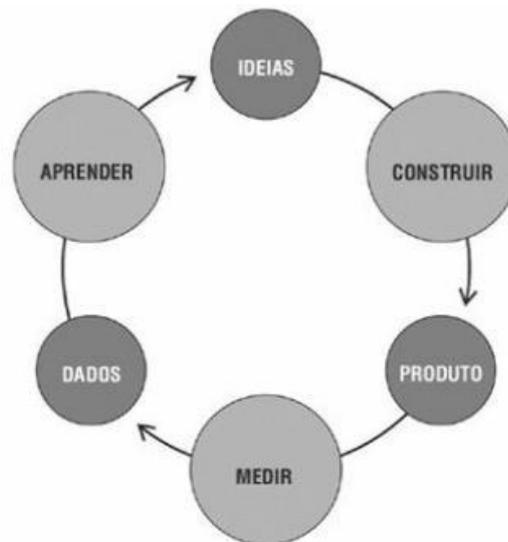
b. Execução, que contempla: iii/ **Criação do Consumidor:** o processo de criação de consumidores pode variar de acordo com a *startup*. Porém, o objetivo central desta etapa é criar demanda ao usuário final e direcioná-lo ao canal de vendas da empresa; iv/ **Construção da Empresa:** é a fase de transição da empresa *startup* na sua forma informal, e voltada ao aprendizado em uma empresa com uma estrutura organizacional bem definida, com departamentos de vendas, marketing e desenvolvimento do negócio.



**Figura 3: Modelo “Customer Development” proposto por Blank (2007)**  
Fonte: Adaptado de Blank (2007).

O que diferencia o modelo de Ries (2011), ilustrado na Figura 4, do modelo de Blank (2007), é que o processo iterativo envolve a construção do produto, no formato de MVP, ao mesmo tempo em que ele é testado e validado com os clientes. A metodologia *Lean Startup* prioriza o conceito de “hipóteses de produtos” ao invés de “requisitos de produtos” (PINTO, 2015), estabelecendo para isso o ciclo “Construir-Medir-Aprender”, sendo eles descritos como: i/ Construir: a partir de uma hipótese levantada pela equipe de empreendedores, desenvolve-se um “Produto Mínimo Viável”, para que se possa iniciar o ciclo de aprendizagem por meio do teste de hipóteses; ii/ Medir: os resultados são testados e avaliados junto aos clientes e o *feedback* é utilizado para melhoria do produto; iii/ Aprender: caso o *feedback* seja positivo, trabalha-se para seguir no processo de desenvolvimento com o conceito atual de produto. Caso o resultado avaliado pela equipe não seja satisfatório, pode-se utilizar as informações fornecidas pelos potenciais clientes para melhoria do produto e reiniciar o ciclo de “construir-medir-aprender”. Caso a equipe verifique que o produto ou solução pensada inicialmente não seja viável, pode-se “pivotar”, ou seja, abandonar a “hipótese” original para fazer um novo planejamento, seja da hipótese, do produto em si ou a sua estratégia empresarial (RIES, 2011). As investigações do eventual insucesso produzem novas ideias e, assim, surgem novas oportunidades para experimentações.

O MVP proporciona rápido *feedback*, por meio da interação dos consumidores com o produto ao longo do processo, e auxilia o empreendedor no processo de aprendizado do desenvolvimento em relação a questões como padrões e requisitos técnicos de design, não tendo o enfoque apenas de um protótipo para validar um conceito (PINTO, 2015). Os primeiros MVPs não devem ser muito elaborados, devendo-se priorizar o aprimoramento do conceito ao longo do processo de iterações e testes com clientes.



**Figura 4: Modelo *Lean Startup***  
**Fonte: Ries (2011).**

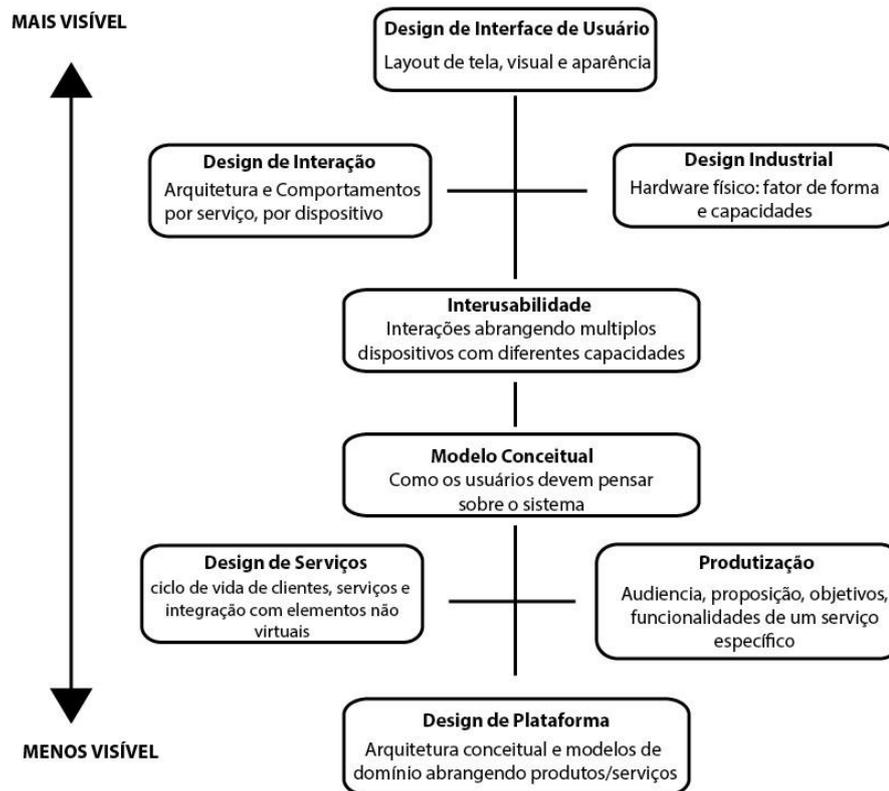
Apesar de haver muitas vezes o receio por parte dos empreendedores em relação aos problemas legais – como a questão de propriedade intelectual sobre o registro de patentes e risco de ter a ideia do produto copiada por outra empresa como a estratégia empregada no teste de hipóteses através do MVP –, segundo Ries (2011), esta metodologia representa a única forma de uma *startup* evoluir para um modelo de negócio consolidado. O que torna este modelo mais adequado a *startups* é justamente o seu número reduzido de clientes e sem muita exposição da marca no mercado, permitindo que estas consigam maior flexibilidade e agilidade do que empresas tradicionais com modelos de negócios já consolidados.

#### **2.4 UX DESIGN NO PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS DE IOT**

A definição mais ampla de “*User Experience Design*” (*UX Design*) ou “Design para a Experiência de Usuário” consiste na criação e sincronização de elementos que afetam a experiência dos usuários de um produto, com a intenção de influenciar nas suas percepções e comportamentos (UNGER; CHANDLER, 2009). Entre estes elementos estão: i/ arquitetura de informação; ii/ design de interação; iii/ design de comunicação; iv/ design industrial e fatores humanos.

Rowland et al. (2015) propõem que um produto de IoT deve maximizar a experiência do usuário em vários níveis do projeto. A Figura 5 representa o modelo conceitual de Rowland et al. (2015), mostrando os elementos de projeto, do mais visível ao menos invisível aos usuários. Um produto de IoT deve considerar um projeto integrado em todas as camadas apresentadas, para que ele de fato seja consistente na entrega da experiência de usuário. Dependendo do tipo de produto, algumas das camadas podem demandar mais tempo de projeto do que outras (ROWLAND et al., 2015).

O ponto de partida para iniciar o design de experiência de usuário pode ser obtido de Garrett (2011), que aponta que ferramentas de pesquisa como “*surveys*”, entrevistas e grupos focais são mais adequadas para capturar informações sobre atitudes gerais e percepções dos usuários. Após a realização de pesquisa de usuários, Garrett (2011) sugere a criação de “*personas*” para auxiliar a segmentar o público em grupos menores para agregá-los em necessidades comuns. Muitas vezes esta segmentação é criada com base em critérios demográficos, como: faixa etária, nível de educação, gênero, entre outros. As *personas* podem também ser segmentadas de acordo com critérios psicográficos, descrevendo comportamentos e percepções comuns. Garrett (2011) argumenta que traduzir os usuários em grupos de “*personas*”, dando uma identidade fictícia para cada uma, de acordo com características e necessidades semelhantes, auxilia a equipe de projeto a manter os usuários em mente ao longo de todo o processo de desenvolvimento do produto.



**Figura 5: Aspectos de design de um produto de IoT**  
**Fonte: Adaptado de Rowland et al. (2015).**

Rowland et al. (2015) argumentam que prototipar produtos e serviços conectados, como é o caso da internet das coisas, pode demandar bastante tempo e mais habilidades técnicas do que outros tipos de dispositivos eletrônicos. Os autores propõem então prototipar produtos e serviços baseados em IoT a partir de: i/ modelos baseados em desenhos e esboços do produto, relacionando e representando os sistemas e infraestruturas envolvidas; ii/ *mockups* a partir de recortes de imagens e pôsteres; iii/ histórias em quadrinhos, mesclando múltiplas formas de comunicação visual; iv/ prototipagem simples em formato de vídeo, que é a abordagem que permite evidenciar as interações sensoriais envolvidas, uma vez que atividades envolvendo interfaces gestuais e movimentos são complexas de expressar apenas por meio de imagens estáticas.

## 2.5 SEGURANÇA EM DISPOSITIVOS DE IOT

Todo dispositivo de IoT consiste essencialmente em *hardware* e *software*, que são projetados para executar tarefas específicas e são denominados de sistemas embarcados. Por conta do crescente uso de dispositivos conectados à internet, o número de ataques cibernéticos a estes dispositivos aumentou consideravelmente e, portanto, surgiu a necessidade de que os projetistas adotem medidas para aumentar a segurança destes dispositivos, sistemas e usuários durante as etapas de desenvolvimento do projeto (IPA, 2010).

De acordo com IPA (2010), ataques contra sistemas embarcados podem ocorrer por meio de interfaces físicas, interfaces lógicas ou aplicando engenharia reversa em placas eletrônicas. Alguns tipos principais de ataques são identificados no Quadro 3.

ITEM	CARACTERÍSTICAS
Spoofing	O ataque ocorre por meio de falsificação de identidade de usuários, fazendo com que o intruso possa cometer crimes cibernéticos fazendo-se passar pela identidade da vítima.
Adulteração de Dados	Falsificar dados e alterar a sua integridade.
DoS	<i>Denial of Service</i> : Ocorre quando não há controle de rastreamento de usuários, permitindo que usuários mal-intencionados ganhem controle sobre um sistema com escalação de privilégios ou pratiquem ataques DoS, ou seja, negando acesso de usuários a servidores e serviços.
Divulgação de Informações	Ataque direcionado à divulgação criminosa de informações confidenciais de indivíduos, empresas e organizações.
Escalação de Privilégios	Usuários com acesso restrito obtendo privilégio de acesso a informações confidenciais ou outro tipo de ações que possam comprometer pessoas ou sistemas.

**Quadro 3: Principais tipos de ataques cibernéticos**

**Fonte: Adaptado de Matsumoto (2016).**

De modo a propor formas de tornar dispositivos eletrônicos de IoT mais seguros, IPA (2010) sugere uma arquitetura de segurança para sistemas embarcados baseada três pilares: i./ **Confidencialidade**: prevenir que informações confidenciais de usuários sejam acessíveis a indivíduos não autorizados; ii./ **Integridade**: prevenir que dados sejam modificados sem serem detectados enquanto dados são processados, armazenados ou transmitidos; iii./ **Disponibilidade**: assegurar que a informação dos usuários fique disponível aos indivíduos quando for solicitado.

As formas básicas de se implementar tais pilares serão abordadas na aplicação descritiva da seção 4.

### 3 PROPOSIÇÕES PARA AUMENTAR A EFICIÊNCIA DO PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS VOLTADOS À INTERNET DAS COISAS

No desenvolvimento de produtos, tradicionalmente se utilizam algumas ferramentas derivadas do que é denominado DFX (“*Design for X*”) (i.e. “projeto para algum aspecto X”). Estas consistem em bases de conhecimento com o objetivo de projetar produtos que maximizem características como qualidade, confiabilidade, serviços, segurança, meio ambiente, usuários, por exemplo (ROZENFELD et al., 2006). Estas abordagens podem ser apresentadas na forma de procedimentos ou um conjunto de regras e diretrizes.

No caso de produtos de IoT, Radziwill e Benton (2017) identificam que há lacunas na formatação de práticas de DFX em três áreas principais:

1. Usabilidade: proteger a privacidade de usuários; aumentar a aprendizagem, do ponto de vista de indivíduos; expandir a percepção dos projetistas a respeito das interações dos usuários com as interfaces dos produtos;

2. Custos: desenvolver produtos mais rapidamente, com mais qualidade, e realizar tomadas de decisões de desenvolvimento e evolução dos produtos a partir dos dados de IoT, de forma a reduzir custos de ciclo de vida dos produtos;

3. Eficiência: aumentar a vida útil das baterias; tornar os dispositivos autossuficientes na geração da própria energia elétrica; otimizar a transmissão dos dados pela internet; utilizar DFX no contexto de *Lean Design* para endereçar melhor restrições de recursos.

Com base nestes aspectos e o referencial teórico discutido nas seções 1 e 2, foi elencado um conjunto de proposições que buscam contribuir para minimizar algumas das lacunas apontadas por

Radziwill e Benton (2017), relacionadas à redução de desperdícios no PDP e capazes de proporcionar maior aproximação entre os potenciais clientes e as empresas. São elas:

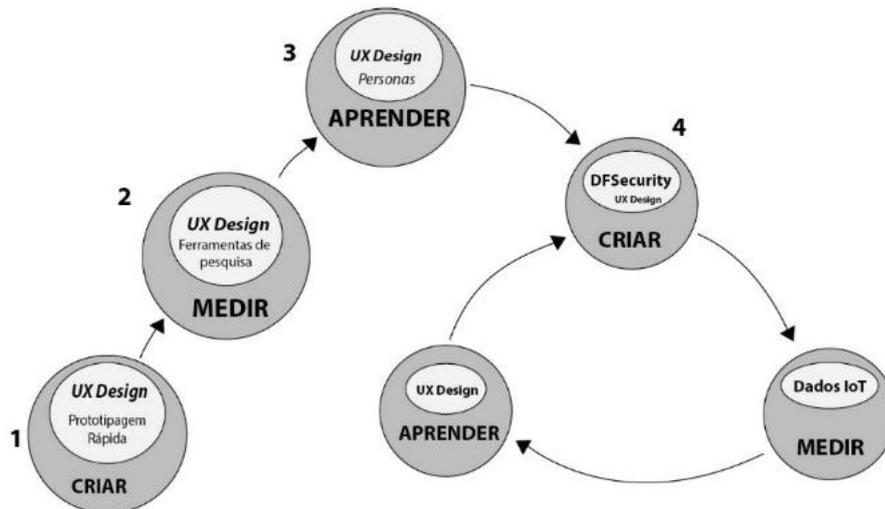
**Utilizar método enxuto de PDP:** Sugere-se, para o desenvolvimento de um produto em IoT, que se utilize como metodologia de desenvolvimento de produtos o modelo *Lean Startup*, abordado na seção 2.3, como alternativa para capturar os elementos intangíveis ao uso do produto. Utilizando-se estes elementos, espera-se: i/ detectar falhas nas concepções do modelo de negócios e da arquitetura de IoT já no início do desenvolvimento; ii/ reduzir desperdício de recursos financeiros a partir da criação do MVP como ferramenta para obter rápido *feedback* do mercado; iii/ acelerar o processo de desenvolvimento e amadurecimento do produto para uma versão final mais consistente com as necessidades dos clientes.

**Utilizar prototipagem rápida como ferramenta de desenvolvimento do mínimo produto viável:** Para criar o primeiro MVP, sugere-se que sejam utilizadas ferramentas de *UX Design* tais como: i/ prototipagem digital por meio do desenho dos dispositivos em software CAD; ii/ prototipagem segundo a criação de recortes de imagens: podem ser utilizados como recursos para ilustrar a interação entre usuários e dispositivos, criando histórias que retratem um cenário hipotético onde o dispositivo é utilizado e quais são os resultados esperados destas interações; iii/ prototipagem em vídeo: em casos em que cenário de aplicação do produto apresente interações complexas, é mais adequado criar vídeos que podem ser produzidos a partir de filmagens reais de ambientes ou obtidos por meio de simulação virtual.

**Identificar e mapear os diferentes perfis de usuários:** Na seção 2.2 foi discutida a dificuldade que os métodos tradicionais de desenvolvimento de produtos apresentam em relação ao envolvimento dos usuários como fonte de retroalimentação de informações sobre usabilidade pelos potenciais clientes já nos estágios iniciais do desenvolvimento do produto. Desta maneira, como forma de priorizar fatores relacionados à experiência do usuário com os produtos e serviços de IoT, sugere-se agregar metodologias de *UX Design*, como a coleta de informações de requisitos de produto por meio da abordagem de “sombra”, grupos focais e entrevistas dirigidas. Após a coleta dos dados, os perfis de usuários devem ser segmentados em grupos de acordo com critérios demográficos e psicográficos, como forma de servirem como referência para a validação de ideias e resolução de conflitos durante o processo de desenvolvimento do projeto. Esta ferramenta pode ser agregada dentro da metodologia *Lean Startup* na criação do MVP.

**Integrar segurança e proteção de sistemas o mais rápido possível no projeto:** De acordo com o que foi abordado na seção 2.5 sobre segurança contra ataques que ocorrem a dispositivos de IoT, pode-se observar que quanto mais no início do projeto forem implementadas medidas de segurança, mais protegidos se tornam os dispositivos em relação à sua privacidade e integridade cibernética das informações trafegadas na rede de IoT. Uma estratégia equilibrada de custos deve considerar iniciar a implantação de mecanismos de segurança cibernética a partir do momento em que o projeto evolui de um protótipo conceitual para um MVP funcional que será utilizado no ambiente do usuário, onde há riscos reais à sua segurança.

### 3.1 ANÁLISE DAS PROPOSIÇÕES



**Figura 6: Fluxograma conceitual para adoção das proposições no segmento de IoT.**  
**Fonte: Autoria Própria.**

Como uma das principais contribuições deste trabalho, um diagrama que ilustra a proposta de uso do *Lean Startup* em conjunto com as demais proposições é mostrado na Figura 6. Assim, tem-se três fases que consistem em iniciar o ciclo de desenvolvimento *Lean Startup* em conjunto com práticas de *UX Design* tratadas nas proposições 2 e 3. Na fase 1, sugere-se utilizar prototipagem rápida para a criação de “metáforas” que ilustrem o modelo conceitual empregando métodos como a criação de cenários de uso dos sistemas de IoT.

Em um segundo momento, deve-se medir o impacto da solução utilizando ferramentas de avaliação como entrevistas dirigidas, grupos focais e, inclusive, por meio do *feedback* informal obtido pela observação das reações, críticas e impressões sobre o cenário criado.

Na terceira fase de interação, busca-se classificar os potenciais usuários de acordo com as suas características e o que é considerado como importante para cada grupo, utilizando o conceito da criação de “*personas*”. Desta forma, tenta-se compreender os *feedbacks* obtidos e reprojeter algum aspecto do projeto em particular que se tenha observado necessário pela equipe.

Com estes passos, inicia-se um ciclo de desenvolvimento em que a equipe busca configurar MVPs mais elaborados e que apresentem algumas das funcionalidades importantes identificadas nas etapas anteriores. Para protótipos funcionais, a equipe pode optar por utilizar plataformas de desenvolvimento de hardware e código aberto para acelerar um novo processo de validação, focando nos perfis de clientes identificados e classificados nas etapas anteriores. A forma de *feedback* a partir deste momento pode ser obtida por meio de dados transmitidos pelos dispositivos de IoT, buscando-se entender melhor o comportamento dos usuários e fornecer informações mais concretas sobre o desempenho e rastrear possíveis falhas dos equipamentos remotamente.

Em termos de hardware atualmente existem diversas opções e kits de desenvolvimento, tais como *Arduino*, *Raspberry pi*, *Beagle Bone Black*, entre outras ferramentas de prototipagem disponibilizadas pelos fabricantes de circuitos integrados. Estas ferramentas são configuradas para prototipagem rápida de hardware e podem ser utilizadas para realizar a prova de conceito, como um segundo passo em direção à versão final do produto. Uma vez que o hardware esteja bem consolidado, pode-se buscar outras alternativas mais definitivas, como desenvolver hardware próprio e bibliotecas de software que assegurem maior confiabilidade ao projeto, caso isto se faça necessário.

É interessante destacar os seguintes aspectos desejáveis em um produto de IoT que devem ser focados no desenvolvimento do hardware: i/ o sistema deve exigir do usuário final um menor esforço possível de atenção e de tempo gasto para configurar os dispositivos para a sua conexão à internet,

deixando configurações mais avançadas para serem configuradas por aplicativos de celular ou computadores. Para interfaces de usuário dos “*edge devices*” tal como sensores inteligentes, na maioria das vezes é razoável restringir a interação com o usuário a informações mais básicas, tais como *status* de conexão do dispositivo ou eventuais falhas encontradas, sinalizando estas situações por meio de *leds*, por exemplo; ii/ deve-se buscar projetar, na medida do possível, interfaces de aplicativos que sejam personalizáveis, a fim de proporcionar maior liberdade para que o usuário configure de acordo com as suas preferências e necessidades de acessibilidade; iii/ deve-se analisar o ambiente em que o dispositivo irá operar para assim poder determinar quais os componentes de interface de usuário são mais adequados. Ambientes ruidosos, por exemplo, não são adequados para utilizar interfaces por comando de voz ou *feedback* por áudio.

Por fim, busca-se identificar pontos críticos à segurança e à proteção dos usuários e adotar os pilares de segurança em sistemas embarcados citados na seção 2.5 (disponibilidade, integridade e confidencialidade). IPA (2010) sugere algumas práticas para tornar os circuitos eletrônicos mais seguros: i/ tornar o projeto da placa eletrônica complexo de modo a dificultar a interceptação de barramentos de dados. Para dispositivos que trabalham com dados altamente confidenciais, utilizar encapsulamento BGA (*Ball Grid Array*) ou outra estratégia do tipo, de maneira a dificultar os ataques físicos do tipo “*probing attack*”; ii/ desenvolver mecanismos para deletar automaticamente informações confidenciais quando o sistema detectar a abertura forçada de um compartimento do equipamento eletrônico; iii/ emitir alertas *online* quando o sistema detectar tentativas de abertura forçada de algum compartimento do equipamento ou quando identificar uma tentativa de remoção de memórias ou discos de armazenamento de dados; iv/ após a montagem das placas eletrônicas, cobrir a placa com resinas epóxi, por exemplo, dificultando o acesso aos circuitos integrados. Em Bhunia e Tehranipoor (2019) pode ser encontrada uma referência mais completa sobre segurança de hardware em sistemas eletrônicos embarcados.

No desenvolvimento do software, IPA (2010) recomenda que, para dispositivos que necessitem do uso de sistemas operacionais, sejam priorizados aqueles desenvolvidos por empresas que apresentem períodos de suporte de atualizações longas, de maneira a tornar mais seguros contra-ataques ao longo do ciclo de vida do produto. Também, é recomendado que sejam implementados mecanismos de detecção de falhas como, por exemplo, as causadas por ataques “DoS” (*Denial of Service*), fazendo automaticamente recuperar o sistema e reiniciar quando necessário, além de alertar o usuário sobre o ocorrido. É também importante alertar o usuário quanto aos danos que podem ser causados caso não siga as instruções de segurança de uso fornecidas com o equipamento, tais como roubo e perda de dados. Segurança cibernética para IoT é um tema vasto e uma abordagem mais detalhada é encontrada em Russel e Duren (2016).

As proposições aqui apresentadas são preliminares e não esgotam o tema de boas práticas em processo de desenvolvimento de produtos em IoT. É esperado, portanto, que existam outros aspectos a se discutir sobre o assunto e que podem ter impacto no processo de desenvolvimento de produtos de IoT. Como forma de demonstrar o potencial emprego das proposições elencadas, será desenvolvida na seção 4 uma aplicação descritiva em um estudo de caso.

#### 4 APLICAÇÃO DESCRITIVA

Como forma de ilustrar a aplicação das proposições abordadas na seção 3 e o funcionamento do Fluxograma conceitual para adoção das proposições no segmento de IoT contido na Figura 6, será utilizado um estudo de caso relatado em Zancul et al. (2016). O artigo apresenta um enfoque sobre a redefinição do modelo de negócios de uma *startup* de tecnologia brasileira, relatando o desenvolvimento de uma solução de IoT para aplicação em máquinas de reciclagem de solventes e diluentes utilizados nos processos industriais. O modelo de negócios criado originalmente pela empresa é baseado no formato de aluguel de máquinas e, também, na venda das máquinas e de peças de reposição. Em síntese, com a introdução da IoT, Zancul et al. (2016) propõem que a *startup* passaria a oferecer às empresas a reciclagem dos solventes como um serviço e não apenas máquinas como produto final.

Do ponto de vista da *startup*, a introdução da IoT traria a capacidade de monitorar os modos de falha das máquinas e das condições ambientais para a sua ocorrência, além de fornecer informações sobre a eficiência energética, reduzir custos com manutenção corretiva dos equipamentos e prover uma visão sistêmica para a melhoria dos produtos.

A Proposição 1, apresentada na seção 3, sugere a utilização de uma metodologia enxuta de desenvolvimento de produtos como forma de reduzir desperdícios no projeto de sistemas de IoT. No caso da *startup* em questão, o produto já foi testado em campo e isto sugere que a empresa já possui algum *feedback* sobre o seu funcionamento, possíveis modos de falhas e percepção de valor dos clientes. A introdução da IoT abre novas janelas de oportunidades e também novos desafios, como a estruturação de um novo planejamento de suporte ao cliente, a maneira como a empresa vende os seus serviços, a infraestrutura de internet necessária para a conectividade dos dispositivos e também com relação ao estabelecimento de processos de manutenção dos equipamentos. Ao selecionar uma parcela de seus clientes e criando-se um “MVP” para um modelo de máquina que emprega tecnologias de IoT, a empresa pode implementar um ciclo de validação “criar-medir-aprender”, conforme proposto no Fluxograma da Figura 6. Estes primeiros utilizadores seriam os responsáveis por fornecer os *feedbacks* sobre usabilidade do produto.

As hipóteses a serem testadas em um ciclo de desenvolvimento *Lean Startup* poderiam ser, por exemplo:

1. De modo geral, a reciclagem dos reagentes é um processo vantajoso economicamente, exige uma taxa de falhas do maquinário muito baixa e a conectividade agregada pode resolver até 75% da indisponibilidade dos equipamentos, por meio da estruturação de um plano de manutenção preditivo, baseado nos dados coletados dos sensores instalados no equipamento;
2. Há interesse, por parte das indústrias, em buscar alternativas sustentáveis para reduzir impacto ambiental e apelo de marketing a práticas ecologicamente corretas, que possam ser exploradas de forma mais eficaz com o novo modelo de serviços;
3. A percepção de valor do produto/serviço pelo cliente é maximizada em até 60%, com a introdução da tecnologia de IoT e, com isso, a empresa fornecedora do produto/serviço conseguirá aumentar significativamente o faturamento e conseguirá ampliar o número de clientes com a adoção do novo modelo de negócios.

A Proposição 2 (prototipagem rápida) é introduzida nos primeiros ciclos de validação do MVP. O esboço de telas de aplicativo e páginas web que representem as interfaces por onde os usuários poderão interagir, monitorar e eventualmente obter suporte da empresa é uma das formas mais interessantes de se verificar a aderência da IoT e da proposta de valor formulada. Neste caso, existem diversos softwares especializados em design de interface de usuário que podem ser utilizados como ferramentas para avaliar a usabilidade, por meio do esboço de painéis de controle e monitoramento da máquina. Um exemplo de painel de controle de um dispositivo de IoT é mostrado na Figura 7 (BUSTAMANTE, 2018). O site permite conectar diversos tipos de dispositivos de IoT à plataforma e criar interfaces de monitoramento.



**Figura 7: Exemplo de interface de monitoramento de um dispositivo de IoT**  
**Fonte: Bustamante (2018).**

Com os *insights* obtidos por meio da prototipagem rápida é possível obter valiosas informações sobre a usabilidade dos dispositivos e, também, compreender quais aspectos de design e de dados e conjuntos de informações interpretadas dos dados são mais importantes a serem disponibilizadas para os usuários. Como exemplo de informações que podem ser úteis aos usuários, pode-se citar: i/ dados de volume de resíduos reciclados em um período (pode ser útil ao cliente ter estas informações em tempo real); ii/ quantidade de paradas por mau funcionamento da máquina (importante para a empresa); iii/ consumo de energia da máquina para realizar o processamento dos resíduos (pode ser útil fornecer a quantidade de energia consumida para direcionar o uso da máquina para horários do dia em que não há tanta demanda, evitando problemas com sobrecarga da rede elétrica e fazendo uma gestão mais eficiente da conta de energia elétrica, direcionando o uso do equipamento para períodos em que o custo da energia elétrica seja mais barata para o cliente); iv/ quais falhas foram detectadas durante o uso (útil para a empresa prestadora de serviços identificar quais componentes ou eventos podem estar desencadeando mau funcionamento da máquina).

A Proposição 3 sugere criação de “*personas*” para alocar atributos comuns a diferentes tipos de usuários e, dessa forma, auxiliar a priorizar requisitos técnicos do produto/serviço e a usabilidade dos recursos. No caso das máquinas de reciclagem de diluentes, os *stakeholders* podem fazer parte dos diferentes níveis gerenciais de uma indústria. Os Quadro 4, Quadro 5 e Quadro 6 retratam três diferentes perfis hipotéticos criados para ilustrar a identificação de *personas* após uma etapa de validação de MVP. O Quadro 4 retrata o perfil geral do ponto de vista de nível gerencial de um diretor de uma indústria que contrata/compra máquinas de reciclagem de diluentes. O Quadro 5 retrata o perfil potencial de usuário de nível técnico que é encarregado por parte do processo de reciclagem de diluentes em uma indústria. O Quadro 6 seria a representação do ponto de vista de gerenciamento da empresa *startup* fornecedora dos serviços de reciclagem. Cada quadro apresenta um conjunto de atributos que consiste em identificar a *persona*, retratar o perfil demográfico e comportamental e apresentar o conjunto de “dores e necessidades” identificadas após um processo de validação do MVP.

IDENTIFICAÇÃO DA PERSONA	DEMOGRAFIA E COMPORTAMENTOS
 <p>• Alberto</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Engenheiro químico e diretor executivo de empresa de grande porte do ramo de revestimentos para peças automotivas;</li> <li>- 56 anos;</li> <li>- Mora em São Paulo;</li> <li>- Utiliza produtos de informática Apple.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Necessita de suporte contínuo para manutenção das máquinas;</li> <li>- Gostaria de aumentar rastreabilidade de custo operacional da planta;</li> <li>- Necessita reduzir perdas de material causadas por máquinas paradas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Terceirizar serviços de manutenção preventiva/corretiva;</li> <li>- Estabelecer parcerias com empresas de software ERP para integrar informações de estoque para compra de insumos de diluentes.</li> <li>- Gerar estatísticas de volume de resíduo reciclado.</li> </ul>
DORES E NECESSIDADES	POTENCIAIS SOLUÇÕES

**Quadro 4: Representação de *persona*: diretor de empresa cliente**

IDENTIFICAÇÃO DA PERSONA	DEMOGRAFIA E COMPORTAMENTOS
 <p>• Mateus</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Técnico em eletromecânica;</li> <li>- 23 anos.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Necessita de segurança na utilização da máquina devido a potenciais riscos de inalação de materiais tóxicos ou contato com vapores de temperaturas elevadas;</li> <li>- Necessita de informações técnicas para operar a máquina com diferentes tipos de diluentes.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fornecer diagnóstico de problemas técnicos;</li> <li>- Identificar rapidamente componentes para reposição;</li> <li>- Desenvolver sistema eletrônico de segurança e proteção no uso da máquina.</li> </ul>
DORES E NECESSIDADES	POTENCIAIS SOLUÇÕES

**Quadro 5: Representação de *persona*: técnico de manutenção da *startup***

IDENTIFICAÇÃO DA PERSONA	DEMOGRAFIA E COMPORTAMENTOS
 <p data-bbox="264 501 735 528">- Empresa fornecedora de serviços (Rochmam)</p>	<p data-bbox="799 333 1034 394">- Gestor de negócios; - 40 anos.</p>
<p data-bbox="264 562 783 730">- Precisa aumentar a receita da empresa e reduzir custos operacionais; - Precisa de consultoria para implantação de <i>call center</i> e gestão de contratos; - Precisa implantar um sistema informatizado mais moderno de gestão de produção.</p>	<p data-bbox="799 562 1329 730">- Reduzir deslocamentos periódicos de um técnico para realizar manutenção corretiva; - Implantar modelo de manutenção preventiva e realizar o acompanhamento dos modos de falha das máquinas.</p>
DORES E NECESSIDADES	POTENCIAIS SOLUÇÕES

**Quadro 6: Representação de *persona*: gestores da *startup***

Por fim, a proposição 4 sugere que sejam utilizados os conceitos de segurança para sistemas embarcados proposto por IPA (2010), baseado nos princípios de confidencialidade, integridade e disponibilidade. Um exemplo de aplicação em nível de software, para tornar mais seguro o sistema de IoT para máquinas industriais de reciclagem, é considerar as *personas* identificadas ao longo do ciclo *Lean Startup* e então criar diferentes níveis de permissão de acesso à recursos do equipamento/sistema.

Utilizando o pilar “confidencialidade” proposto por IPA (2010) no contexto de software, os usuários a nível operacional teriam acesso para visualizar informações de temperatura e pressão internas da máquina, por exemplo, mas não poderiam alterar parâmetros de configuração do dispositivo, sendo utilizada uma criptografia para a sua transmissão. O acesso a configurações pode ser transferido a outro usuário com maior privilégio de acesso, em nível de supervisão, gerência ou, até mesmo, podendo ser executado remotamente pela empresa prestadora do serviço. Este exemplo ilustra a importância de se entender a dinâmica dos processos e ter uma visão das *personas* para poder beneficiar a escolha de qual tipo de permissão conceder a cada um dos *stakeholders*. O segundo pilar, “integridade”, poderia prever a utilização de empacotamento de dados e uma assinatura digital dos dispositivos, de forma que nenhum dispositivo seja clonado facilmente e dados sejam interceptados por criminosos. Uma eventual adulteração de dados pode trazer consequências financeiras e jurídicas incalculáveis para a empresa prestadora dos serviços e, portanto, boas práticas de segurança devem ser seguidas no desenvolvimento da aplicação. O terceiro pilar, “disponibilidade”, pode ser implementado com a utilização de uma infraestrutura de rede de internet independente do cliente, utilizando 3G ou redes LPWAN (*Low Power Wide Area Network*), por exemplo. A escolha da arquitetura e tecnologias de transmissão é realizada com base na quantidade de dispositivos conectados e disponibilidade de serviços de operadoras de telecomunicações. Após a verificação de que o conjunto de requisitos de hardware tenha atendido às necessidades do produto, uma nova camada de segurança pode ser implementada via hardware, ficando a cargo dos projetistas determinar quais estratégias podem apresentar melhor relação custo/benefício ao projeto.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

A forte tendência de aquecimento no mercado de produtos focados em Internet das Coisas apresenta grandes possibilidades de ganhos às empresas, permitindo ter maior rastreabilidade sobre a qualidade dos produtos, flexibilização do modelo de negócios e novas oportunidades de prestação de serviços. Diante disto, há a necessidade de que as empresas adotem um modelo de processo de desenvolvimento de produtos adequado ao tipo de produto que desenvolvem e o grau de inovação que perseguem.

O modelo de gestão *Lean Startup* representa um formato que busca valorizar as interações com os clientes por meio de testes do que é denominado de “MVP”, que de fato agregue valor ao cliente. Já nos modelos de desenvolvimento de produtos mais tradicionais, muitas vezes o *feedback* do produto criado pode ser obtido apenas quando o produto é lançado no mercado. Desta forma, não são adequados a produtos com características de alto grau de inovação, como é o caso de muitos produtos que envolvem tecnologia de IoT.

Foi elencado um conjunto de quatro proposições para aplicação em desenvolvimento de soluções de IoT, visando à redução de desperdícios de tempo e recursos no processo de desenvolvimento de produtos e, também, reforçar a importância de se considerar as diferentes perspectivas dos usuários ao utilizar soluções em IoT. A partir da análise das proposições elaborou-se um Fluxograma conceitual para adoção das proposições no segmento de IoT, a partir da abordagem *Lean Startup*, que busca nortear o processo de emprego das proposições elencadas.

## REFERÊNCIAS

- ASHTON, K. That ‘Internet of Things’ Thing. **RFID Journal**, 2009. Disponível em: <<http://www.rfidjournal.com/articles/view?4986>>. Acesso em: 26 jul. 2018.
- ATZORI, L.; IERA, A.; MORABITO, G. The Internet of Things: A Survey. **Redes de Computadores**, Elsevier, n. 54, 2010. Disponível em: <<https://www.cs.mun.ca/courses/cs6910/IoT-Survey-Atzori-2010.pdf>>. Acesso em: 19 ago. 2018.
- BLANK, S. G. **The Four Steps to the Epiphany: Successful Strategies for Products That Win**. K&S Ranch Publishing LLC, 2007.
- BHUNIA, S.; TEHRANIPOOR, M. **Hardware Security: A Hands-on Learning Approach**. Elsevier, 2019.
- BUSTAMANTE, A. L. **Creating Real-time IoT Dashboards for Sigfox Devices**, 2018. Disponível em <<https://thinger.io/creating-real-time-iot-dashboards-for-sigfox-devices/>>. Acesso em: 10 set. 2018.
- CAVALCANTE, C. G. S.; FETTERMAN, D. de C. Aplicação das Tecnologias IoT no Desenvolvimento de Novos Produtos e Serviços. In: 11º CONGRESSO BRASILEIRO DE INOVAÇÃO E GESTÃO DO DESENVOLVIMENTO DO PRODUTO. **Anais...**, 2017. Disponível em: <<http://pdf.blucher.com.br.s3-sa-east-1.amazonaws.com/designproceedings/cbgdp2017/093.pdf>>. Acesso em: 30 jul. 2018.
- FARIA, T. C.; FARIA, L. C.; MIARELLI, G. F. Lean Startup Aplicado à IIOT: Desenvolvimento do MVP Para Plataforma Modular. In: 11º CONGRESSO BRASILEIRO DE INOVAÇÃO E GESTÃO DO DESENVOLVIMENTO DO PRODUTO. **Anais...**, 2017. Disponível em: <<http://pdf.blucher.com.br.s3-sa-east-1.amazonaws.com/designproceedings/cbgdp2017/021.pdf>>. Acesso em: 30 jul. 2018.
- FERBER, S. How The Internet of Things Changes Everthing. **Harvard Business Review**, 2013. Disponível em: <<https://hbr.org/2013/05/how-the-internet-of-things-cha>>. Acesso em: 27 jul. 2018.
- GARRETT, J. J. **The Elements of User Experience: User-Centered Design for the Web and Beyond**. Berkeley: New Riders, 2011.
- GUBBI, J.; BUYYA, R.; MARUSIC, S.; PALANISWAMI, M. **Internet of Things: A Vision, Architectural Elements, and Future Directions**. Melbourne: Departamento de Engenharia Elétrica e Eletrônica, Universidade de Melbourne, 2013. Disponível em: <<http://www.buyya.com/papers/Internet-of-Things-Vision-Future2013.pdf>>. Acesso em: 11 set. 2018.

HASSAN, Q. F.; KHAN, A. ur R.; MADANI, S. A. **Internet Of Things: Challenges, Advances and Applications**. Nova York: CRC Press, 2018.

IPA. **Approaches for Embedded System Information Security**. IT Security center, Information-Technology Promotion Agency. Japão, 2010. Disponível em: <<https://www.ipa.go.jp/files/000014118.pdf>>. Acesso em: 14 set. 2018.

MATSUMOTO, T. **IoT Safety/Security Design Tutorial**. Software Reliability Enhancement, Technology Headquarters, Information-Technology Promotion Agency (IPA). Japão, 2016. Disponível em: <<https://www.ipa.go.jp/files/000053921.pdf>>. Acesso em: 14 ago. 2018.

PINTO, R. S. **Processo de Desenvolvimento de Produtos em Startups: Proposta de Modelo**. 2015. 172f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2015. Disponível em: <[https://repositorio.ufrn.br/jspui/bitstream/123456789/23035/1/RochellySirremesPinto\\_DISSERT..pdf](https://repositorio.ufrn.br/jspui/bitstream/123456789/23035/1/RochellySirremesPinto_DISSERT..pdf)>. Acesso em: 17 ago. 2018.

RADZIWILL, N. M.; BENTON, M. C. Design for X (DfX) in The Internet of Things (IoT). **Journal of Quality Management Systems, Applied Engineering, & Technology Management**, v. 01, 2017.

RIES, E. **A Startup Enxuta**. 1. ed. Rio de Janeiro: LeYa, 2012.

ROWLAND, C.; GOODMAN, E.; CHARLIER, M.; LIGHT, A.; LUI, A. **Designing Connected Products: UX ForThe Consumer Internet of Things**. Sebastopol: O'Reilly, 2015.

ROZENFELD, H.; FORCELLINI, F. A.; AMARAL, D. C.; TOLEDO, J. C.; SILVA, S. L.; ALLIPRANDINI, D. H.; SCALICE, R. K. **Gestão do Desenvolvimento de Produtos – Uma Referência Para a Melhoria do Processo**. São Paulo: Saraiva, 2006.

RUSSEL, B.; DUREN, D. V. **Practical Internet of Things Security**. Birmingham. Packt Publishing, 2016.

WEIZER, M. The Computer for the 21<sup>st</sup> Century. **Revista Scientific American**, pp. 94-104, set. 1991. Disponível em: <<https://www.lri.fr/~mbl/Stanford/CS477/papers/Weiser-SciAm.pdf>>. Acesso em: 11 set. 2018.

ZANCUL, E. de S.; TAKKEY, S. M.; BARQUET, A. P. B.; KUWABARA, L. H.; MIGUEL, P. A. C.; ROZENFELD, H. Business Process Support for IoT Based Product-Service Systems (PSS). **Business Process Management Journal**, v. 22, n. 2, 2016. Disponível em: <<https://www.emeraldinsight.com/doi/pdfplus/10.1108/BPMJ-05-2015-0078>>. Acesso em: 10 set. 2018.

## **SOBRE OS AUTORES**

### **JEFFERSON GUND**

É graduado em Engenharia Eletrônica pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (2016), pós-graduado em Gestão do Desenvolvimento de Produtos (2018) pela mesma universidade. Atua como desenvolvedor de sistemas eletrônicos embarcados, especialmente voltados para telemetria climática e agrícola. [jeffersongund@alunos.utfpr.edu.br](mailto:jeffersongund@alunos.utfpr.edu.br)

### **CARLOS CZIULIK**

Concluiu o Doutorado em Engenharia Mecânica pela University of Surrey, Inglaterra, em 1998. Seu mestrado foi concluído em 1990, junto ao Departamento de Engenharia de Produção da UFSC, na área de Engenharia de Produto (desenvolvimento de máquinas agrícolas), sob a orientação do Professor Nelson Back. Atualmente, é Professor Titular da UTFPR, onde tem desenvolvido atividades de ensino e pesquisa nos últimos 38 anos. Publicou vários artigos em revistas e eventos. Orientou mais de 100 trabalhos (dissertações de Mestrado, trabalhos de conclusão de curso, monografias, trabalhos de Iniciação Científica). Tem experiência na área de Engenharia de Produção e ramos da Engenharia Mecânica, com ênfase em Desenvolvimento de Produto, atuando principalmente nas seguintes áreas: desenvolvimento de produto e protótipo, projeto conceitual e metodologia de projeto. Atualmente, ocupa a função de Diretor Adjunto de Relações Internacionais da UTFPR. [czulik@utfpr.edu.br](mailto:czulik@utfpr.edu.br)

# **DESEMPENHO TÉRMICO DE TERMOSSIFÕES DESTINADOS A COLETORES SOLARES DE TUBOS A VÁCUO DE ALTA PRESSÃO UTILIZANDO NANOFUIDOS DE ÓXIDO DE GRAFENO**

PEDRO LEINEKER OCHOSKI MACHADO

*Estudante de Mestrado em Engenharia Mecânica – UTFPR Ponta Grossa - PR*

GUILHERME ANTONIO BARTMEYER

*Estudante de Mestrado em Engenharia Mecânica – UTFPR Ponta Grossa - PR*

VICTOR VAUREK DIMBARRE

*Estudante de Engenharia Mecânica – UTFPR Ponta Grossa - PR*

ROGÉRIO DE OLIVEIRA SOUZA

*Estudante de Engenharia Mecânica – UTFPR Ponta Grossa - PR*

VINÍCIUS MARIANI LENART

*Estudante de Pós-Doutorado na área de Engenharias – UTFPR – Ponta Grossa - PR*

ROZANE DE FÁTIMA TURCHIELLO GOMEZ

*Professora do Departamento Acadêmico de Física – UTFPR – Ponta Grossa - PR*

PAULO HENRIQUE DIAS DOS SANTOS

*Professor do Departamento Acadêmico de Mecânica – UTFPR – Curitiba - PR*

THIAGO ANOTNINI ALVES

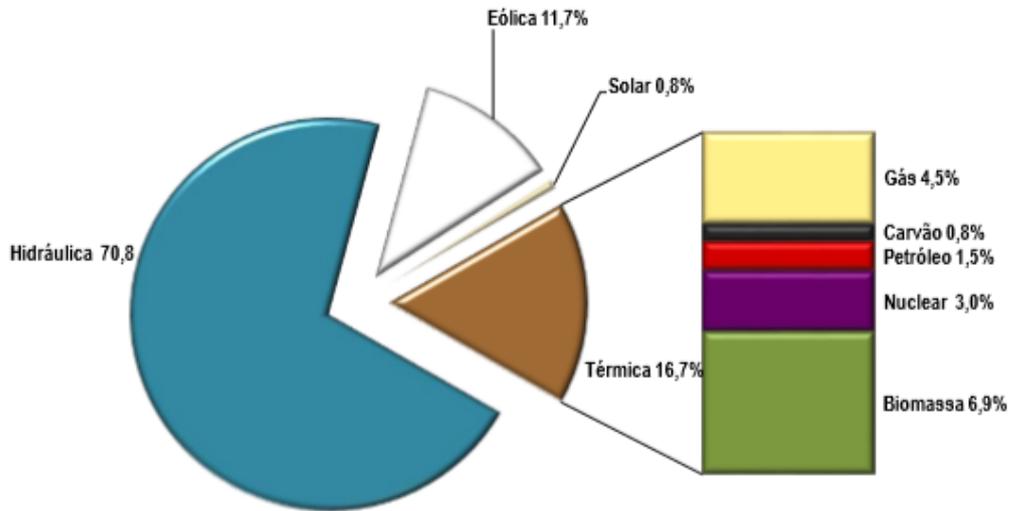
*Professor do Departamento Acadêmico de Mecânica – UTFPR – Ponta Grossa - PR*

## **INTRODUÇÃO**

O desenvolvimento econômico em geral está diretamente relacionado com a produção de energia. Com isso, a partir de pesquisas acadêmicas e políticas ambientais, evidencia-se a busca de novas fontes e tecnologias renováveis que permitam a substituição de combustíveis não renováveis e de elevado potencial de degradação ambiental (ADAMS; KLOBODU; APIO, 2018).

Apesar dessa transição, a produção de energia global ainda é majoritariamente baseada no uso de combustíveis fósseis. A previsão para a produção de energia global no ano de 2020 consiste em petróleo (30,18% do total gerado), seguido por carvão (28,11%), gás (21,50%), bioenergia (10,22%), energia nuclear (5,50%), energia hidrelétrica (2,52%), além de outras fontes renováveis (1,97%) (IEA, 2015).

Tratando-se do Brasil, este pode ser considerado o país que mais utiliza recursos renováveis em sua matriz energética. Dados do mês de julho de 2019 (Figura 1) fornecidos pelo Ministério de Minas e Energia (MME, 2019) apontam que 90,2% da energia gerada em território brasileiro provêm de fontes renováveis, sendo a geração hidráulica o principal meio de produção de energia, representando 70,8% da geração total do país. Tratando-se de outras fontes renováveis, a geração eólica representa 11,7% e a biomassa 6,9%. A energia solar aparece como destaque nesse mês por apresentar um crescimento de 90,4% em relação ao mesmo mês do ano anterior, apesar de representar apenas 0,8% do total gerado em território brasileiro.

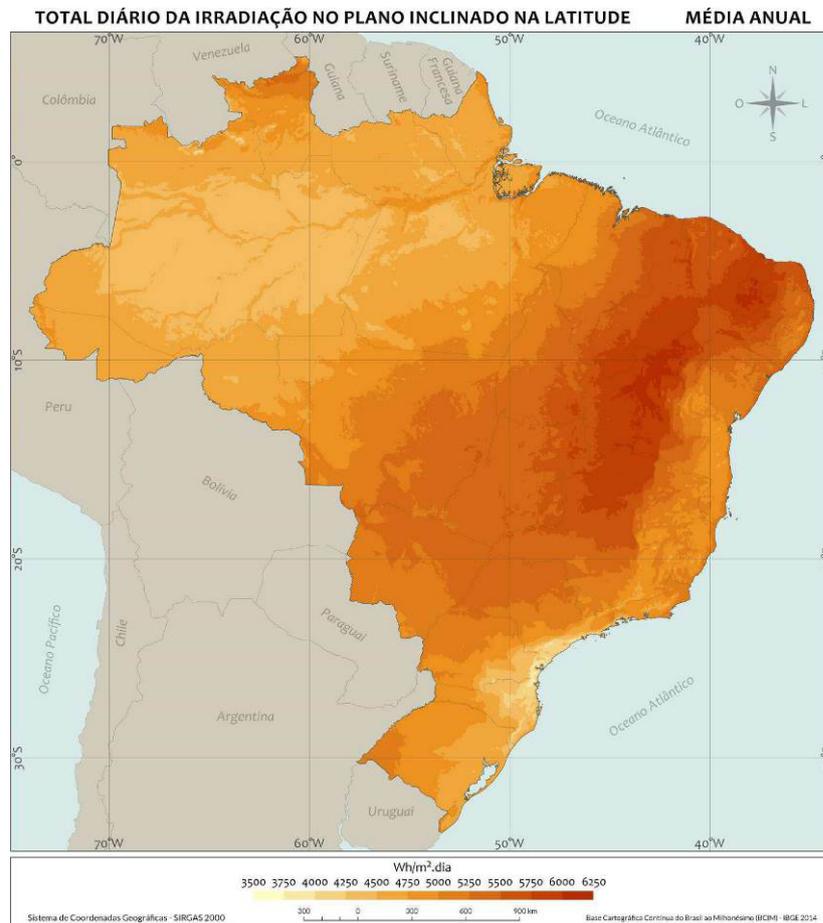


**Figura 1: Matriz de Produção de Energia Elétrica no Brasil – julho/2019**  
**Fonte: Ministério de Minas e Energia (2019).**

Apesar da baixa geração em comparação com as demais fontes, o Brasil possui elevado potencial energético tratando-se da geração solar. Isso se deve ao fato de que a intensidade dos raios solares depende da latitude geográfica da área em questão e da estação do ano e que a maior parte do território brasileiro se encontra na região subtropical (PEREIRA et al., 2017). A Figura 2 apresenta a média anual de irradiação solar no território brasileiro.

Sendo uma energia renovável de fácil acesso, “amiga do ambiente” e em grande abundância, a energia solar surge como uma grande candidata para suprir as necessidades energéticas do mundo, uma vez que essa energia irradia todos os dias na superfície de nosso planeta. Tratando-se de sua utilização, a energia solar pode ser convertida em eletricidade por meio de painéis e células fotovoltaicas ou então em calor a partir de coletores solares (JAYANTHY et al., 2019).

Um coletor solar convencional consiste em uma placa absorvedora acoplada a uma rede de tubos preenchidos com fluido de trabalho, geralmente água. A energia solar é então absorvida pelo fluido e transferida para um recipiente de armazenamento por meio de circulação forçada. Entre as desvantagens desse tipo de coletor encontra-se a corrosão dos tubos, capacidade de transferência limitada por parte do fluido e também elevada perda de calor (DEHAJ; MPHIABADI, 2019; DUFFIE et al., 2020).



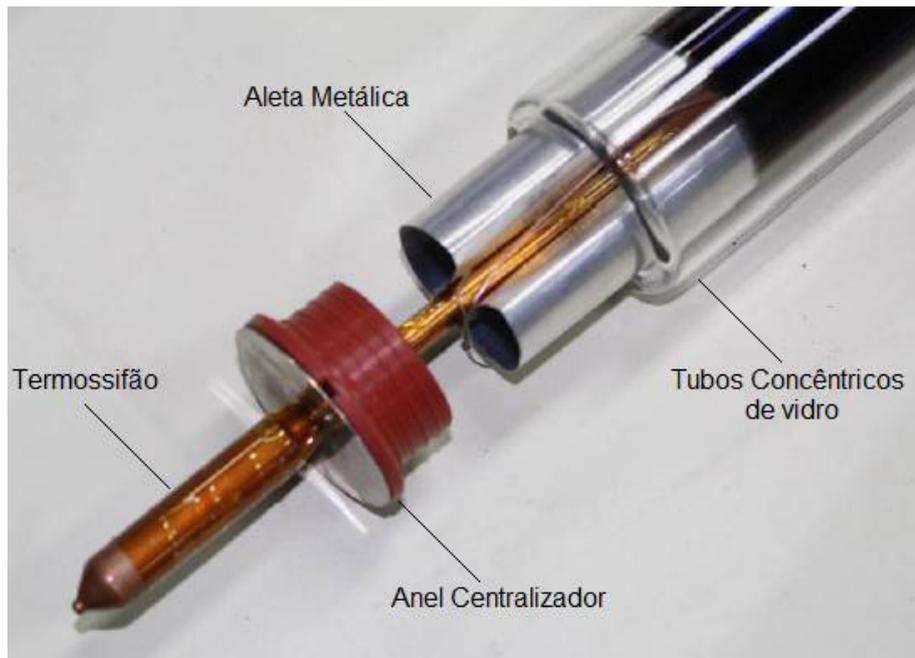
**Figura 2: Média anual de irradiação solar no território brasileiro**  
**Fonte: Adaptado de Pereira et al. (2017).**

Uma alternativa aos coletores convencionais consiste nos coletores solares de tubos a vácuo, que consistem em vários tubos de vidro evacuados, contendo ou não termossifões ou tubos de calor em seu interior (JAYANTHI et al., 2019). Os tubos a vácuo contendo tubos de calor ou termossifões em comparação com os coletores de tubo a vácuo que não utilizam esses dispositivos apresentam menor perda térmica e também maior eficiência, além de apresentarem maior condutividade térmica e menor resistência térmica (HAN; TIAN; YAN, 2009; DEHAJ; MPHIABADI, 2019). A Figura 3 apresenta uma fotografia de um coletor solar de tubo a vácuo (de alta pressão) contendo termossifões, situado em área externa do Laboratório de Energia Solar (LabSOLAR) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), *Câmpus* Ponta Grossa.

No interior de cada tubo de vidro existe uma placa absorvedora (aleta metálica) em que cada termossifão é situado. A radiação solar incide sobre o tubo de vidro e é transformada em calor na placa absorvedora. Esse calor é então transferido ao termossifão que, posteriormente, trocará esse calor com água corrente sobre o condensador desse. Tanto a água corrente como a região do condensador estão inseridas em um trocador de calor denominado *mainfold*, que é isolado do ambiente. O espaço anular entre os tubos concêntricos de vidro é evacuado de forma a se evitar perdas térmicas devido à convecção natural (JAYANTHI et al., 2019). A Figura 4 ilustra o interior de um tubo pertencente a esse tipo de coletor solar.



**Figura 3: Coletor Solar de Tubo a Vácuo em área externa do LabSOLAR/UTFPR/Ponta Grossa**  
**Fonte: Autoria própria.**



**Figura 4: Interior de um tubo de um coletor solar de tubo a vácuo**  
**Fonte: Autoria própria.**

Diante do exposto, o objetivo deste artigo consiste em executar uma investigação experimental da influência do fluido de trabalho dos termossifões no desempenho térmico de um coletor solar de tubo a vácuo de alta pressão. Para isso, foram construídos, testados e comparados três termossifões distintos contendo água destilada, nanofluido de 5% óxido de grafeno e nanofluido de 10% de óxido de grafeno. Os detalhes da construção e testes experimentais executados com os termossifões são descritos nas seções subsequentes.

## 1 TERMOSSIFÕES

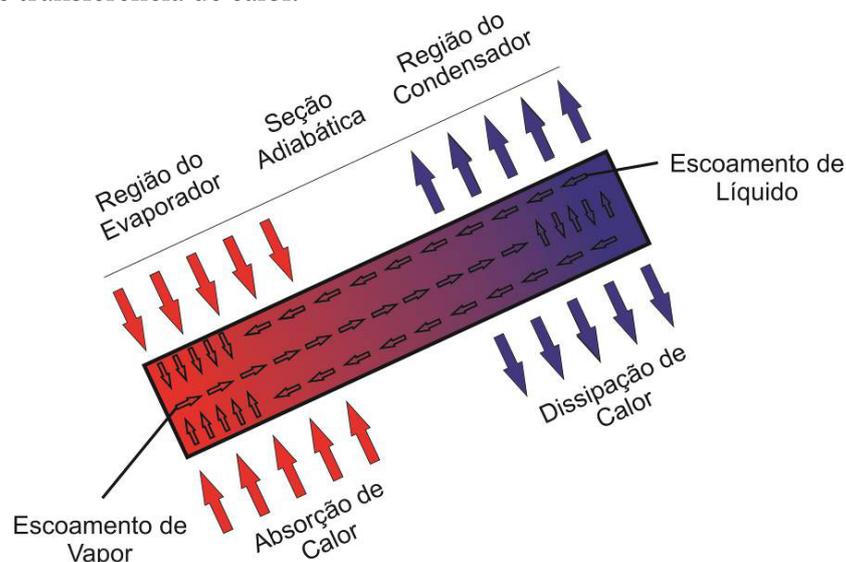
Termossifões e tubos de calor são dispositivos passivos de transferência de calor. Suas principais características consistem no aproveitamento do calor latente de vaporização para trocar calor a elevadas taxas e grandes distâncias com pequeno gradiente de temperatura.

Esses dispositivos ganharam popularidade nas últimas décadas devido à sua elevada eficiência, ao mesmo tempo em que não necessitam de potência de bombeamento externo e não possuem partes móveis, havendo certa facilidade de construção e baixo custo (REAY; KEW; MCGLEN, 2014).

Tanto um termossifão quanto um tubo de calor consistem basicamente em um tubo metálico oco, evacuado, onde certa quantidade de fluido de trabalho é inserida. A principal diferença de um termossifão para um tubo de calor é que o tubo de calor é revestido internamente por uma estrutura porosa que tem como intuito carregar o fluido de trabalho, ao passo que o meio de transporte do fluido de trabalho no termossifão é baseado em gradientes de pressão e na ação da gravidade (FAGHRI, 2014).

Um termossifão possui três regiões com funções distintas em sua operação. Essas regiões são chamadas de evaporador, seção adiabática e condensador. O evaporador, a região inferior do tubo, é a região em que está contido o fluido de trabalho. Nessa região o calor é absorvido de uma fonte quente e o fluido de trabalho é submetido a um processo de evaporação. O vapor gerado, devido à diferença de pressão, move-se para a região mais fria que se encontra na região superior do tubo (condensador). Essa região tem como função dissipar o calor que é absorvido no evaporador e é carregado pelo vapor de fluido para uma fonte fria. O vapor então perde energia na forma de calor e é condensado, ocasionando o retorno do fluido de trabalho no estado líquido para o evaporador por gravidade, fechando o ciclo. A seção adiabática está localizada entre o evaporador e o condensador. Nessa seção, não há transferência de calor entre o termossifão e o ambiente. Em alguns casos, a seção adiabática está ausente (MANTELLI, 2013).

No caso de um coletor solar de tubo a vácuo (de alta pressão) contendo termossifões, a região do evaporador consiste na região que está dentro dos tubos e inserida na placa absorvedora. O calor proveniente da radiação solar aquece o fluido de trabalho e o vapor do fluido sobe em direção ao condensador. O condensador fica localizado no interior do *mainfold* e dissipa o calor absorvido no evaporador para a água de circulação, aquecendo-a. A Figura 5 ilustra um diagrama esquemático do funcionamento de um termossifão. Pode ser observado que, pelo fato de o seu funcionamento depender da gravidade, a região do evaporador deve sempre estar situada abaixo do condensador, sendo necessária uma certa inclinação em relação à horizontal para um melhor funcionamento desse dispositivo passivo de transferência de calor.



**Figura 5: Diagrama Esquemático de um Termossifão**  
Fonte: Autoria própria.

As propriedades termofísicas do fluido de trabalho estão diretamente relacionadas com o desempenho de um termossifão. Pressão de vapor, estabilidade, toxicidade, condutividade térmica, compatibilidade química entre o fluido de trabalho e o material do invólucro do tubo devem ser levados em consideração, sendo a faixa de temperatura operacional uma das primeiras considerações que devem ser feitas na escolha do fluido de trabalho (REAY; KEW; MCGLEN, 2014; ERSOZ, 2016).

## 2 NANOFLUIDOS

Nanofluidos consistem em fluidos-bases adicionados de nanopartículas. Propriedades físicas do fluido transportador podem ser aprimoradas com a adição das nanopartículas como condutividade térmica, por exemplo. Dessa forma, nanofluidos ganham relevância na Engenharia Mecânica principalmente em estudos envolvendo o projeto de trocadores de calor. Em comparação aos fluidos convencionais conhecidos, os nanofluidos apresentaram dois benefícios principais, sendo eles: o incremento da transferência de calor e menor área de superfície necessária para os trocadores de calor (KANNADASAN; RAMANATHAN; SURESH, 2012; KHAIRUL et al., 2012; FERREIRA et al., 2018).

Os nanofluidos podem aumentar o desempenho de um dispositivo como o termossifão, gerando novas faixas de aplicação e operação em equipamentos diversos (REAY; KEW; MCGLEN, 2014). A presença de nanopartículas dispersas em um fluido-base não interfere em seu calor latente de vaporização ou em sua tensão superficial, sendo que a temperatura de operação do fluido-base é semelhante à de seu nanofluido. Com isso, a utilização de nanofluidos apresenta a capacidade de melhorar a transferência de calor do sistema quando a troca térmica por convecção e condensação desempenhe papel importante (DA SILVA, 2010). O uso de nanofluidos em tubos de calor e termossifões pode ser observado em Stremel (2017), Reji et al. (2020), Khajehpour et al. (2020) e Chen & Li (2020).

## 3 METODOLOGIA

Essa seção apresenta os materiais e métodos utilizados para obtenção dos nanofluidos, construção dos termossifões e análise térmica desses.

### 3.1 NANOFLUIDOS DE ÓXIDO DE GRAFENO

Para a obtenção do óxido de grafeno foi utilizado o método de *Hummers*, comumente usado como um método confiável de produção de grandes quantidades de óxido de grafite e que também pode ser revisado na criação de uma versão com uma molécula de espessura da substância conhecida como óxido de grafeno. Esse método consiste em um processo químico que pode ser utilizado para gerar óxido de grafite por meio da adição de permanganato de potássio a uma solução de grafite, nitrato de sódio e ácido sulfúrico (HUMMERS; OFFEMAN, 1958). Esse método é apresentado com mais detalhes em Hummers & Offeman (1958) e Murray (2013).

Primeiramente, 25 ml de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) foram adicionados em um béquer inserido em um banho de gelo. Um total de 1 g de grafite foi adicionado ao béquer, que foi mantido em banho de gelo até atingir uma temperatura abaixo de 20 °C, quando então 3 g de permanganato de potássio ( $KMnO_4$ ) foram adicionados gradualmente a esse. Utilizando um agitador magnético e uma barra magnética, a mistura foi mantida em agitação por um total de 4 horas, sendo que, a cada 30 minutos, visando ao aumento do nível de esfoliação do grafite, a mistura foi submetida a 10 minutos em banho ultrassônico. Ao final desse processo, foi obtida uma solução de coloração verde escuro.

Feito isso e mantendo o béquer em banho de gelo, adicionaram-se cuidadosa e vagorosamente 50 ml de água destilada à solução, sendo mantida a temperatura do béquer abaixo de 50 °C, de forma a se obter o processo de oxidação do grafite. A formação de óxido de grafeno é evidenciada pela mudança da coloração da solução para marrom escuro, sendo então adicionados 100 ml de água destilada, intentando a oxidação do restante de grafite que ainda não fora oxidado.

Visando à remoção do excesso de  $KMnO_4$  da solução adicionam-se a ela 5 ml de peróxido de hidrogênio ( $H_2O_2$  - v35%), interrompendo a reação de oxidação e fornecendo uma coloração marrom

clara à reação. Posteriormente, o béquer é removido do banho de gelo e a solução é aquecida até uma temperatura de 90 °C por um período de tempo de 30 minutos, obtendo coloração escura.

Após a solução atingir a temperatura ambiente, foram realizadas duas lavagens com uma solução de ácido clorídrico (HCl 10%) e duas lavagens com água destilada no óxido de grafeno, obtendo uma coloração mais escura a cada lavagem. Feito isso, o óxido de grafeno é submetido a um banho ultrassônico por 10 minutos e, então, conservado em local seco e sem iluminação.

Com o objetivo de confirmar a eficácia do processo de obtenção de óxido de grafeno, este é submetido ao processo de absorvância UV, em que devem ser detectadas a presença de duas bandas características: uma em 233 nm, relacionada à transição  $\pi-\pi^*$  de ligações C-C dos anéis aromáticos, e outra em aproximadamente 301 nm, associada à transição  $n-\pi^*$  de ligações C=O.

Para obtenção dos nanofluidos utilizados, foi misturado óxido de grafeno em água destilada nas proporções de 5% e 10% em massa.

### 3.2 CONSTRUÇÃO DOS TERMOSSIFÕES

Foram testados três termossifões diferentes com vistas à verificação de qual apresentava melhor desempenho térmico. Os termossifões foram fabricados em cobre ASTM B75, liga 122, utilizando água destilada, nanofluido de óxido de grafeno 5% e nanofluido de óxido de grafeno 10% como fluido de trabalho com razão de preenchimento de 50% (razão entre volume de fluido e o volume do evaporador do termossifão).

A seção do evaporador possuía comprimento de 1.600 mm, ao passo que as seções adiabáticas e do condensador apresentaram comprimentos de 40 mm e 35 mm, respectivamente, possuindo comprimento total de 1.675 mm. As seções do evaporador e seção adiabática possuíam diâmetros externo e interno de 8,33 mm e 6,15 mm, respectivamente, ao passo que o condensador possuía diâmetros externo e interno de 13,40 mm e 13,00 mm, respectivamente. As dimensões dos termossifões construídos foram baseadas nas dimensões reais dos termossifões contidos em coletor solar de tubos a vácuo de alta pressão comercial.

A metodologia de fabricação dos termossifões (limpeza, montagem, teste de estanqueidade, processo de evacuação e preenchimento com o fluido de trabalho), ensaios experimentais e análise térmica dos termossifões foram executadas levando em consideração as informações contidas em Antonini Alves et al. (2018).

Cada termossifão foi constituído por um invólucro (evaporador, adiabático e condensador), duas tampas e um tubo capilar. O primeiro passo consistiu na construção de um adaptador entre as seções adiabáticas e condensador, uma vez que essas possuem diâmetros diferentes, além da obtenção das tampas de cobre que têm por objetivo vedar o termossifão. A conexão e as tampas foram fabricadas a partir de um processo de torneamento, sendo que essas e o condensador podem ser observados na Figura 6.



**Figura 6: Conexões e Condensador**  
**Fonte: A autoria própria.**

O próximo passo consistiu na limpeza de todas as partes do termossifão. Primeiramente o invólucro, as duas tampas, a conexão e o tubo capilar foram limpos utilizando água e sabão. Posteriormente o invólucro teve seu interior limpo utilizando-se de acetona para retirar qualquer sujeira presente em seu interior. As duas tampas, a conexão e o capilar foram submetidos a um banho ultrassônico *Kondentech™*, permanecendo mergulhados por 20 minutos em acetona (Figura 7). Finalmente, as extremidades do invólucro, as duas tampas e o capilar foram banhadas em uma solução de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$  de 0,1 M) por um tempo inferior a um minuto. Esse processo de limpeza foi necessário para garantir a molhabilidade do fluido de trabalho, a eliminação de impurezas e melhorar a qualidade do vácuo.



**Figura 7: Banho ultrassônico**  
**Fonte: A autoria própria.**

Após o processo de limpeza, o termossifão foi montado. Para tal, foi utilizado um maçarico portátil e estanho. Foi realizada a brasagem de todas as conexões existentes, sendo essas a conexão entre seção adiabática e condensador, as duas tampas nas extremidades do termossifão e o tubo capilar na tampa contida na extremidade do evaporador. Parte da montagem pode ser observada na Figura 8.



**Figura 8: Montagem do Termossifão**  
**Fonte: Autoria própria.**

Para verificar se a brasagem foi realizada de forma correta, executou-se o teste de estanqueidade (Figura 9). Este consistiu em inserir o termossifão montado em um recipiente com água ao passo que ar foi bombeado em seu interior por meio de uma bomba de deslocamento positivo manual conectada ao tubo capilar por meio de uma mangueira flexível. Caso houvesse alguma falha, bolhas de ar iriam surgir mostrando as falhas na brasagem, o que tornaria o termossifão incapacitado para operar.



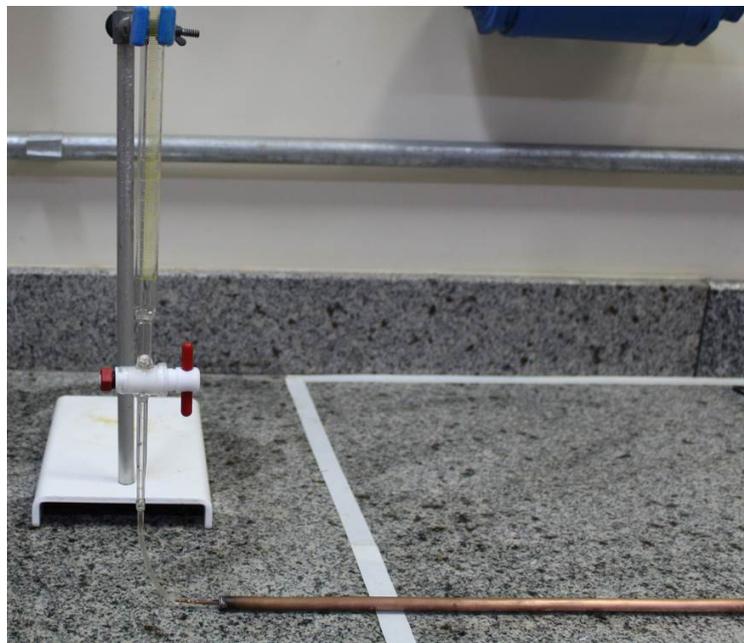
**Figura 9: Teste de Estanqueidade**  
**Fonte: Autoria própria.**

Com o teste de estanqueidade realizado, foi executada a evacuação do termossifão (Figura 10). Para isso, foi utilizada uma bomba de vácuo *EOS Value™*, modelo *i260SV*, que foi conectada ao termossifão por meio de uma mangueira em seu capilar, utilizando graxa de alto vácuo *Dow Corning™* nas conexões para ocorrer um acoplamento sem vazamentos. A bomba de vácuo foi mantida em funcionamento por 8 horas, momento em que o fluxo na mangueira foi interrompido com o auxílio de um *fôrceps* e a bomba foi desligada.



**Figura 10: Evacuação do Termossifão**  
**Fonte: Autoria própria.**

Após a evacuação, foi realizado o preenchimento com fluido de trabalho para cada termossifão (Figura 11). Para tal, foi utilizada uma bureta com uma mangueira adaptada em sua extremidade. O termossifão evacuado foi acoplado à bureta por meio da mangueira polimérica, que foi preenchida com o fluido de trabalho retirando qualquer bolha de ar que ainda pudesse haver. Com a bureta completamente preenchida com o fluido de trabalho, a válvula da bureta foi aberta vagarosa e cuidadosamente para que não se formasse nenhuma bolha de ar nas conexões entre a bureta e o termossifão. O *fórceps* foi aberto com extremo cuidado para drenar o fluido de trabalho até que o termossifão fosse carregado com a razão de preenchimento desejada.



**Figura 11: Preenchimento do Termossifão**  
**Fonte: Autoria própria.**

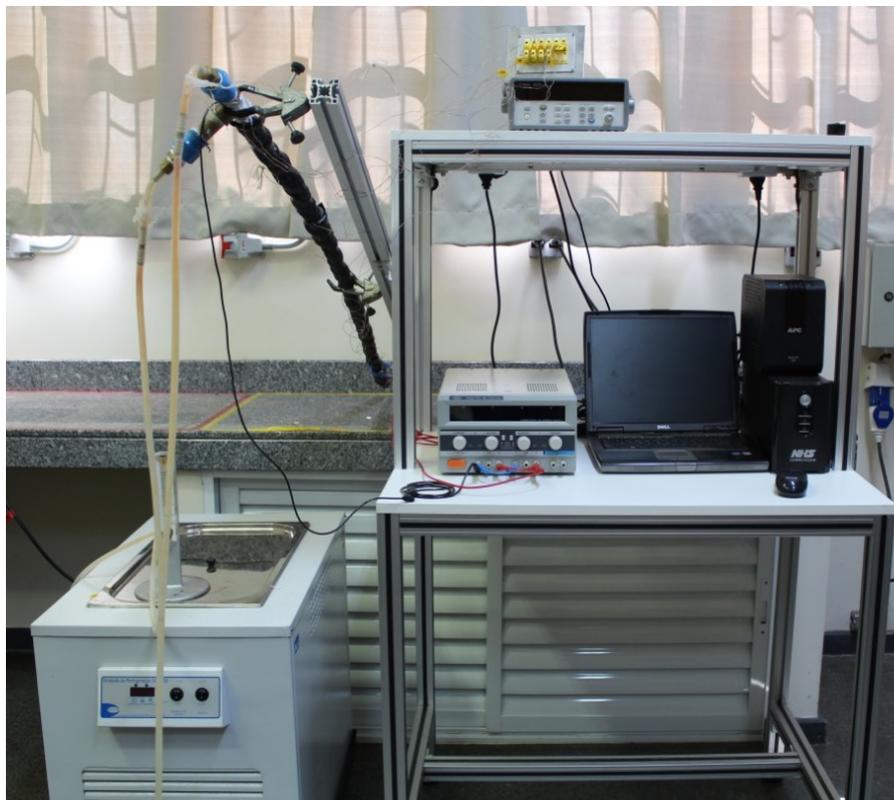
Após a quantidade correta de fluido de trabalho ser carregada no termossifão, o *fórceps* foi fechado e, então, o capilar de cobre foi conformado com um alicate de pressão, bloqueando a entrada do ar. Ainda foi realizado o preenchimento do capilar com estanho por meio de um processo de brasagem, completando a vedação do termossifão. O processo de vedação pode ser observado na Figura 12.



**Figura 12: Vedação do termossifão**  
**Fonte: Autoria própria.**

### 3.3 APARATO EXPERIMENTAL

O aparato experimental utilizado neste estudo é mostrado na Figura 13 e foi composto por uma fonte de alimentação *Politerm™16E*, um sistema de aquisição de dados *Agilent™ 34970A* com um multiplexador de 20 canais, um banho ultratermostatizado *Solab™ SL-130*, um microcomputador portátil *Dell™*, um nobreak *NHS™* e um medidor de vazão de área variável *Omega Engineering™ FL-2051* com válvula reguladora.



**Figura 13: Aparato Experimental**  
**Fonte: Autoria própria.**

Para avaliar as temperaturas dos termossifões, um total de oito termopares *Omega Engineering*<sup>TM</sup> do tipo K foram distribuídos ao longo dos dispositivos, um no condensador ( $T_{cond}$ ), um na seção adiabática ( $T_{adiab}$ ) e seis no evaporador ( $T_{evap,1}$ ;  $T_{evap,2}$ ;  $T_{evap,3}$ ;  $T_{evap,4}$ ;  $T_{evap,5}$ ;  $T_{evap,6}$ ) igualmente espaçados. Os termopares foram fixados na superfície externa dos dispositivos passivos de transferência de calor por meio da utilização de uma fita adesiva termo sensível *Kapton*<sup>TM</sup>. Outros dois termopares foram inseridos nas extremidades das mangueiras de silicone visando à verificação das temperaturas de entrada ( $T_{ent}$ ) e saída ( $T_{sai}$ ) da água em circulação sob o condensador.

### 3.4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A comparação dos termossifões foi realizada por meio de uma análise térmica. Para isso, foi simulado o funcionamento de cada termossifão por meio da absorção de calor na região do evaporador e subsequente dissipação de calor na região do condensador.

Para simular a absorção de calor na região do evaporador, uma fita resistiva *Omega Engineering*<sup>TM</sup>, com espessura de 0,1 mm e largura de 3,5 mm, foi enrolada em todo o comprimento do evaporador. A fita também foi conectada à fonte de alimentação utilizando-se, para isso, dois cabos banana-jacaré, e, por meio do efeito *Joule*, a potência fornecida pela fonte para a fita é dissipada na forma de calor sobre o evaporador, aquecendo o fluido de trabalho. Para garantir que o calor gerado pelo efeito *Joule* fosse transmitido para o evaporador, essa seção foi isolada do ambiente externo com isolamento térmico aeronáutico e uma camada de polietileno, assim como a região adiabática, que não deve apresentar trocas térmicas com o ambiente externo.

No condensador, com o objetivo de simular a dissipação de calor, três vazões de água distintas (0,50 l/min; 0,75 l/min e 1,00 l/min) foram utilizadas para realizar o resfriamento do termossifão e condensação do fluido de trabalho. Para realizar o escoamento sobre o condensador, foi acoplado um tê de PVC de 50 mm de diâmetro à essa região e também ao banho ultratermostatizado por meio de conexões e mangueiras de silicone, como pode ser observado na Figura 13, sendo todas as conexões vedadas com silicone acético a fim de se evitar vazamentos. A água utilizada para o processo de resfriamento e a temperatura do ambiente foram mantidas em  $17,0\text{ °C} \pm 0,5\text{ °C}$  pelo banho ultratermostatizado e um sistema de ar condicionado *Rhemm*<sup>TM</sup>, respectivamente. Testes experimentais foram realizados para cargas térmicas de 35, 55 e 75 W em uma posição a  $25^\circ$  da horizontal (evaporador abaixo do condensador) correspondente à latitude da cidade de Ponta Grossa/PR:  $25^\circ 05' 42''$  Sul.

Os dados de temperatura foram coletados a cada dez segundos por meio do uso do sistema de aquisição de dados. Cada valor de carga térmica foi mantido até a obtenção do regime permanente e cada teste foi repetido três vezes visando à verificação da repetibilidade dos dados.

A análise térmica foi realizada com base nas temperaturas médias das três seções do termossifão para cada potência dissipada e cada valor de vazão volumétrica de água. A partir desses valores foi possível a determinação da resistência térmica ( $R_{th}$ ) de cada termossifão, sendo considerado o termossifão de melhor desempenho aquele que apresentar menor valor de  $R_{th}$ . A resistência térmica pode ser calculada pela Equação (1), em que  $T_{cond}$  e  $T_{evap}$  representam as temperaturas médias no condensador e evaporador, respectivamente, e  $q$  representa a carga térmica aplicada ao termossifão em questão.

$$R_{th} = \frac{T_{evap} - T_{cond}}{q} \quad (1)$$

### 3.5 INCERTEZA EXPERIMENTAL

Tratando-se da análise de incertezas, resultados de medições experimentais carregam consigo uma incerteza de medição. A análise desta incerteza faz-se necessária para estimar o grau de dúvida associado ao resultado de medição (PEDOTT, 2012). Para realizar a análise de incerteza foi utilizado o método de incerteza descrito por Holman (1994).

Tendo como princípio a combinação de incerteza de grandeza relacionada, para realizar a propagação das incertezas foi utilizado o *software Engineering Equation Solver<sup>TM</sup> (EES<sup>TM</sup>)*. Kline & McClintok (1953) propuseram que a incerteza  $\Delta R$  de um resultado  $R = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  com medidas em  $x_1, x_2, \dots, x_n$  é expressada pela Equação (2).

$$\Delta R = \sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} \partial x_1\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} \partial x_2\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} \partial x_n\right)^2} \quad (2)$$

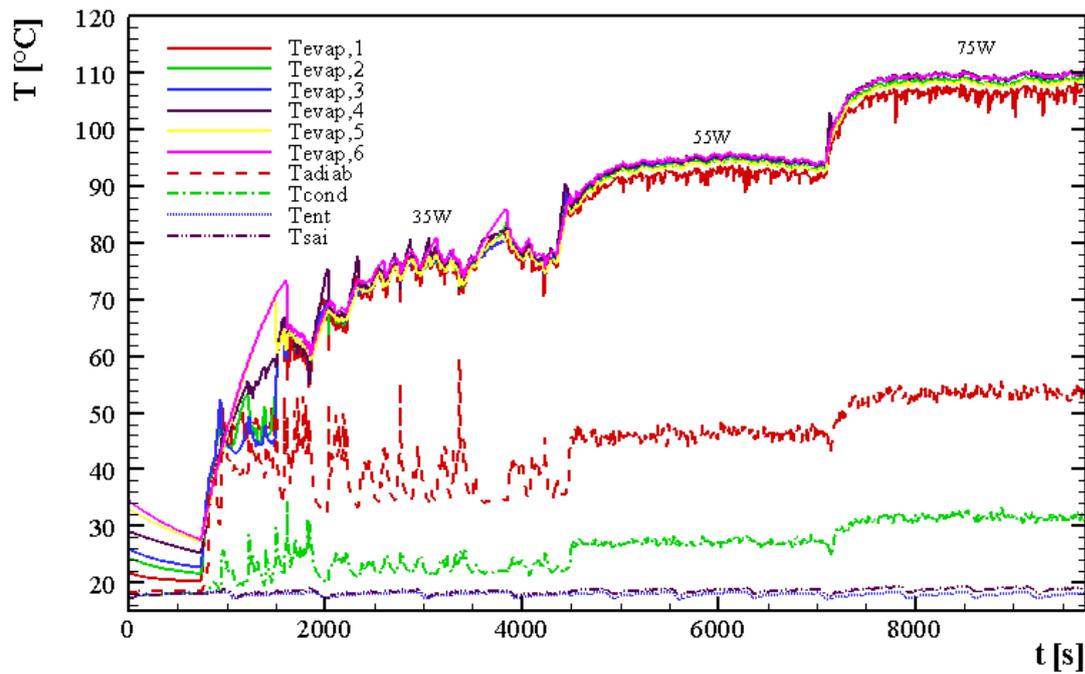
As incertezas experimentais envolvidas neste estudo estão apresentadas em detalhes na Tabela 1.

Parâmetro	Instrumento de medição	Unidade	Incerteza
Temperaturas	<u>Termopar do Tipo K</u>	°C	1,27
Dimensões	<u>Escala milimetrada</u>	mm	0,5
Diâmetros	<u>Paquímetro</u>	mm	0,5
Vazão Volumétrica	Medidor de vazão	L/min	3%
Tensão	Fonte de Potência	V	3mV
Corrente	Fonte de Potência	A	3mA

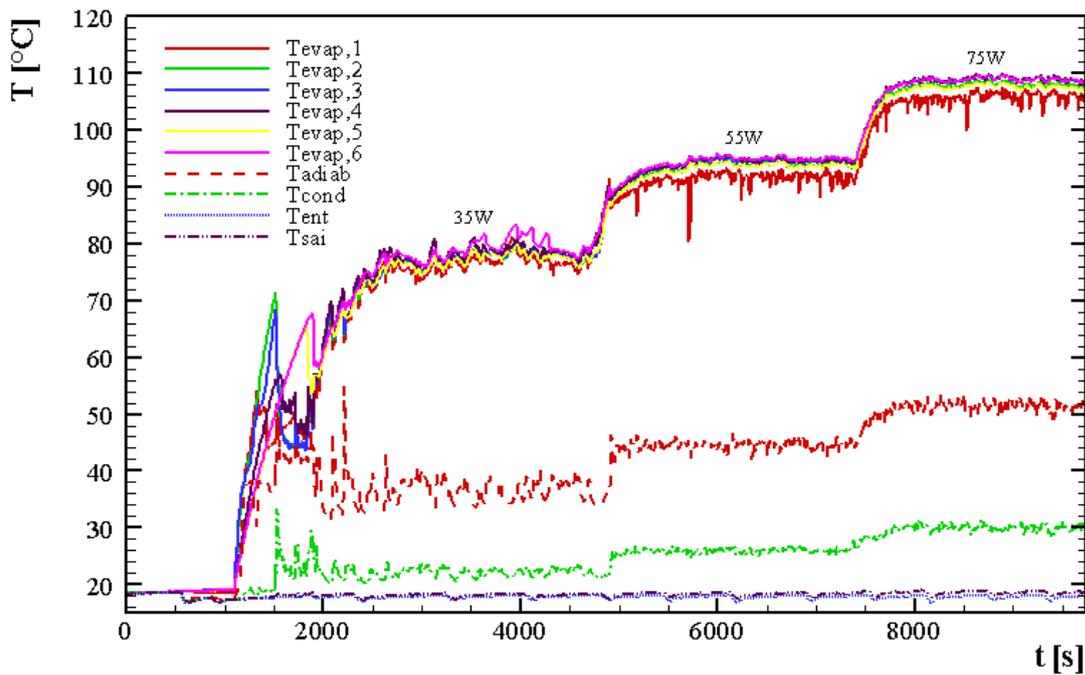
**Tabela 1: Incertezas de medição**  
**Fonte: Autoria própria.**

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

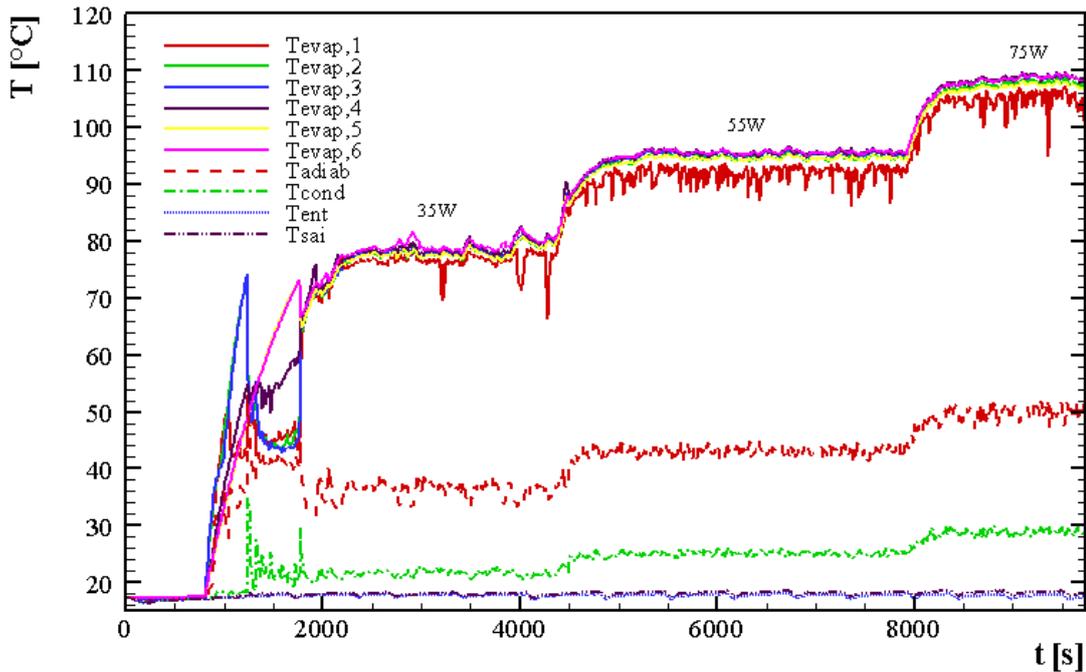
As Figuras 14 a 16 mostram a distribuição de temperaturas ao longo do tempo para os termossifões contendo água destilada como fluido de trabalho para vazões de 0,50 l/min, 0,75 l/min e 1,00 l/min, respectivamente. A ação do banho ultratermostatizado pode ser percebida pelos valores de entrada da água, mantidos sempre próximos de 17,0 °C.



**Figura 14: Distribuição de temperaturas para vazão de 0,50 l/min e água destilada como fluido de trabalho**  
**Fonte: Autoria própria.**



**Figura 15: Distribuição de temperaturas para vazão de 0,75 l/min e água destilada como fluido de trabalho**  
**Fonte: Autoria própria.**



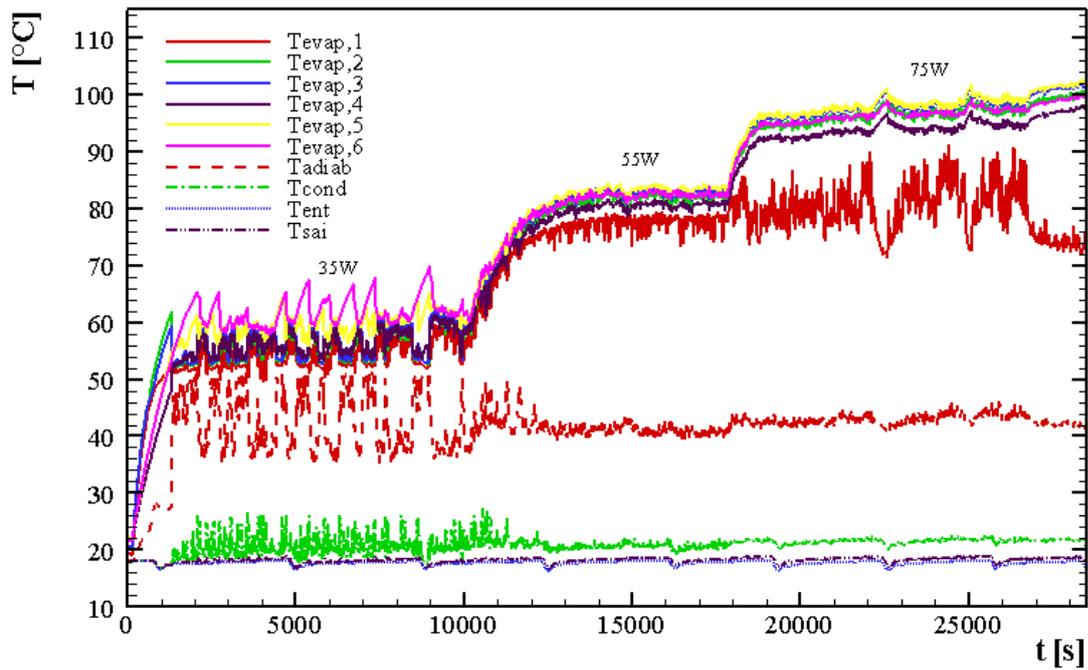
**Figura 16: Distribuição de temperaturas para vazão de 1,00 l/min e água destilada como fluido de trabalho**  
**Fonte: Autoria própria.**

Pode-se notar que no início dos testes os dados de temperatura apresentaram instabilidades para a potência de 35 W. Isso se deve ao fato de ser necessário um tempo inicial de equilíbrio entre a quantidade de fluido sendo evaporada e também a quantidade de fluido que é condensado e retorna ao evaporador, acontecendo então picos de temperatura. A Tabela 2 apresenta as temperaturas médias (em °C) obtidas em regime permanente para os três testes. Percebe-se que, em geral, o aumento da vazão resultou em menores valores de temperatura para as três regiões do termossifão e para as três cargas térmicas aplicadas.

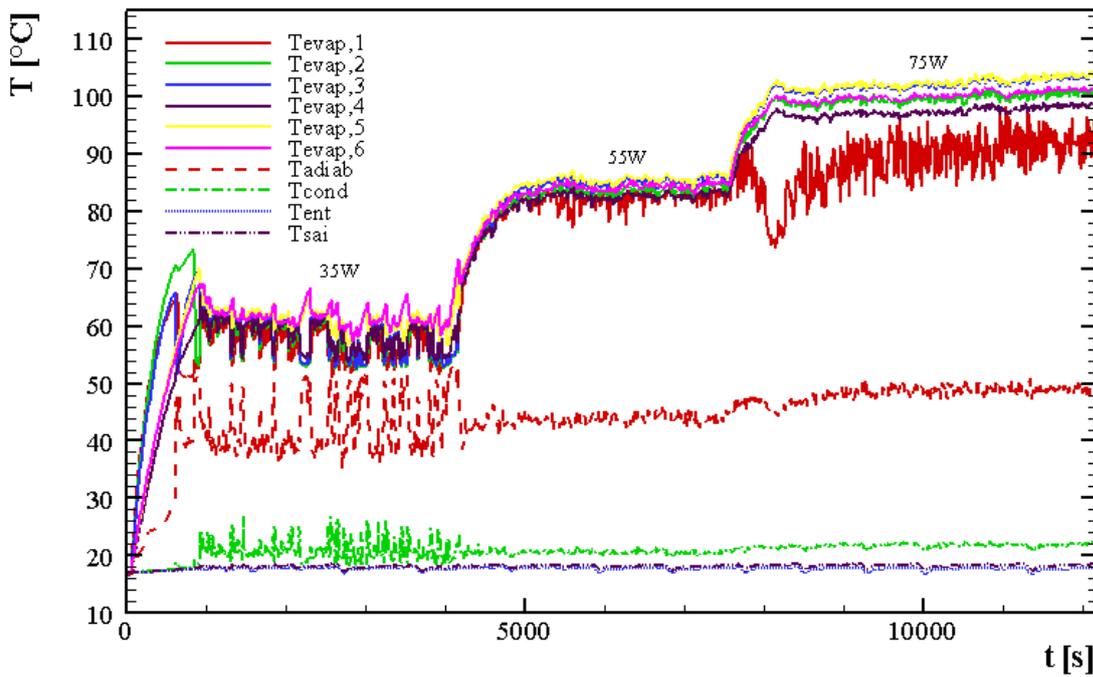
Vazão [L/min]	35W			55W			75W		
	$T_{evap}$	$T_{adiab}$	$T_{cond}$	$T_{evap}$	$T_{adiab}$	$T_{cond}$	$T_{evap}$	$T_{adiab}$	$T_{cond}$
0,50	75,5	38,4	22,9	93,8	46,3	27,2	108,6	53,5	31,7
0,75	77,6	36,8	22,3	93,8	44,6	26,0	108,0	51,6	30,1
1,00	78,2	36,4	21,7	94,7	43,2	25,2	107,8	50,0	28,8

**Tabela 2: Temperaturas em [°C] obtidas em regime permanente para água como fluido de trabalho**  
**Fonte: Autoria própria.**

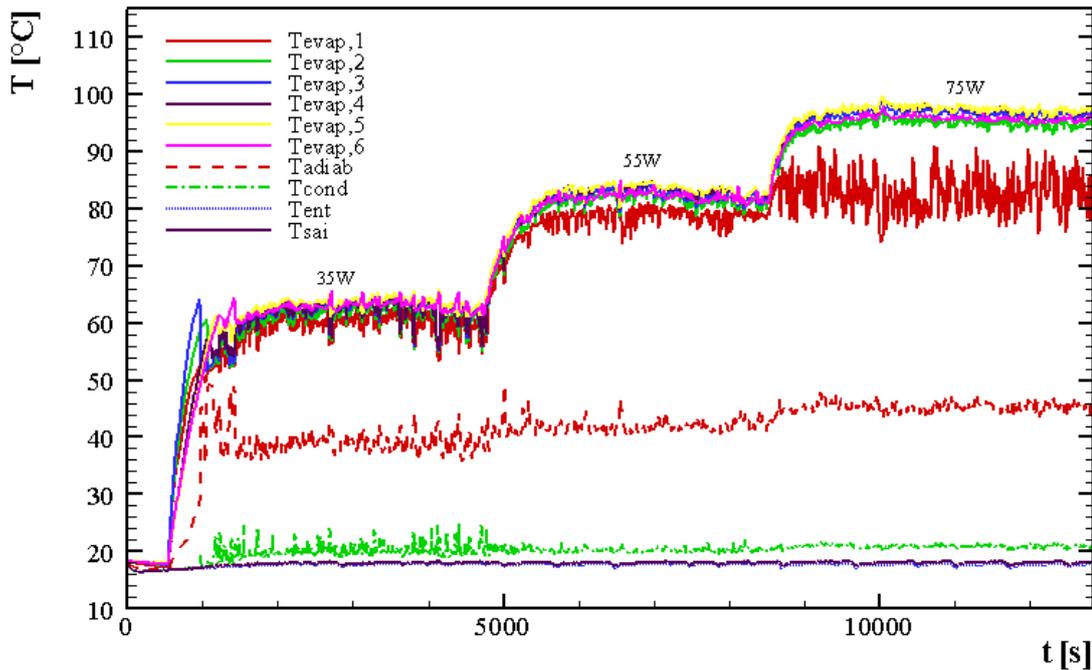
As Figuras 17 a 19 apresentam a distribuição de temperaturas ao longo do tempo para os termossifões contendo óxido de grafeno 5% como fluido de trabalho para vazões de 0,50 l/min, 0,75 l/min e 1,00 l/min, respectivamente.



**Figura 17: Distribuição de temperaturas para vazão de 0,50 l/min e óxido de grafeno 5% como fluido de trabalho**  
**Fonte: Autoria própria.**



**Figura 18: Distribuição de temperaturas para vazão de 0,75 l/min e óxido de grafeno 5% como fluido de trabalho**  
**Fonte: Autoria própria.**



**Figura 19: Distribuição de temperaturas para vazão de 1,00 l/min e óxido de grafeno 5% como fluido de trabalho**  
**Fonte: Autoria própria.**

Assim como nos resultados obtidos com água destilada, para o óxido de grafeno 5% ainda se verifica a presença de instabilidades nos valores de temperatura para a potência de 35 W. A Tabela 3 apresenta as temperaturas médias (em °C) obtidas em regime permanente para os três testes. Pode ser percebido que as temperaturas não diminuíram como uma regra geral devido ao aumento da vazão – assim como ocorreu com a água. Além disso, comparando-se as Tabelas 2 e 3, pode ser observado que o termossifão preenchido com óxido de grafeno 5% apresentou temperaturas menores para todas as cargas térmicas em relação ao termossifão preenchido com água, mostrando a alteração das propriedades termofísicas do fluido-base pela adição das nanopartículas.

Vazão [L/min]	35W			55W			75W		
	$T_{evap}$	$T_{adiab}$	$T_{cond}$	$T_{evap}$	$T_{adiab}$	$T_{cond}$	$T_{evap}$	$T_{adiab}$	$T_{cond}$
0,50	57,8	42,6	20,6	81,5	41,1	20,4	94,2	43,0	21,6
0,75	58,8	42,2	20,9	83,9	43,9	20,6	98,7	48,7	21,9
1,00	62,1	39,0	20,3	82,0	42,0	20,2	94,2	45,4	21,0

**Tabela 3: Temperaturas em °C obtidas em regime permanente para óxido de grafeno 5% como fluido de trabalho**  
**Fonte: Autoria própria.**

As Figuras 20 a 22 apresentam a distribuição de temperaturas ao longo do tempo para os termossifões contendo óxido de grafeno 10% como fluido de trabalho para vazões de 0,50 l/min, 0,75 l/min e 1,00 l/min, respectivamente. A Tabela 4 apresenta as temperaturas médias (em °C) obtidas em regime permanente para os três testes.

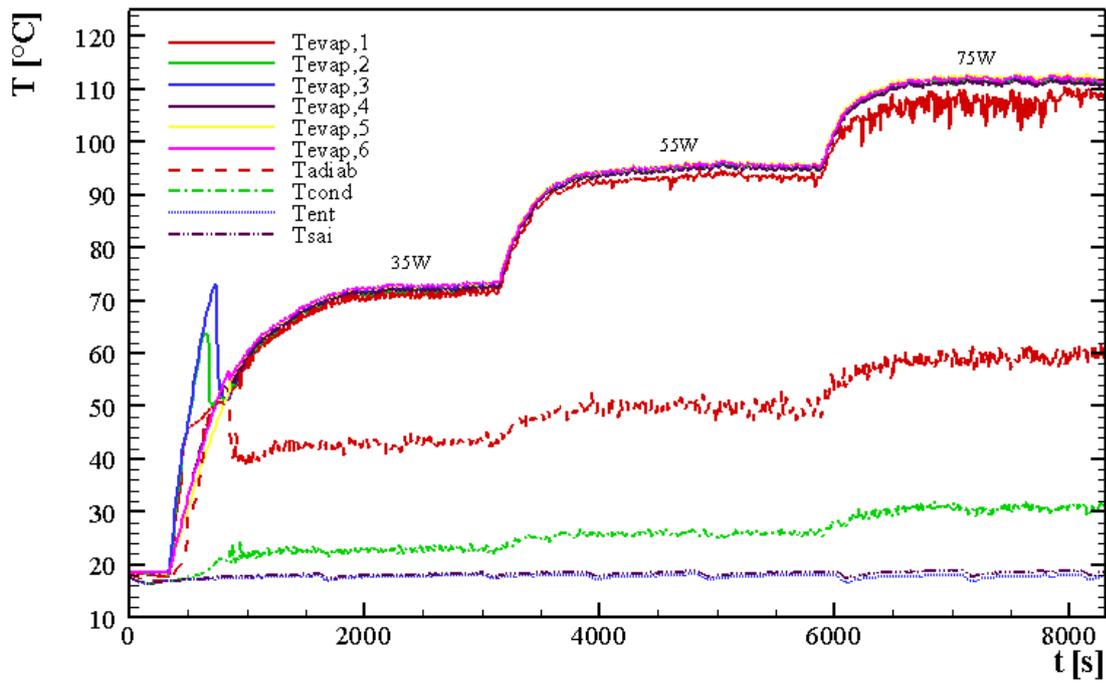


Figura 20: Distribuição de temperaturas para vazão de 0,50 l/min e óxido de grafeno 10% como fluido de trabalho

Fonte: Autoria própria.

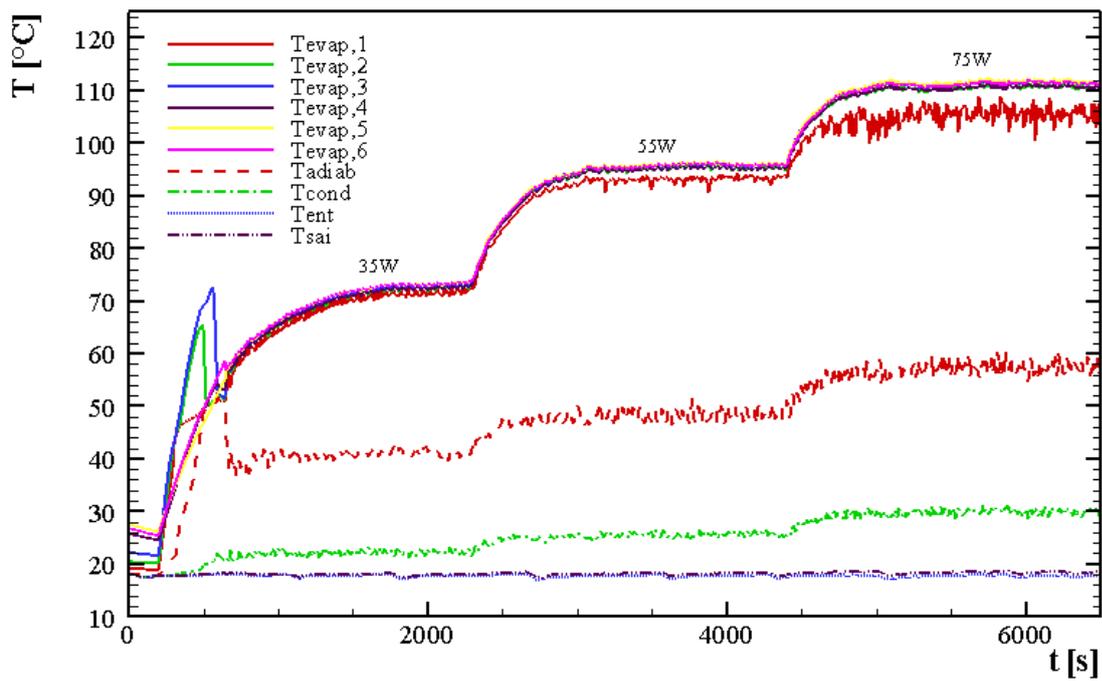


Figura 21: Distribuição de temperaturas para vazão de 0,75 l/min e óxido de grafeno 10% como fluido de trabalho

Fonte: Autoria própria.

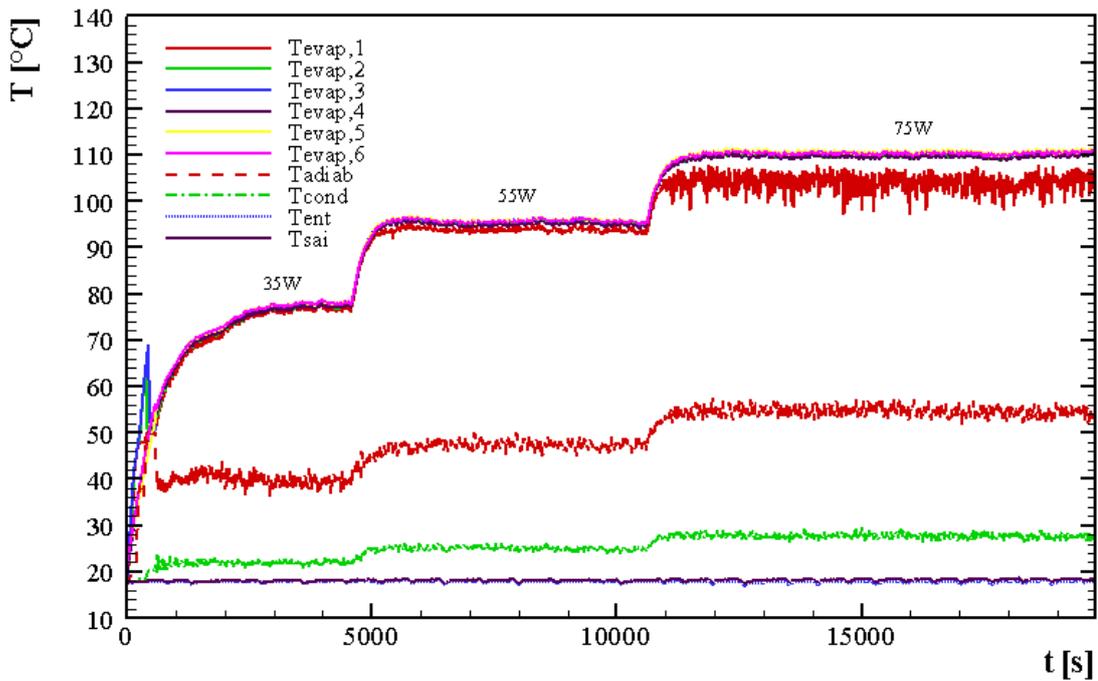


Figura 22: Distribuição de temperaturas para vazão de 1,00 l/min e óxido de grafeno 10% como fluido de trabalho

Fonte: Autoria própria.

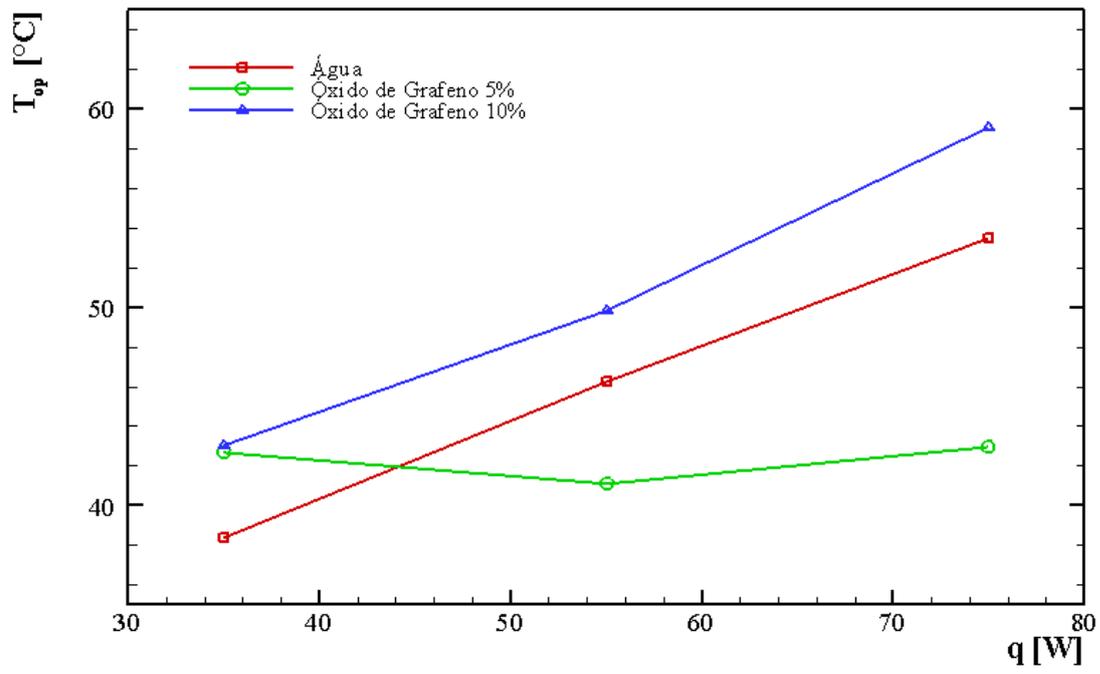
Vazão [L/min]	35W			55W			75W		
	$T_{evap}$	$T_{adiab}$	$T_{cond}$	$T_{evap}$	$T_{adiab}$	$T_{cond}$	$T_{evap}$	$T_{adiab}$	$T_{cond}$
0,50	72,2	43,0	22,9	94,8	49,8	26,0	110,9	59,1	30,7
0,75	71,0	41,9	22,1	93,0	49,2	25,2	110,9	58,2	29,6
1,00	77,1	39,6	22,0	95,3	47,4	25,1	109,2	54,7	27,8

Tabela 4: Temperaturas em °C obtidas em regime permanente para óxido de grafeno 10% como fluido de trabalho

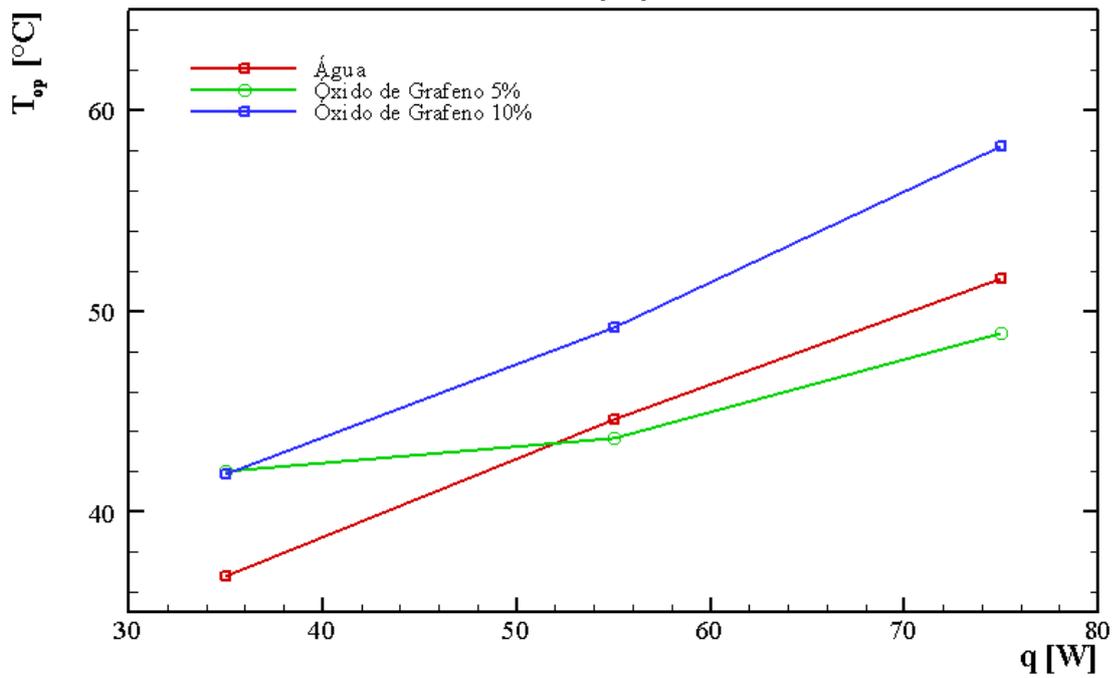
Fonte: Autoria própria.

Analisando as Figuras 20 a 22 e a Tabela 4, pode ser observado que, assim como o termossifão preenchido com água destilada, o óxido de grafeno 10% também segue tendência de apresentar menores valores de temperatura com o aumento da vazão volumétrica de água. Além disso, para esse fluido de trabalho em geral foram obtidos os maiores valores de temperatura para cada seção em função da carga térmica aplicada e da vazão de água.

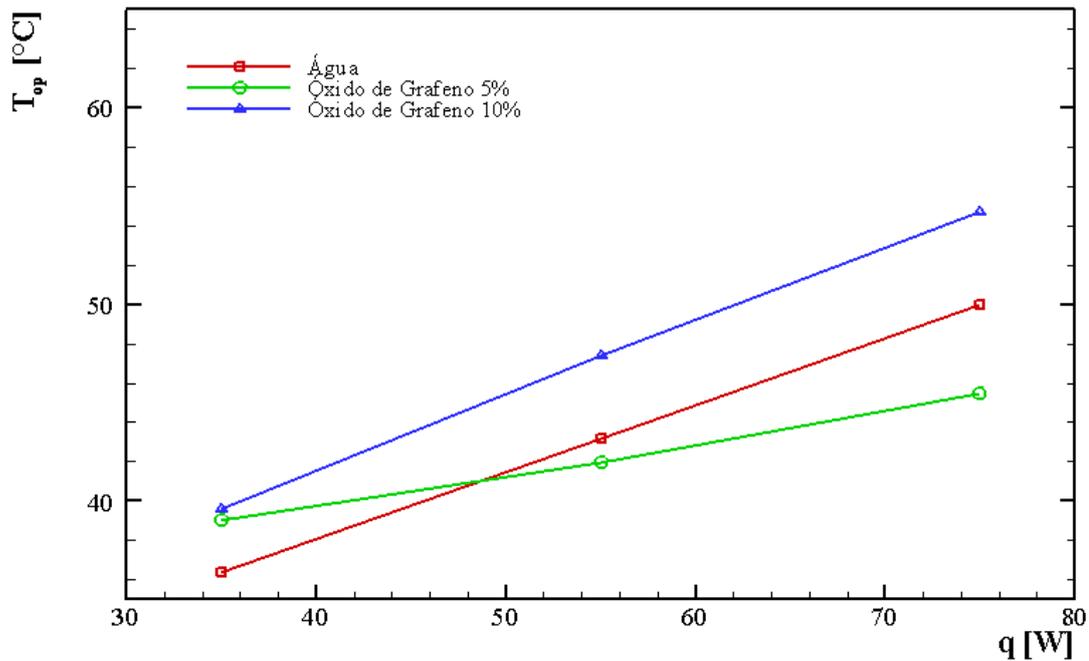
Isso também pode ser verificado pelas Figuras 23 a 25, em que se apresentam as temperaturas de operação (temperatura da região adiabática) de cada termossifão em função da carga térmica dissipada para as vazões de 0,50 l/min, 0,75 l/min e 1,00 l/min, respectivamente.



**Figura 23: Temperaturas de operação para a vazão de 0,50 l/min**  
**Fonte: Autoria própria.**



**Figura 24: Temperaturas de operação para a vazão de 0,75 l/min**  
**Fonte: Autoria própria.**



**Figura 25: Temperaturas de operação para a vazão de 1,00 l/min**  
**Fonte: Autoria própria.**

Em uma primeira análise, a temperatura de operação pode servir como parâmetro para verificar qual fluido de trabalho aparenta ser a melhor opção dentre todos os analisados. Como o intuito de um termossifão é transmitir calor, o termossifão que possui a menor quantidade de energia armazenada, ou seja, apresenta menores valores de temperatura, é também aquele que transmite as maiores taxas de energia na forma de calor. Dessa forma, analisando as Figuras 23 a 25, pode-se observar que, em geral, o termossifão preenchido com óxido de grafeno 5% foi o que apresentou os menores valores de temperatura de operação, sendo então indicado como a possível melhor opção entre todos os fluidos analisados.

Isso pode ser confirmado pela análise da resistência térmica à transferência de calor, que pode ser observada nas Figuras 26 a 28 para as vazões de 0,50 l/min, 0,75 l/min e 1,00 l/min, respectivamente.

Observando estas figuras, pode-se perceber que para todos os valores de vazão volumétrica analisados o termossifão que utiliza óxido de grafeno 5% apresenta os menores valores de resistência térmica, ao passo que os termossifões preenchidos com água destilada e óxido de grafeno 10% apresentam valores de resistência muito semelhantes, ao se levar em conta a propagação de incertezas de medição. Além disso, pode ser verificado que – com o aumento da carga térmica aplicada – há uma tendência na redução dos valores de resistência térmica.

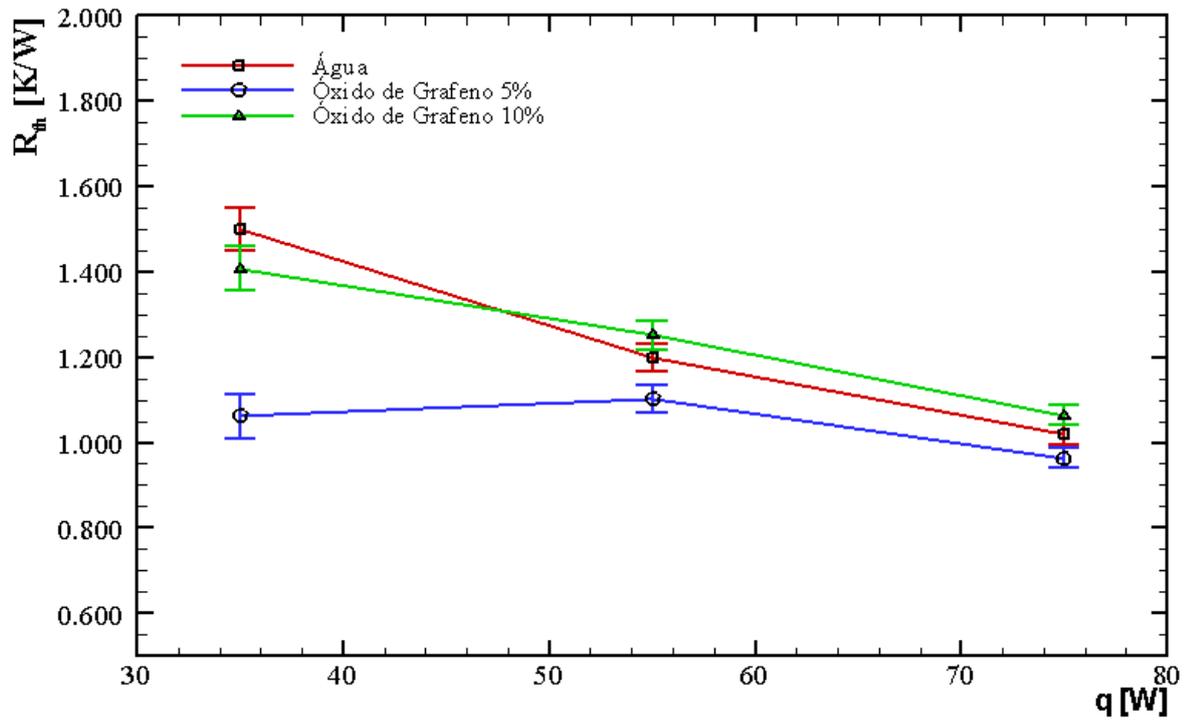


Figura 26: Resistências térmicas para a vazão de 0,50 l/min  
Fonte: Autoria própria.

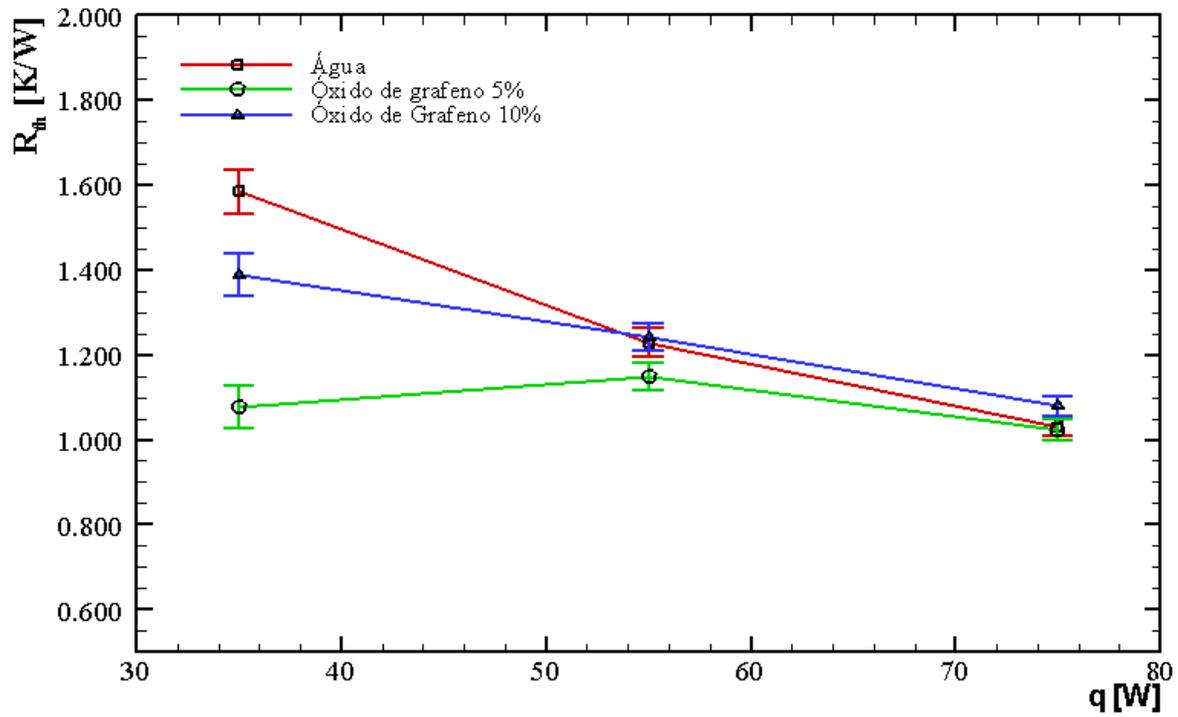
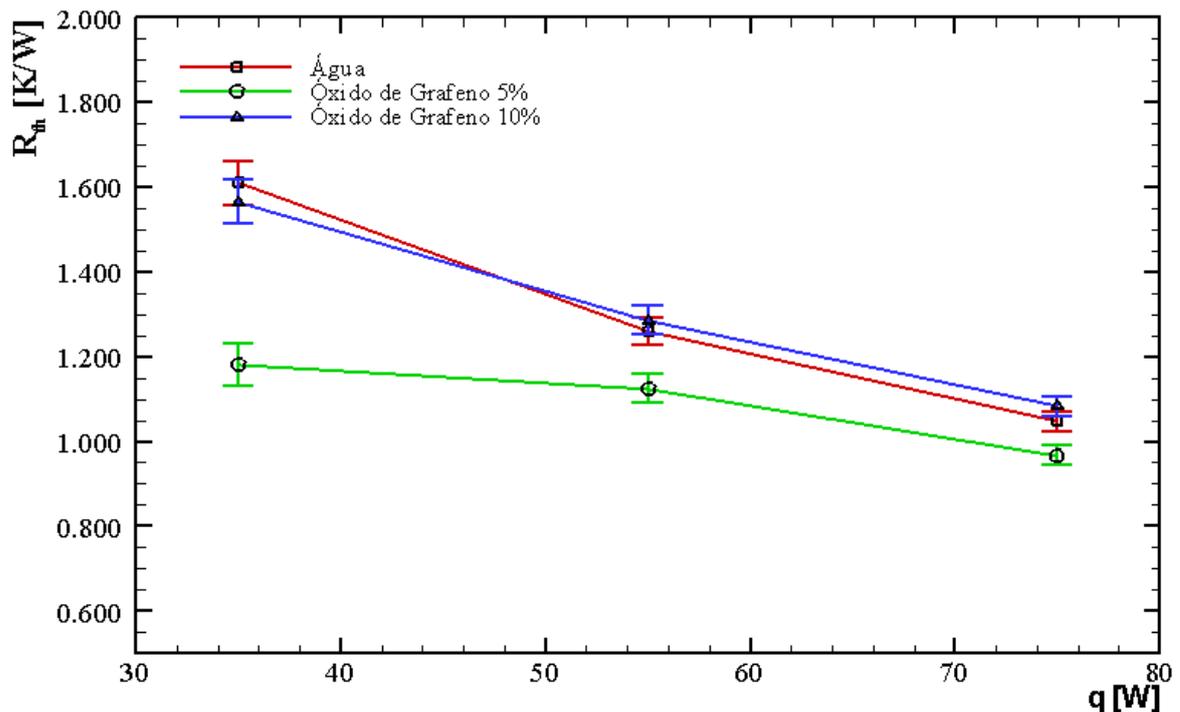


Figura 27: Resistências térmicas para a vazão de 0,75 l/min  
Fonte: Autoria própria.



**Figura 28: Resistências térmicas para a vazão de 1,00 l/min**  
**Fonte: Autoria própria.**

Pode-se notar então que os resultados referentes à resistência térmica do termossifão estão em acordo com os resultados de temperatura de operação, uma vez que o fluido de trabalho que apresentou menor temperatura de operação também apresentou menores valores de resistência térmica. O menor valor de resistência térmica obtido foi de 0,964 K/W para o termossifão preenchido com óxido de grafeno 5% a uma carga térmica de 75 W e vazão volumétrica de 0,50 l/min. Com isso, o fluido de trabalho indicado para a destinação desejada, preenchimento de termossifões para aplicação em coletores solares de tubos a vácuo de alta pressão é o óxido de grafeno 5%.

## CONCLUSÕES

Neste estudo, cada etapa da fabricação dos termossifões (limpeza, montagem, teste de estanqueidade, procedimento de evacuação e preenchimento com o fluido de trabalho) foi descrita em detalhes. O procedimento proposto possui baixo custo e os dispositivos passivos de transferência de calor são de fácil fabricação, sendo construídos com base em termossifões presentes em coletores solares de tubo a vácuo de alta pressão comerciais. Feito isso, uma investigação experimental do desempenho térmico de três termossifões com três fluidos de trabalho distintos (água destilada e nanofluidos de óxido de carbono 5% e 10%) com três vazões volumétricas de água distintas (0,50 l/min, 0,75 l/min e 1,00 l/min) foi realizada. Os dispositivos passivos de transferência de calor foram testados na posição a 25° da horizontal sob cargas térmicas de 35, 55 e 75 W, todos funcionando satisfatoriamente.

A análise térmica foi baseada na distribuição de temperaturas dos termossifões em função do tempo, temperatura de operação em função da carga térmica aplicada e resistência térmica também em função da carga térmica aplicada. Em geral, com o aumento da vazão volumétrica de água sob o condensador foi verificada uma redução na temperatura em todas as regiões dos termossifões. O dispositivo contendo nanofluido de óxido de grafeno 5% apresentou menores valores de temperatura para todas as vazões testadas, apresentando os menores valores de temperatura de operação e também resistência térmica para todas as cargas térmicas aplicadas. Dessa forma, foi identificado que, para as condições testadas, o fluido de trabalho composto por nanofluido de óxido de grafeno 5% se apresentou

como a melhor opção de dispositivo passivo de troca térmica para se aplicar em um coletor solar de tubo a vácuo de alta pressão entre todos os dispositivos analisados.

## AGRADECIMENTOS

Agradecimentos são prestados à CAPES, ao CNPq, à Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação da UTFPR, à Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação (DIRPPG), ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM) e ao Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) da UTFPR – *Câmpus* Ponta Grossa.

## REFERÊNCIAS

- ADAMS, S.; KLOBODU, E. K. M.; APIO, A. Renewable and non-renewable energy, regime type and economic growth. **Renewable Energy**, v. 125, p. 755-767, 2018.
- ANTONINI ALVES, T.; KRAMBECK, L.; SANTOS, P. H. D. Heat Pipe and Thermosyphon for Thermal Management of Thermoelectric Cooling, (Chapter 17). In: ARANGUREN, P. (Org.). **Bringing Thermoelectricity into Reality**. 1. ed. London: InTechOpen, London, 2018. pp. 353-374.
- CHEN, M.; LI, J. Nanofluid-based pulsating heat pipe for thermal management of lithium-ion batteries for electric vehicles. **Journal of Energy Storage**, Elsevier, v. 32, n. May, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101715>>.
- DA SILVA, A. C. M. **Transferência de Calor em Nanofluidos – Potencialidades e Desafios**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Departamento de Química, Universidade de Aveiro, Portugal, 2010.
- DEHAJ, M. S.; MOHIABADI, M. Z. Experimental investigation of heat pipe solar collector using MgO nanofluids. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 191, n. April, pp. 91-99, 2019.
- DUFFIE, J.A., BECKMAN, W.A., BLAIR, N. **Solar Engineering of Thermal Processes, Photovoltaics and Wind**. 2020.
- ERSOZ, M. A. Effects of different working fluid use on the energy and exergy performance for evacuated tube solar collector with thermosyphon heat pipe”. **Renewable Energy**, v. 96, pp. 244-256, 2016.
- FAGHRI, A. Heat Pipes: Review, Opportunities and Challenges. **Frontiers in Heat Pipes**, v. 5, n. 1, 2014.
- FERREIRA, T. P. A.; RAMÍREZ-BEHAINNE, J. J.; LENART, V. et al. **Design and construction of a heat exchanger: use of nanofluids (gold nanoparticles in base fluid)**, 2018.
- HAN, J.; TIAN, R.; YAN, S. Comparative analysis of the instantaneous efficiency about two types of solar collector, **Energy Engineering**, v. 2, p. 25-27, 2009.
- HOLMAN, J. P. **Experimental Methods for Engineers**. 6. ed. Singapore: Mcgrall-Hill, 1994.
- HUMMERS, W. S.; OFFEMAN, R. E. Preparation of Graphitic Oxide. **Journal of the American Chemical Society**, v. 80, n. 6, p. 1339, 1958.
- IEA. **World Energy Outlook 2015**. Paris: International Energy Agency, 2015.
- JAYANTHI, N.; SURESH KUMAR, R.; KARUNAKARAN, G.; VENKATESH, M. Experimental investigation on the thermal performance of heat pipe solar collector (HPSC). **Materials Today: Proceedings**, Elsevier, v. 26, pp. 3569-3575, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.607>>.
- KANNADASAN, N.; RAMANATHAN, K.; SURESH, S. Comparison of heat transfer and pressure drop in horizontal and vertically helically coiled heat exchanger with CuO/water based nanofluids. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 42, pp. 64-70, 2012.
- KHAIRUL, M. A.; SAIDUR, R.; RAHMAN, M. M.; ALIM, M. A.; HOSSAIN, A.; ABDIN, Z. Heat transfer and thermodynamic analyses of a helically coiled heat exchanger using diferente types of nanofluids. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 67, pp. 398-403, 2013.
- KHAJEHPOUR, E.; NOGHREHABADI, A. R.; NASAB, A. E.; NABAVI, S. M. H. Experimental investigation of the effect of nanofluids on the thermal resistance of a thermosiphon L-shape heat pipe at different angles. **International**

**Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 113, n. March, p. 104549, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2020.104549>>.

KLINE, S. J.; McCLINTOCK, F.A. Analysis of uncertainty in single-sample experiments. **Mechanical Engineering**, v. 75, pp. 3-9, 1953.

MANTELLI, M. B. H. Thermosyphon Technology for Industrial Applications. (Chapter 11) In: VASILIEV L. L.; KAKAÇ, S. (Eds.). **Heat pipes and solid sorption transformations: fundamentals and practical applications**. Boca Raton: CRC Press, 2013.

MISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **Resenha energética brasileira**. Exercício 2018 (preliminar); maio de 2019. Brasília: MME, 2019.

MURRAY, R. **Graphene 101 an inventor's, guide to making graphene**. Estados Unidos: Smashwords Edition, 2013.

PEDOTT, A. **Notas de Aula: metrologia e ensaios**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012.

PEREIRA, E. B. et al. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 2. ed. São José dos Campos, 2017.

REAY, D. A.; KEW, P. A.; McGLEN, R. J. **Heat Pipes: Theory, Design and Applications**. 6 ed. Waltham, MA, USA: Elsevier, 2014.

REJI, A. K. ; KUMARESAN, G.; SARATHI, A. et al. Performance analysis of thermosyphon heat pipe using aluminum oxide nanofluid under various angles of inclination. **Materials Today: Proceedings**, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.247>>.

STREMEL, G. K. **Avaliação experimental do desempenho térmico de termossifões com nanofluidos como fluido de trabalho**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, PR, Brasil, 2017.

## SOBRE OS AUTORES

### **PEDRO LEINEKER OCHOSKI MACHADO**

Possui Curso técnico em Agroindústria (2014) e Graduação em Engenharia Mecânica (2019) pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Ponta Grossa. Atualmente é aluno de Pós-Graduação no nível mestrado em Engenharia Mecânica pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Ponta Grossa (2019 -) na área Térmicas e Fluidos. Membro dos grupos de pesquisa GESFA (Grupo de Estudos de Física Aplicada) e Engenharia de Sistemas Térmicos. Desenvolve estudos nas áreas de energia solar e controle térmico. pedmac@alunos.utfpr.edu.br

### **GUILHERME ANOTNIO BARTMEYER**

Possui Graduação em Engenharia Mecânica pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (2018). Mestrando em Engenharia Mecânica pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná na área de Ciências Térmicas. Trabalha há dois anos na indústria, na área de projeto mecânico. Tem experiência na área de Projetos de máquinas para indústria madeireira. gabartmeyer@hotmail.com

### **VICTOR VAUREK DIMBARRE**

Graduando em Engenharia Mecânica pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná, realizou Iniciação Científica na área de projetos de máquinas e prototipagem rápida, com enfoque na área de simulação paramétrica e otimização utilizando elementos finitos. Fez estágio industrial no setor de Engenharia de Produto (2019). Atualmente realiza Iniciação Científica e pesquisa na área térmica. victorvaurek@gmail.com

### **ROGÉRIO DE OLIVEIRA SOUZA**

Atualmente cursa Graduação em Engenharia Mecânica pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná, tendo participado de projetos de extensão voltados a projetos mecânicos, simulações e fabricação.

Participa de pesquisas na área das ciências térmicas aplicadas em coletores solares. rogerio.2016@alunos.utfpr.edu.br

#### **VINÍCIUS MARIANI LENART**

Possui Graduação em Física pela Universidade Estadual do Centro-Oeste (2007), Mestrado e Doutorado em Ciências/Física pela Universidade Estadual de Ponta Grossa com período sanduíche no Instituto de Nanociência de Aragon (INA), Pós-Doutorado na Universidade Estadual de Maringá (2016) e é atual pós-doutorando na Universidade Tecnológica Federal do Paraná (2018-atual). Trabalhou como Professor Colaborador na UTFPR-CM (2015). Tem experiência na área de Física da matéria condensada com ênfase em propriedades fototérmicas, sínteses de nanomateriais, manufatura aditiva e automação de técnicas de medição. vmlenart@gmail.com

#### **ROZANE DE FÁTIMA TURCHIELLO GOMEZ**

Possui Graduação em Física pela Universidade Federal de Santa Maria (1992), Mestrado em Física pela Universidade de São Paulo, USP (1995) e Doutorado em Física pela Universidade de São Paulo, USP (2000). Pós-Doutorado pela Université Pierre et Marie Curie, Paris, França (2000-2001), pela Universidade de São Paulo, USP-Ribeirão Preto, FFCLRP (2001-2003) e Instituto de Química, USP (2004-2006). Atualmente é Professora Associada da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Ponta Grossa (UTFPR), tendo ingressado em 2009. Possui experiência na área de Física, com ênfase em Física da Matéria Condensada, com a linha de pesquisa em Nanofluidos (nanopartículas metálicas em fluido-base) como líquido de arrefecimento. Participou como membro do Comitê de Ética em Pesquisas Envolvendo Seres Humanos (CEP) da UTFPR, de 2014 a 2019. Atua no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM-UTFPR). turchiel@utfpr.edu.br

#### **PAULO HENRIQUE DIAS DOS SANTOS**

Possui Graduação em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal da Paraíba (2004), Mestrado em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal da Paraíba (2005) e Doutorado em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal da Santa Catarina (2010). Tem experiência na área de Engenharia Mecânica, com ênfase na área de Termo-Fluidos, atuando principalmente nos seguintes temas: bombas capilares, tubos de calor, refrigeração por absorção e cogeração. psantos@utfpr.edu.br

#### **THIAGO ANTONINI ALVES**

Graduado em Engenharia Mecânica pela Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira da Universidade Estadual Paulista – FE/IS/UNESP (2004). Mestre em Engenharia Mecânica pela FE/IS/UNESP (2006). Doutor em Engenharia Mecânica pela Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas – FEM/Unicamp (2010). Pós-Doutorado em Engenharia Mecânica no Laboratório de Tubos de Calor da Universidade Federal de Santa Catarina (LabTUCAL/POSMEC/UFSC). Professor Associado na Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus de Ponta Grossa – UTFPR/Ponta Grossa. Docente Permanente do Programa de Pós-Graduação (Mestrado) em Engenharia Mecânica da UTFPR/Ponta Grossa. Atualmente é o Chefe do Departamento Acadêmico de Mecânica. Tem experiência na área de Ciências Térmicas, com ênfase em Transferência de Calor, Termodinâmica e Mecânica dos Fluidos, atuando principalmente nos seguintes temas: tubo de calor, termossifão, convecção, condução, controle térmico de equipamentos eletroeletrônicos, energia solar, geração e cogeração de energia, emissão e dispersão de poluentes atmosféricos, simulações numéricas e investigação experimental. antonini@utfpr.edu.br

# **PROJETO DA FERRAMENTA PARA O PROCESSO DE SOLDAGEM DE FRICÇÃO COM PINO (*FRICCTION STIR WELDING*) PARA SOLDAGEM DE ALUMÍNIO**

ROGER NAVARRO VERÁSTEGUI

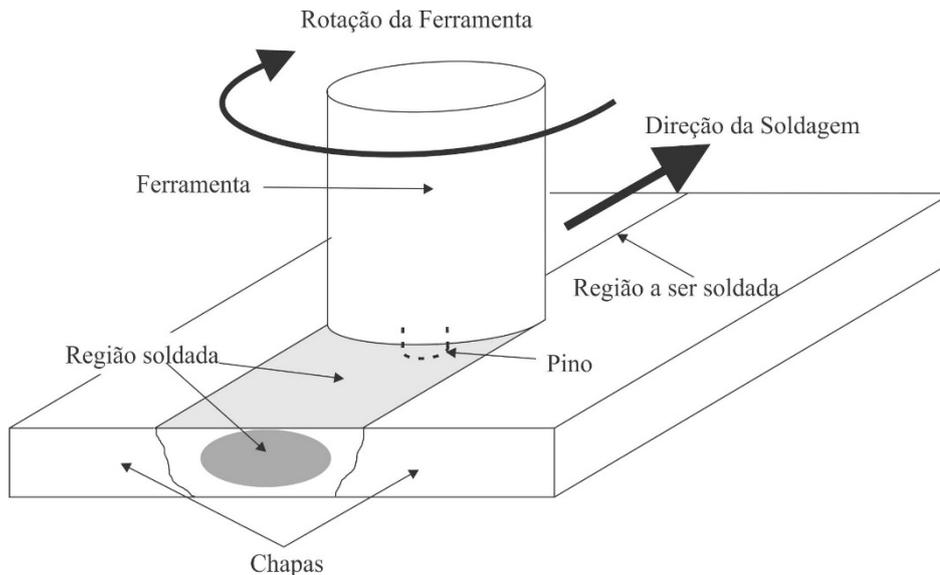
*Professor do Departamento de Mecânica - UTFPR - Ponta Grossa - PR*

## **1 INTRODUÇÃO**

O processo de soldagem por fricção com pino não consumível (pela ABS) ou, em inglês, *Friccion Stir Welding (FSW)*, foi desenvolvido pelo *The Welding Institute (TWI)* em 1991, na Inglaterra. Inicialmente foi desenvolvido para realizar uniões em chapas de alumínio que são de difícil soldabilidade por processos convencionais, por fusão. [1]

A dificuldade de se realizar uniões em certas chapas de alumínio com processos que fundem o material se justifica pelo processo atingir temperaturas elevadas (temperatura de fusão do material) e os processos de endurecimento de certas ligas de alumínio (envelhecimento) serem degradados por estas altas temperaturas, deixando o material inutilizável para usos que necessitam de alta resistência mecânica. [1] O processo de FSW tem uma grande vantagem quando comparado com os processos que fundem o material, pois ele não funde o material, chega a aproximadamente 0,8 da temperatura de fusão. Isso faz com que a degradação do tratamento térmico de certas ligas de alumínio seja minimizada e não deixe o material inutilizável para aplicações que necessitam de alta resistência mecânica. [1-5] Outro importante ponto a ser enfatizado é que, como a união é realizada com menor temperatura, ocorre a diminuição da distorção das chapas. Quando se trata de chapas finas a distorção pode ser uma limitação do processo de soldagem por fusão. O processo de soldagem por fricção (FSW) ameniza as distorções causadas nos processos mais usuais e ainda proporciona boas propriedades mecânicas e metalúrgicas. O processo de FSW é baseado na soldagem por fricção, o que minimiza as distorções, pois a união ocorre em fase sólida, ou seja, não se atinge a temperatura de fusão do material. [1-9]

O processo se caracteriza pelas elevadas taxas de deformação plástica que ocorrem no estado sólido, por meio do emprego de uma ferramenta (não consumível) de alta resistência mecânica (para alumínio normalmente se usa aço ferramenta). Neste processo, a ferramenta penetra nas chapas a serem soldadas, fazendo com que o material de ambas seja colocado em contato (“misturado”). A Figura 1 indica o processo de FSW. [1, 3-9]



**Figura 1: Esquema mostrando o processo FSW**  
**Fonte: Autoria própria.**

Com as peças a serem soldadas firmemente fixas, o pino da ferramenta em rotação é inserido na junta até o contato do ombro da ferramenta com a superfície superior da junta, gerando calor por meio de atrito. O aquecimento eleva a temperatura local até que o material entre no estado plástico e a ferramenta misture os materiais, unindo-os [10].

A força axial da ferramenta, o desenho do pino e as variáveis do processo (como rotação da ferramenta e velocidade de avanço) devem ser cuidadosamente projetados para produção de soldas livres de defeitos [11].

Um dos mais importantes elementos para realização da união pelo processo de FSW é a ferramenta. A ferramenta é projetada levando em conta o material de união, a espessura das chapas, velocidade de soldagem, entre outros. Para um ótimo resultado das propriedades mecânico/metalúrgicas é necessário que a ferramenta esteja projetada, considerando todos os aspectos necessários. A geometria da ferramenta é o fator mais influente para o desenvolvimento de FSW, segundo Khaled, porque ela irá influir no tamanho e no perfil da junta soldada. Neste artigo serão apresentados alguns destes aspectos para que seja possível um projeto adequado de ferramenta para o processo de FSW. [12]

A soldagem FSW é um processo autógeno (não utiliza materiais de adição), razão pela qual o afastamento entre chapas a serem soldadas deve ser o menor possível. recomenda-se, portanto, que a distância máxima entre as peças não seja maior que 10% do valor da espessura da chapa. [13]

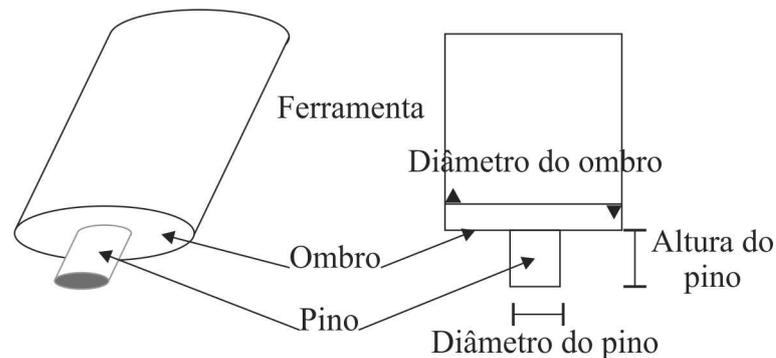
## 2 FERRAMENTA

Um dos principais elementos para a realização de uma soldagem pelo processo FSW é a ferramenta de soldagem (pino não consumível). A ferramenta é responsável pelo aquecimento do material a ser soldado, então deve suportar temperaturas de 0,8 temperatura de fusão dos materiais soldados, sem que ela tenha grandes perdas de propriedades mecânicas durante a soldagem, pois, além de aquecer, a ferramenta também promoverá a mistura entre os materiais que serão unidos. Tudo isso sem que o material da ferramenta interfira no resultado final da união, uma vez que o material afeta de maneira direta o coeficiente de atrito, conseqüentemente, a geração de calor durante o processo. Isto também deve ser levado em conta para tratamentos superficiais, que podem trazer inúmeros benefícios, quando utilizados de forma adequada. [1, 12]

O material da ferramenta, para soldagem de peças de alumínio, pode ser manufaturado em aço de alta resistência mecânica, pois apresenta boas propriedades para espessuras de peça menores que 12 mm. O mais comum é a utilização de aço ferramenta H 13, entretanto, é possível obter bons resultados

com a utilização de aço AISI 4340, que tratado termicamente pelo processo de normalização pode atingir uma dureza de até 363 HB e uma tensão limite de escoamento de 860 MPa. [1, 14, 15]

A ferramenta de FSW pode ser representada de forma simples, como indicado na figura 2, onde um cilindro é escalonado com dois diâmetros diferentes: o de menor diâmetro é chamado como pino cuja principal função é realizar mistura do material. A superfície plana do diâmetro maior, por sua vez, é chamada de ombro da ferramenta e tem função principal de fornecer calor, exercendo pressão sobre a superfície da peça sendo soldada e também conter o material plastificado para que não escape da região da junta, evitando porosidade na solda. [16, 17]



**Figura 2: Ferramenta básica para FSW**  
**Fonte: Autoria própria.**

O processo é baseado no atrito, que será a origem do aquecimento necessário para o processo, porém, é necessário que a ferramenta seja fabricada em um material que deve suportar as “consequências” deste atrito e consequente aquecimento. Então o material da ferramenta deve resistir a forças de compressão e cisalhamento em elevadas temperaturas. Além desta característica, o material deve manter a resistência ao desgaste e estabilidade dimensional durante a soldagem. A ferramenta deve apresentar considerável tenacidade, pois deve evitar falhas devido às tensões locais no momento do mergulho e da permanência da ferramenta na região da junta. Para fabricar a ferramenta, é necessário que o material apresente uma considerável usinabilidade, para que se possa realizar certo nível de detalhes na fabricação por usinagem. É importante também que o material apresente uma certa homogeneidade na microestrutura, para que haja regiões mais resistentes ou menos resistentes, gerando assim pontos de concentração de tensão que diminuirão a vida útil da ferramenta. [1]

## 2.1 DESENHO DA FERRAMENTA

O desenho da ferramenta é fundamental para a qualidade final do produto soldado. Para isso, é fundamental que alguns princípios sejam seguidos a fim de que a ferramenta possa oferecer o correto aporte térmico à junta e também realizar a mistura eficaz dos materiais a serem unidos. [1]

O diâmetro do pino da ferramenta deve ser similar à espessura da chapa a ser soldada, motivo pelo qual não se deve utilizar a mesma ferramenta para realizar soldagem com chapas de diferentes espessuras. O comprimento do pino deve ser inferior à espessura da chapa. Este valor depende do material e das propriedades de soldagem. O ombro deve seguir uma dimensão que equivale a, aproximadamente, três vezes o diâmetro do pino, ou ainda, três vezes a espessura da chapa a ser soldada. [1, 18] O The Welding Institute (TWI) desenvolveu uma relação entre o diâmetro do ombro da ferramenta e o diâmetro do pino entre 2,5 e 3, para ser adotada para a maioria das ligas de alumínio em peças com espessura menor que 6 mm. [1, 16,17] A tabela 1 mostra uma relação entre as dimensões da ferramenta de FSW para um determinado material e sua espessura. [1]

**Tabela 1: Síntese da dimensão da ferramenta de FSW para um determinado material. [mod. de 1]**

Diâmetro do ombro	Diâmetro do pino	Taxa ombro/pino	Material de trabalho e espessura da chapa
mm	mm		
13	5	2,6:1	6061-T6 Al, 3 mm
20-30	8-12	2,5:1. 1,6:1	7050, 2195, 5083, 2024, 7075 Al, 6,35 mm
23	8,2	2,8:1	2024_T351 Al, 6,4 mm
20, 16	6	3,3:1. 2,7:1	5038 e 6061 Al, 5,5 mm
12	4	3:1	1050 Al Livre de oxigênio cobre, 1,8 mm
25,4	7,87	3,22:1	7075-T7351 Al, 9,53 mm
23	8,4	2,7:1	2524-T351 Al, 6,4 mm
20	4	5:1	6064 Al para aço carbono, 4,5 mm
23	8,2	2,8:1	2024-T351, 7 mm
10	3,8	2,6:1	2095 Al, 1,63 mm
25	9	2,8:1	5251 Al, 5 mm

## 2.2 OMBRO DA FERRAMENTA

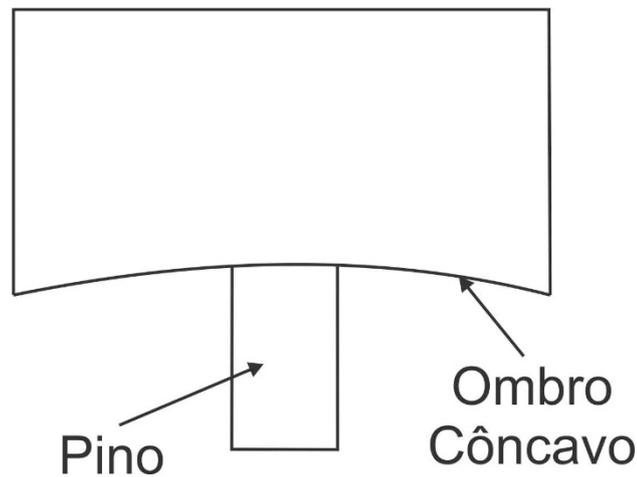
O ombro da ferramenta tem a função de gerar calor para a superfície da peça de trabalho e a junta onde o pino está passando. Ele é responsável pela maior parte da deformação causada à peça de trabalho e também por segurar o calor causado pelo atrito durante o processo. [1] Além disso, o ombro também tem a função de impedir a expulsão do material plastificado da região de soldagem, evitando que ocorram defeitos. [7]

Ombros – ombro côncavo e ombro convexo – podem ser selecionados para a ferramenta de acordo com sua superfície.

### 2.2.1 OMBRO CÔNCAVO

O primeiro ombro projetado foi o ombro côncavo, [20] comumente referido como ombro do tipo padrão, e é atualmente o ombro mais comum no projeto em FSW. [1] Ombros côncavos podem produzir soldas de FSW com boa qualidade mecânica e metalúrgica. Sua fabricação por usinagem é simples, pois não precisam de especificidades no processo.

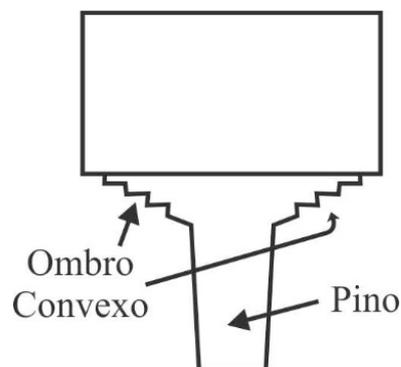
A concavidade do ombro é produzida por um pequeno ângulo entre a borda do ombro e o pino, entre 6 e 10°. Durante o mergulho da ferramenta nas chapas, o material deslocado pelo pino é alimentado na cavidade côncava dentro do ombro da ferramenta. Este material servirá como o início de um reservatório para a soldagem que se inicia. Quando a ferramenta se movimenta para frente (sentido da soldagem), a ferramenta força o novo material para a cavidade do ombro, empurrando o material existente para o caminho do pino. Para isto ocorrer, a operação adequada para este tipo de ombro requer a inclinação da ferramenta 2 a 4° do plano de soldagem. A maioria dos cordões produzidos por ombro côncavo é linear; soldas não lineares só serão possíveis se o projeto da máquina pode manter a inclinação da ferramenta durante o trajeto da soldagem (ou seja, máquina FSW multieixo). [1]



**Figura 3. Ferramenta com ombro côncavo**  
**Fonte: Autoria própria.**

### 2.2.2 OMBRO CONVEXO

Ombros da ferramenta de FSW também podem ter um perfil convexo. [1] As primeiras tentativas do TWI de usar uma ferramenta com um ombro convexo não obtiveram sucesso, pois a forma convexa empurrou o material para longe do pino. O único sucesso relatado com uma ferramenta convexa lisa estava com 5 mm ferramenta de ombro de diâmetro que solda por fricção uma chapa de 0,4 mm. [20] Ferramentas de ombro convexo para material mais espesso eram feitas apenas com a adição de uma rosca à forma convexa. [21-23] Como as roscas nos ombros de perfil plano, as roscas nos ombros convexos movem o material de fora do ombro em direção ao pino. A vantagem da forma convexa é que uma das extremidades da ferramenta não precisa estar em contato com a peça de trabalho para que o ombro possa estar em contato com a peça em qualquer local ao longo da superfície convexa. Assim, uma boa solda é produzida quando qualquer parte da rosca estiver em contato com a peça, movendo o material em direção ao pino. Este desenho de ombro permite uma maior flexibilidade em área de contato entre o ombro e a peça de trabalho (quantidade de envolvimento do ombro pode mudar sem qualquer perda de qualidade de solda), melhorando a tolerância de incompatibilidade articular – em vincos a facilidade de juntar peças de diferentes espessuras – e melhora a capacidade de soldar curvaturas complexas. A figura 4 apresenta a representação de um ombro com perfil convexo. [24, 25]



**Figura 4: Perfil de uma ferramenta com ombro convexo**  
**Fonte: Autoria própria.**

### 2.2.3 CARACTERÍSTICAS DO OMBRO

Os ombros da ferramenta FSW também podem conter características para aumentar a quantidade de deformação do material produzido pelo ombro, resultando em aumento da mistura da peça nas soldas por fricção. [24, 25] Essas características podem consistir em roscas (espiral), cumes ou saliências, concha e anéis concêntricos mostrados na figura 5 e podem ser usinados em qualquer perfil de ombro de ferramenta (côncavo, plano e convexo). [26, mod de 24]

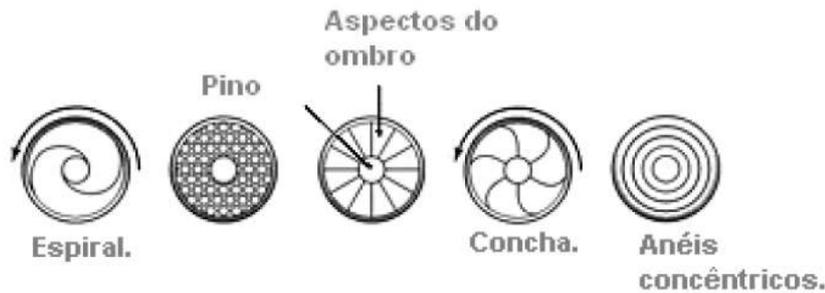


Figura 5: Exemplos de características de ombros. [26, mod de 24]

### 2.2.4 OMBROS ROSCADOS (OU COM FUSOS)

As roscas são as características mais comuns nos ombros. A típica ferramenta de ombro roscada consiste em uma superfície plana com um canal em espiral cortado da borda do ombro em direção ao centro. Os canais levam o material deformado da borda do ombro para o pino, eliminando assim a necessidade de inclinar a ferramenta. Removendo a necessidade da inclinação da ferramenta, simplificam o projeto da máquina FSW e permitem a produção de cordões não lineares com certa complexidade. Ferramentas de ombro côncavo tendem a se levantar da superfície da peça de trabalho quando a velocidade de soldagem aumenta. Substituindo o ombro côncavo por um ombro roscado, reduzirá o levantamento da ferramenta e possibilitará um aumento da velocidade de soldagem.

Outra vantagem da ferramenta de ombro roscado é a eliminação do entalhe produzido pela ferramenta côncava e uma redução correspondente nas rebarbas. Além disso, como a ferramenta é normal, a peça de trabalho, as forças normais são mais baixas quando comparadas com as forças das ferramentas com ombros côncavos, que devem aplicar carga nas direções normal e transversal para manter o ombro em contato suficiente. Além disso, o material dentro dos canais é continuamente cisalhado da superfície da chapa, aumentando assim a deformação e o aquecimento devido à fricção na superfície. [25]

Ferramentas com ombros roscados são operadas com uma penetração de 0,1 a 0,25 mm da ferramenta na chapa soldada; qualquer contato maior que este intervalo na chapa produzirá muita rebarba. Se a ferramenta for muito alta (contato insuficiente), o ombro montará em uma “almofada” de material que prejudicará a linha de junção e fará uma solda de baixa qualidade. Assim, o uso do ombro roscado requer mais cuidado no posicionamento do que o ombro côncavo. As limitações de ferramentas de ombro roscado incluem a incapacidade de soldar duas placas com espessuras diferentes. Ferramentas de ombro enroladas podem soldar duas placas de espessuras diferentes, mas uma certa quantidade de material da placa mais espessa será expulsa na forma de rebarba. [1, 25]

## 2.3 PINO DA FERRAMENTA

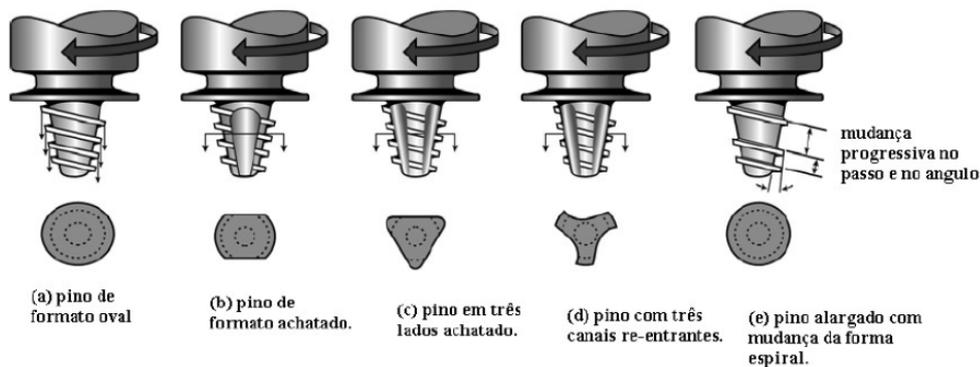
Os pinos das ferramentas FSW produzem a deformação da superfície, ou seja, passam diretamente pelo caminho onde ocorre a recristalização e, conseqüentemente, a junta da solda; em outras palavras, são responsáveis pelo transporte do material misturado, do começo ao fim da junta. Alguns parâmetros

de soldagem dependem diretamente da geometria do pino, por exemplo, a penetração da ferramenta e a velocidade de avanço da solda. [1, 7]

O principal modelo de pino de ferramenta é o cilíndrico, também utilizado nos experimentos do presente trabalho. Este tipo de pino reduz o desgaste quando penetra no material a ser soldado, possui uma concentração de tensão menor quando comparado aos outros modelos, além de que sua geometria é bastante simples de ser usinada quando se necessita de alguma mudança nas medidas da ferramenta.

Os pinos podem ser lisos ou roscados. Roscas são usadas para transportar o material do ombro do pino para o fundo. Por exemplo, uma ferramenta atuando no sentido horário requer uma rosca esquerda para realizar essa tarefa. [1]

O pino da ferramenta é o principal responsável pela mistura do material, o que somente é possível devido à alta temperatura (que é alcançada com auxílio do ombro da ferramenta), porém a mistura também gera calor pela fricção do pino com o material soldado. A geometria do pino também terá grande influência no processo – algumas geometrias são mostradas na figura 6. [26, mod de 27]



**Figura 6: Geometrias de diferentes pinos para soldagem FSW. [26, mod de 27]**

### 2.3.1 ADIÇÃO DE PLANOS USINADOS EM PINOS

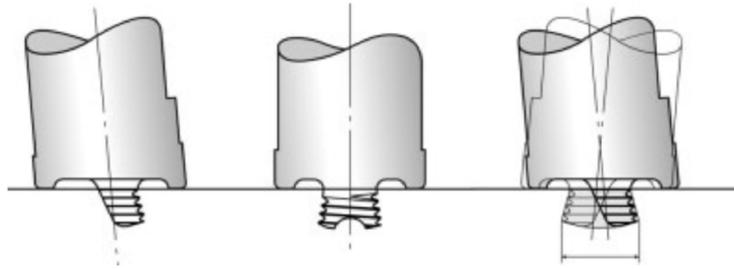
A adição de filetes em um pino muda o movimento do material em torno dele. O efeito de adicionar regiões planas é aumentar localmente a deformação do material plastificado por ação de “pás” (filetes), produzindo assim turbulência local no fluxo do material plastificado. A liga de alumínio 5083-H131 de 25,4 mm de espessura demonstrou que uma redução nas forças transversais e torque da ferramenta foi diretamente proporcional ao número de filetes em um pino truncado (até quatro filetes). Outra análise com o processo FSW com as ligas de alumínio 2024-T351 e 6056-T4 de 4 mm de espessura em função dos parâmetros da ferramenta FSW para três desenhos de pinos diferentes foi realizada e mostrou que o efeito dos filetes indicou um aumento na área da solda e na temperatura da peça durante a soldagem. [28, 29]

O pino em espiral desenvolvido pela TWI reduz o volume deslocado de um pino cilíndrico do mesmo diâmetro em 60%. Reduzindo o volume deslocado também diminuem as cargas transversais, o que permite velocidades de soldagem maiores. A principal diferença entre o pino do cone rosqueado e o pino em espiral é o desenho da crista helicoidal na superfície do pino. No caso do pino em espiral, o cume helicoidal é mais do que um fio externo, mas a crista helicoidal atua como uma verruma, produzindo um movimento descendente. [27, 30]

A vantagem significativa do pino em espiral é a proporção do volume movido pelo pino para o volume do pino. Pinos cilíndricos têm uma proporção de 1,1 para 1, enquanto o pino em espiral tem uma proporção de 1,8 para 1 (ao soldar chapa grossa de 25 mm). [1]

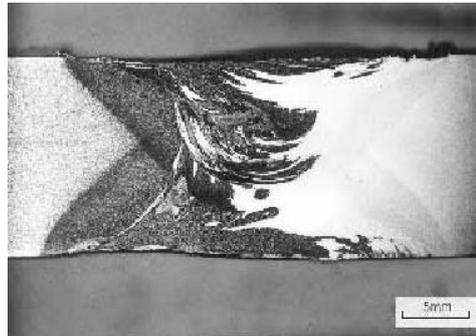
O pino também pode ter uma geometria mais complexa para favorecer a mistura do material da solda, inclusive o modelo cilíndrico é considerado pouco eficiente comparado aos cônicos. O pino

ainda pode possuir rosca, cavidades, ou ainda pode não ser concêntrico com a rotação da ferramenta, para melhorar a mistura. A figura 7 mostra exemplos dessas variações na geometria do pino. [31, 32]



**Figura 7: Ferramentas de FSW com pinos não concêntricos. [32]**

O pino tem função de misturar os materiais a serem unidos. Essa mistura ocorre movendo o material a frente do caminho da ferramenta (cisalhando o material) para a parte de trás da ferramenta, misturando o material. A figura 8 mostra a mistura de materiais diferentes. A velocidade da soldagem também será determinada pelo desenho do pino, a fim de aumentar a eficiência do processo e minimizar os defeitos devido ao processo. [10,18]



**Figura 8: União de materiais dissimilares, evidenciando a mistura dos materiais na junta. [10]**

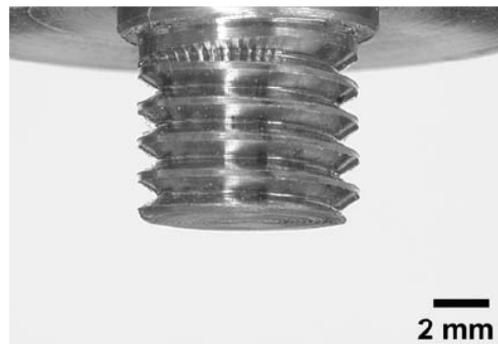
Para o dimensionamento do comprimento do pino, deve-se dimensionar um comprimento de 0,3 a 0,5 mm menor que a espessura da peça. Essa diferença de tamanho é para evitar que, por alguma variação de espessura na peça, a ferramenta entre em contato com a superfície da base de fixação das peças e possa quebrar sem grandes defeitos de falta de penetração do pino. [16, 17]

Um fundo redondo pode ser usado na ferramenta para diminuir o desgaste da ferramenta no início da operação, melhorando a qualidade da solda abaixo da parte inferior do pino. O melhor raio a ser utilizado no fundo do pino é especificado como sendo 75% do diâmetro do pino. O pino cilíndrico de fundo arredondado garante uma boa versatilidade, podendo ser alterado tanto no comprimento como no diâmetro da ferramenta. A inclusão do domo no fundo do pino garante uma boa durabilidade da ferramenta e uma boa qualidade na raiz da solda – como demonstrado na Figura 9. [1]



**Figura 9: Pino cilíndrico de fundo redondo com rosca esquerda. [1]**

Porém, o fundo de um pino pode ser plano. Estudos mostram que a maioria dos pinos utilizados no uso da técnica de FSW é de fundo plano. A alteração de um pino cilíndrico de fundo arredondado para um pino cilíndrico de fundo plano (Figura 10) ocorre por questões geométricas. A velocidade de um cilindro em contato com uma superfície aumenta de zero no centro para a velocidade máxima nas bordas. A velocidade da superfície local, juntamente com o coeficiente de atrito entre o pino e o metal base, dilata a deformação durante a fricção. É altamente recomendável que seja aplicado um ângulo de  $3^\circ$  em relação ao ombro da ferramenta no fundo do pino, para garantir que a velocidade de deslocamento de material no centro da ferramenta não seja nula, evitando qualquer tipo de dano à ferramenta e garantindo uma melhor qualidade da solda. Um raio de fundo redondo reduz o diferencial de velocidades verificado no fundo da ferramenta, enquanto um raio maior aumenta o diferencial de velocidade. O pino cilíndrico de fundo plano é mais fácil de manusear e os defeitos relacionados na sessão anterior podem ser eliminados com os parâmetros de ferramenta corretos e uma força de soldagem adequada. [1]



**Figura 10: Pino cilíndrico de fundo plano com rosca esquerda. [1]**

Pinos cilíndricos (Figura 11) são suficientes para soldar chapas de alumínio de até 12 mm de espessura. Algumas pesquisas apontam que soldar chapas mais grossas com velocidades mais altas fazendo uso de pinos cilíndricos não garante uma boa solda. Uma modificação bastante simples é a utilização de pinos cônicos, pois pinos cônicos garantem cargas transversais inferiores e a maior carga de momento de um cone cilíndrico está na base do cone, onde deve ser mais forte. A utilização de rosca para melhorar o fluxo de material removido do fundo para o ombro também é considerável. [1]



**Figura 11: Pino cônico com rosca esquerda. [1]**

## REFERÊNCIAS

- [1] MISHRA, Rajiv S.; MAHONEY, M. W. Friction Stir Welding and Processing. **ASM International**, 2007. DOI:10.1361/fswp2007p001
- [2] KOU, S. Welding Metallurgy and Weldability of High Strength Aluminum Alloys. **Aluminum Alloys Committee of Welding Researching Council**, 1989.
- [3] ASM. **Metals Handbook: Welding, Brazing and Soldering**. 10. ed. Ohio: American Society for Metals, 1990.
- [4] AWS. **Welding Handbook: Welding Processes**. v. 2. Miami: American Welding Society, 2004.
- [5] THE WELDING INSTITUTE. Disponível em: <[http://www.twi.co.uk/j32k/unprotected/band\\_1/fswintro.html](http://www.twi.co.uk/j32k/unprotected/band_1/fswintro.html)>. Acesso em: 29 jan. 2008.
- [6] ROSADO, Jr. Abel. **Estrutura Integral por Soldagem por Atrito “Friction Stir Welding – FSW”**. 2003. Tese (Doutorado) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2003.
- [7] THOMAS, W. M.; THREADGILL, P. L.; NICHOLAS, E. D. **The Feasibility of Friction Stir Welding Steel**, 1999. Disponível em: <[www.twi.co.uk](http://www.twi.co.uk)>.
- [8] ARBEGAST, W. J.; ALLEN, C.; LANGERMAN, M.; MARQUIS, F.; HENDERSON, E.; SVEDIN, C.; MOORE, C.; TRUJILLO, A.; PODRAZA, D.; FREEMAN, J.; KOCH, N. An Investigation of Friction Spot Welding of Thin Aluminium Sheets. In: 15<sup>th</sup> ADVANCED AEROSPACE MATERIALS AND PROCESSES CONFERENCE AND EXPOSITION, Seattle USA, **Annals...** Jun 7-10 2003.
- [9] ASKARI, A.; SILING, S.; LONDON, B.; MAHONEY, M. **Modeling and Analysis of Friction Stir Welding Processes**. Pittsburgh: The Minerals, Metals and Materials Society, 2001.
- [10] AWANG, M.; MUCINO, V. H.; FENG, Z.; DAVID, S. A. Thermo-Mechanical Modeling of Friction Stir Spot Welding (FSSW) Process: Use of an Explicit Adaptive Meshing Scheme. In: SAE WORLD CONGRESS & EXHIBITION, Detroit, MI, USA, **Annals...** 2005.
- [11] KASPARY, T. B. **Prenchimento do furo remanescente em soldas por fricção com mistura mecânica de reparo em alumínio 6056-T4**. 2005. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.
- [12] KHALED, T. An Outsider Looks at Friction Stir Welding. Artigo Lakewood, Federal Aviation Administration, 2005.
- [13] THEADGILL, P. L.; NUNN, M. E. **A Review of Friction Stir Welding: Part 1**. England: Process Review; TWI, 2003.
- [14] FREITAS, P. V. H. Adaptação do processo de soldagem friction stir welding para uma fresadora convencional. 2017. 42 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2017. Disponível em: <<http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/12096>>.
- [15] GERDAU S. A. **Manual de Aços**. SLM, 2003.
- [16] HILLER, D. D. J. **Estudo de parâmetros e percursos no processo de soldagem de mistura por atrito (FSW) da liga de alumínio 5052**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.
- [17] HILLER, D. D. J.; FERREIRA, M. L. R. Adaptação de uma máquina fresadora vertical para soldagem FSW – “friction stir welding” de ligas de alumínio. In: III CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO. **Anais...** Joinville, 2005. Disponível em: <[http://www.abcm.org.br/pt/wp-content/anais/cobef/2005/COF\\_021049442.pdf](http://www.abcm.org.br/pt/wp-content/anais/cobef/2005/COF_021049442.pdf)>.
- [18] CAPELARI T. V.; MAZZAFERRO J. A. E. Avaliação Da Geometria De Ferramenta E Parâmetros Do Processo FSW Na Soldagem Da Liga De Alumínio AA5052. **Soldagem & Inspeção**, São Paulo, v. 14, n. 3, 2009. Disponível em: <[https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0104-92242009000300005](https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-92242009000300005)>.
- [19] THOMAS, W. M. et al. Friction Stir Butt Welding. **International Patent Application PCT/GB92/02203 and G.B. Patent Application 9125978.8**, Dec. 1991.
- [20] HISHIHARA, T.; NAGASAKA, Y. **Development of Micro-FSW**. Proceedings of the Fifth International Conference on Friction Stir Welding, Sept 14-16, Metz, TWI, 2004.
- [21] COLLIGAN, K. **Tapered Friction Stir Welding Tool**. U.S Patent 6,669,075, Dec. 30, 2003.

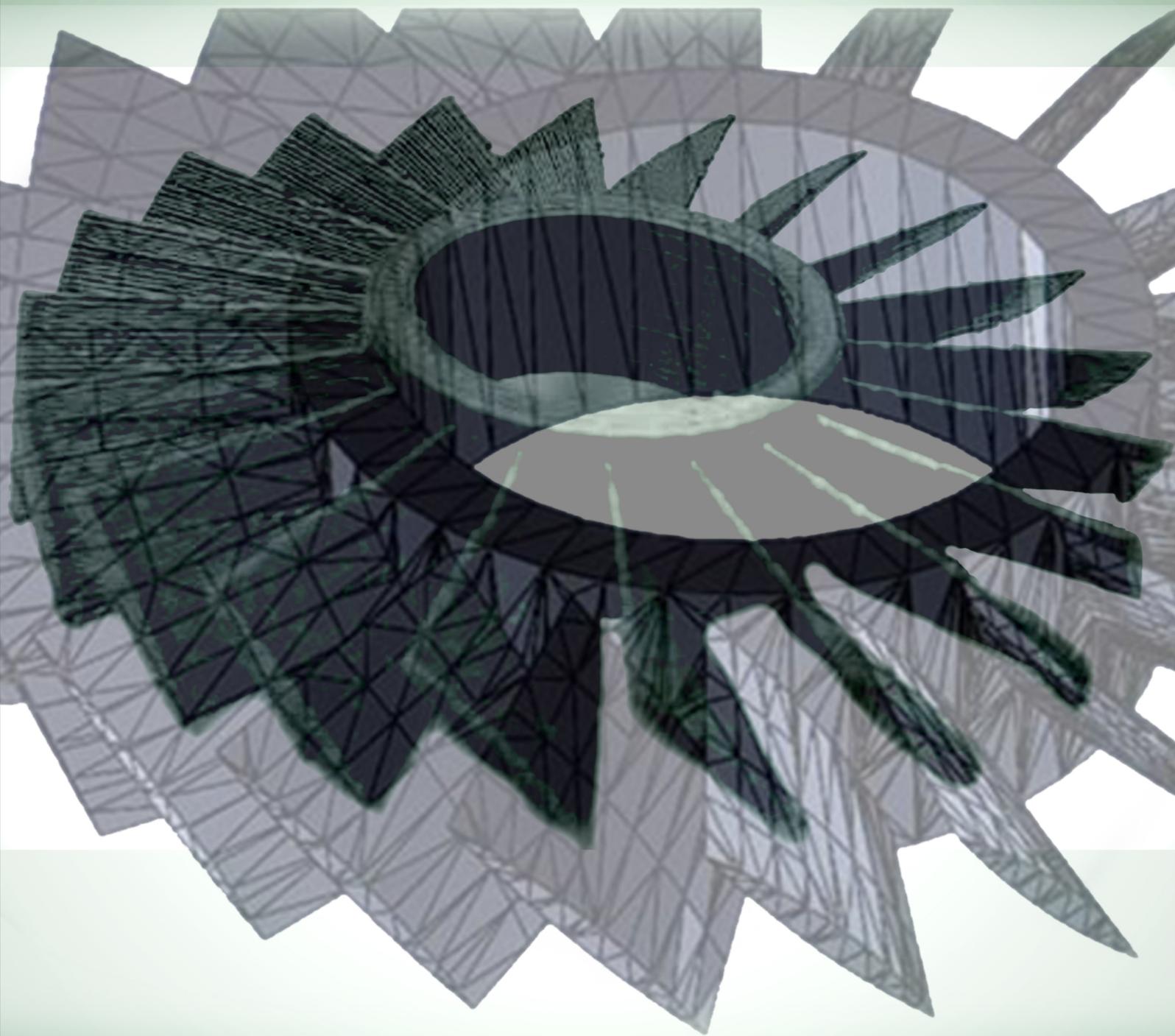
- [22] COLLIGAN, K. J.; PICKENS, J. R. Friction Stir Welding of Aluminum Using a Tapered Shoulder Tool. In: JATA, K. V.; MAHOEY, M. W.; MISHRA, R.S.; LEINERT, T. J. (Eds.). **Friction Stir Welding and Processing III**. TMS, 2005. pp. 161-170.
- [23] PACKER, S.; STEEL, R. **Megastir Technologies**, 2006. [unpublished research]
- [24] THOMAS, W. M. et al. **Friction Stir Welding**. U.K.: Patent Application 2,306, 366, Oct 17, 1996.
- [25] DAWES, C. J.; THOMAS, W. M. **Development of Improved Tool Designs for Friction Stir Welding of Aluminum**. Proceedings of the First International Conference on Friction Stir Welding, Thousand Oaks, CA, TWI, June 14-16, 1999.
- [26] PAIVA, F. G. A. **Caracterização de junta soldada por atrito linear com mistura (FSW) da liga Al-Mg-Si AA 6063**. 2009. Dissertação (Mestrado) – Escola Técnica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- [27] THOMAS, W. M.; STAINES, D. G.; NORRIS, I. M.; FRIAS, R. de. **Friction Stir Welding – Tools and Developments**. FSW Seminar, Porto, Portugal, Instituto de Soldadura e Qualidade, Dec 3, 2002.
- [28] COLLIGAN, K. J.; XU, J.; PICKENS, J. R. Welding Tool and Process Parameter Effects in Friction Stir Welding of Aluminum Alloys. In: JATA, K. V.; MAHOEY, M. W.; MISHRA, R.S.; LEINERT, T. J. (Eds.). **Friction Stir Welding and Processing III**. TMS, 2005. pp. 181-190.
- [29] ZETTLER, R.; LOMOLINO, S.; SANTOS, J. F. dos; DONATH, T.; BECKMANN, F.; LIPMAN, T.; LOHWASSER, D. **A Study of Material Flow in FSW of AA2024-T351 and AA 6056 – T4 Alloys**. Proceedings of the Fifth International Conference on Friction Stir Welding, Sept 14-16, Metz, TWI, 2004.
- [30] THOMAS, W. M.; NICHOLAS, E. D.; SMITH, S. D. Friction Stir Welding-Tool Developments Aluminum. In: DAS, S. K.; KAUFMAN, J. G.; LIENERT, T. J. (Eds.). **Proceedings of the TMS 2001 Aluminum Automotive and Joining Sessions**. TMS, 2001.
- [31] ALMEIDA, D. T. de. **Análise microestrutural e avaliação mecânica de juntas soldadas por fricção e mistura mecânica (FSW) da liga de alumínio 5281-O**. 2015. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015.
- [32] THOMAS, W. M.; JOHNSON, K. I.; WIESNER, C. S. Friction stir welding: recente developments in tool and process technologies. **Advanced Engineering Materials**, v. 5, n. 7, pp. 485, 489, 2003.

## SOBRE O AUTOR

**ROGER NAVARRO VERÁSTEGUI** é Professor do Departamento de Mecânica/UTFPR – Ponta Grossa – PR – Brasil. Possui Doutorado pelo PROMEC-UFRGS (Engenharia Mecânica) em processos de fabricação, sendo realizado em parceria com o Centro de Pesquisa Helmholtz Geesthacht (Antigo GKSS) – Alemanha. É mestre em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul e possui Graduação em Engenharia Metalúrgica pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Atua principalmente nos seguintes temas: Soldagem por fricção, soldagem, endurecimento superficial, fontes instantâneas de calor, alterações microestruturais e análise de falhas. [rogerverastegui@utfpr.edu.br](mailto:rogerverastegui@utfpr.edu.br)

# A Engenharia Mecânica na UTFPR

## Volume 2 - 2020



Este e-book possui  
licença de distribuição

 **creative  
commons**



9 786586 625141

ISBN: 978-65-86625-14-1