

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA NAVAL

KAMILA BORBA SILVA

ESTUDO DA FÍSICA DO ARCO TIG E SUAS IMPLICAÇÕES NA MORFOLOGIA DO
CORDÃO DE SOLDA COM A PRESENÇA DE CAMPOS MAGNÉTICOS EXTERNOS
LONGITUDINAIS

Joinville

2019

KAMILA BORBA SILVA

ESTUDO DA FÍSICA DO ARCO TIG E SUAS IMPLICAÇÕES NA MORFOLOGIA DO
CORDÃO DE SOLDA COM A PRESENÇA DE CAMPOS MAGNÉTICOS EXTERNOS
LONGITUDINAIS

Trabalho apresentado como requisito para
obtenção do título de bacharel no Curso de
Graduação em Engenharia Naval do Centro
Tecnológico de Joinville da Universidade
Federal de Santa Catarina.

Orientador: Prof. Dr. Tiago Vieira da Cunha

Joinville

2019

KAMILA BORBA SILVA

ESTUDO DA FÍSICA DO ARCO TIG E SUAS IMPLICAÇÕES NA MORFOLOGIA DO
CORDÃO DE SOLDA COM A PRESENÇA DE CAMPOS MAGNÉTICOS EXTERNOS
LONGITUDINAIS

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado aprovado como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Naval, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville (SC), 21 de novembro de 2019.

BANCA EXAMINADORA:

Dr. Tiago Vieira da Cunha
Presidente/Orientador

Dra. Danielle Bond - UDESC
Membra

Dr. Leonidas Cayo Mamani Gilapa – IFSC
Membro

Joinville
2019

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, pela minha vida e de meus entes queridos, além de me propiciar sabedoria para enfrentar os desafios dessa trajetória.

Aos meus pais, Cláudia e Robson, por todo suporte familiar e financeiro, pois se hoje estou conseguindo realizar um dos meus sonhos devo isso a eles. Obrigada por todo amor, incentivo e apoio nesses vinte e três anos de vida, além da paciência nos tantos momentos difíceis durante essa jornada.

Ao meu irmão Robert por todo o carinho e lealdade. Agradeço por todos esses anos de cuidado, por tantos conselhos e por representar um papel tão importante em minha vida. A minha cunhada Tailine, por ser como uma irmã, além de todos esses anos de carinho e cuidado. A minha sobrinha Alice, que está por vir e já é muito amada.

Ao meu namorado, Mateus Zanzi, por todo amor, suporte e incentivo. Obrigada pela compreensão nos momentos em que estive ausente, por dividir e compartilhar os momentos bons e difíceis dessa etapa de minha vida, além da calma e felicidade que tenho na sua presença.

À minha família do Rio de Janeiro, minha tia Célia, tio Beto, Tio Célio e Roberta que amo demais, vocês me ajudaram a ser quem sou hoje.

Ao meu orientador, Tiago Vieira da Cunha, por sua dedicação, paciência e confiança, me acolhendo e ajudando a superar as dificuldades encontradas na realização deste trabalho bem como durante minhas atividades como membro do Laboratório de Tecnologia da Soldagem durante esses dois anos de convívio.

A todos os meus amigos do LTS, em especial a Anna Voigt, que estiveram sempre dispostos a me ensinar, aconselhar e auxiliar na execução do meu trabalho.

A todos os meus amigos que tive o prazer de partilhar tantos momentos nesses doze anos morando em Joinville. Muito obrigada, especialmente, a Isabela, Larissa, Paula e Mariana, por todas as conversas, risadas e companhia, a amizade de vocês sempre será muito importante para mim. Aos meus amigos da “família the fantastic” só tenho motivos para me alegrar por tê-los comigo!

Agradeço a todos os professores da UFSC Joinville, de modo especial aqueles que diretamente me incentivaram e participaram diretamente da minha formação. Ao professor Kleber Vieira de Paiva e a equipe T2F, por possibilitar a realização dos meus ensaios de soldagem. E ao Técnico Rodrigo Voigt por sempre se prontificar quando eu precisava de ajuda.

Aos meus amigos que conheci na universidade durante todos esses anos e que

participaram desta jornada feliz e complicada. Em especial aos meus “presentes da Naval”, obrigada pelas conversas, apoio, risadas, companhia e por todos os momentos vivenciados.

RESUMO

Processos de soldagem a arco são amplamente utilizados no mercado industrial. Por ser um condutor elétrico no estado plasma, o arco voltaico, produz um campo magnético em seu entorno e, portanto, apto a interferências externas de campos magnéticos. Relativo a isto, a qualidade e propriedades mecânicas do cordão de solda estão relacionadas com a estabilidade do arco voltaico que é vulnerável a estas interferências. Por ser um processo autógeno, o processo TIG, admite a análise da física do arco na presença de um campo magnético externo longitudinal independente dos fenômenos de transferência metálica. Os efeitos da aplicação do campo magnético longitudinal são recentes e escassos, sendo abordados, em sua maioria, de forma teórica na literatura. A literatura aponta alterações provocadas nas características do arco voltaico, da poça de fusão e do cordão de solda com a aplicação de um campo magnético externo longitudinal. Em vista disso, neste trabalho foi realizada uma investigação quanto ao emprego da técnica de aplicação de um campo magnético externo longitudinal no processo TIG na física do arco voltaico e na sua aplicabilidade durante a soldagem, através de uma abordagem experimental. Para tanto, foram realizados ensaios empregando 50A e 100A de corrente de soldagem, além da variação da corrente adotada na bobina até o seu limite operacional de 11A. A partir da aquisição da tensão, imagens da geometria e pressão do arco voltaico, foram verificadas modificações nas características físicas do arco voltaico em decorrência da presença do campo magnético externo. Por fim foram realizados ensaios de soldagem com intuito de verificar os efeitos destas alterações nos aspectos morfológicos do cordão. Com os resultados verificou-se que a presença do campo magnético externo longitudinal no processo TIG, promoveu a contração do arco voltaico próximo ao eletrodo de tungstênio, além do perfil de distribuição radial da pressão do arco voltaico tornar-se um duplo pico. Além disso, a partir de macrografias, foi possível constatar a redução da penetração e aumento da largura do cordão solda com a intensidade do campo magnético adotado durante os ensaios de soldagem.

Palavras-chave: GTAW. Campo magnético longitudinal. Física do arco. Morfologia dos cordões.

ABSTRACT

Arc welding processes are widely used in the industrial market currently. By being an electrical conductor in the plasma state, the voltaic arc generates a magnetic field around it and is therefore capable of external magnetic field interferences. The quality and mechanical properties of the weld bead are related to the stability of the arc, which is vulnerable to such interferences. As an autogenous process, the TIG process allows the analysis of arc physics in the presence of a longitudinal external magnetic field independent of metal transfer phenomena. The effects of the application of the longitudinal magnetic field are recent and few, being mostly addressed theoretically in the literature. The literature points to changes in the characteristics of the arc, the weld pool and weld bead with the application of a longitudinal external magnetic field. Therefore, in this work an investigation was carried out as to the use of the application of a longitudinal external magnetic field in the TIG process in the arc physics and its applicability during welding through an experimental approach. For this, tests were performed using 50A and 100A of welding current, besides the variation of the current adopted in the coil to its operational limit of 11A. From the acquisition of voltage, images of the arc geometry and pressure, changes in the physical characteristics of the arc were validated due to the presence of the external magnetic field. Finally, welding tests were performed to verify the effects of these alterations on the morphological aspects of the weld bead. With the results it was verified that the presence of the longitudinal external magnetic field in the TIG process promoted the contraction of the arc near the tungsten electrode, besides the distribution of arc pressure takes on a double peak look. In addition, from macrographs, it was possible to observe the decrease in penetration and increase in the width of the weld bead the greater the intensity of the magnetic field adopted during the welding tests.

Keywords: GTAW. Longitudinal magnetic field. Arc physics. Bead morphology.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Medidas e curvas de regressão de distribuição radial da pressão do arco.	16
Figura 2- Diagrama esquemático do mecanismo do arco: (a) sem a aplicação do campo magnético longitudinal; (b) com a aplicação do campo magnético longitudinal.	17
Figura 3 - Largura e penetração após 2s de soldagem.....	18
Figura 4 - Regime de distribuição da densidade de corrente na superfície da poça de fusão com campo magnético externo longitudinal.....	20
Figura 5 - Vista em corte do conjunto bobina, carretel e sistema de refrigeração.	22
Figura 6 - Ilustração do conjunto bocal de gás, sistema de refrigeração e carretel de alumínio.	22
Figura 7 - Corrente máxima em função da bitola AWG de alumínio.	24
Figura 8 - Representação do fator de empacotamento entre as espiras em uma bobina: (a) Enrolamento ortogonal; (b) Enrolamento ortocíclico.....	25
Figura 9 - Representação da bobina fixada na tocha de soldagem TIG.	26
Figura 10 – Bancada de ensaios composta por (A) fonte de soldagem, (B) bobina acoplada à tocha de soldagem, (C) cuba de refrigeração, (D) multímetro, (E) fonte de tensão, (F) unidade de refrigeração e (G) cilindro de gás.	30
Figura 11 – Bancada de ensaios composta por (A) fonte de soldagem, (B) bobina acoplada à tocha de soldagem, (C) cuba de refrigeração, (D) multímetros, (E) fonte de tensão, (F) dispositivo de medição da pressão do arco voltaico, (G) relógios comparadores, (H) unidade de refrigeração e (I) cilindro de gás.....	32
Figura 12 - Bancada de ensaios composta por (A) fonte de soldagem, (B) bobina acoplada à tocha de soldagem, (C) Tartilope V1, (D) dispositivo de fixação dos corpos de prova, (E) fonte de tensão, (F) unidade de refrigeração e (G) cilindro de gás.....	33
Figura 13 – Posição de onde foram retiradas as amostras para macrografia.....	35
Figura 14 – Geometria do cordão de solda: penetração e largura.	36
Figura 15 – Gráfico da tensão do arco voltaico em função do campo magnético externo longitudinal, para os sentidos NORTE e SUL do campo magnético externo e corrente de soldagem de 50A.	37
Figura 16 - Gráfico da tensão do arco voltaico em função do campo magnético externo longitudinal, para os sentidos NORTE e SUL do campo magnético externo e corrente de soldagem de 100A.	38
Figura 17 – Delimitação do contorno geométrico do arco voltaico.	39

Figura 18 – Geometrias do arco voltaico com a aplicação do campo magnético externo longitudinal no sentido NORTE e corrente de soldagem de 50A.	41
Figura 19 – Geometrias do arco voltaico com a aplicação do campo magnético externo longitudinal no sentido SUL e corrente de soldagem de 50A.	41
Figura 20 – Geometrias do arco voltaico com a aplicação do campo magnético externo longitudinal no sentido NORTE e corrente de soldagem de 100A.	42
Figura 21 – Geometrias do arco voltaico com a aplicação do campo magnético externo longitudinal no sentido SUL e corrente de soldagem de 100A.	43
Figura 22 – Gráfico da pressão de estagnação do arco voltaico em função do campo magnético externo longitudinal, para os sentidos NORTE e SUL do campo magnético externo e corrente de soldagem de 50A.	45
Figura 23 - Gráfico da pressão de estagnação do arco voltaico em função do campo magnético externo longitudinal, para os sentidos NORTE e SUL do campo magnético externo e corrente de soldagem de 100A.	46
Figura 24 - Gráfico da pressão radial do arco voltaico em função do campo magnético externo longitudinal, para o sentido NORTE do campo magnético externo e corrente de soldagem de 50A.	47
Figura 25 - Gráfico da pressão radial do arco voltaico em função do campo magnético externo longitudinal, para o sentido NORTE do campo magnético externo e corrente de soldagem de 100A.	48
Figura 26 – Macrografia da seção transversal dos cordões de solda para 50A de corrente de soldagem.	50
Figura 27 – Gráfico da penetração e largura em função do campo magnético externo longitudinal, para o sentido NORTE do campo magnético externo e corrente de soldagem de 50A.	51
Figura 28 - Macrografia da seção transversal dos cordões de solda para 100A de corrente de soldagem.	53
Figura 29 – Gráfico da penetração e largura em função do campo magnético externo longitudinal, para o sentido NORTE e SUL do campo magnético externo e corrente de soldagem de 100A.	54
Figura 30 – Aspecto superficial para 7A de corrente na bobina, 100A de corrente de soldagem e campo magnético externo: (a) No sentido NORTE; (b) No sentido SUL.	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros fixos nos ensaios.....	28
Tabela 2 – Intensidade do campo magnético externo longitudinal em um ponto externo sobre o eixo em função da corrente na bobina.	29
Tabela 3 – Parâmetros ajustados em cada ensaio de soldagem.	34

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

TIG – Tungsten Inert Gas

AWG - American Wire Gauge

NEC - National Electrical Code

DEP – Distância eletrodo-peça

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

LTS – Laboratório de Tecnologia da Soldagem

LISTA DE SÍMBOLOS

I_c – Corrente na bobina [A]

B – Campo magnético no centro da bobina [T]

μ_0 - Permeabilidade magnética do meio [T.m/A]

N - Número de espiras

L - Comprimento da bobina [mm]

K_w - Fator de empacotamento

B_z - Campo magnético longitudinal em um ponto externo sobre o eixo [T]

R – Raio da bobina [mm]

z - Distância para a obtenção da intensidade do campo magnético externo longitudinal no arco voltaico [mm]

I_s – Corrente de soldagem [A]

V_s – Velocidade de soldagem [cm/min]

U_a – Tensão do arco voltaico [V]

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 OBJETIVOS	14
1.1.1 Objetivo Geral	14
1.1.2 Objetivos Específicos	14
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	15
2.1 EFEITOS DA APLICAÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO EXTERNO LONGITUDINAL SOBRE O COMPORTAMENTO DO ARCO VOLTAICO.....	15
2.2 EFEITOS DA APLICAÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO EXTERNO LONGITUDINAL SOBRE A POÇA DE FUSÃO	19
3 DESENVOLVIMENTO DA BOBINA	21
4 METODOLOGIA.....	28
4.1 METODOLOGIA EMPREGADA NOS ENSAIOS ACERCA DOS EFEITOS DO CAMPO MAGNÉTICO EXTERNO LONGITUDINAL SOBRE AS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO ARCO TIG.....	28
4.1.1 Metodologia dos ensaios de aquisição da tensão do arco voltaico.....	30
4.1.2 Metodologia dos ensaios de aquisição da geometria do arco voltaico	31
4.1.3 Metodologia dos ensaios de aquisição da pressão do arco voltaico.....	31
4.2 ENSAIOS DE SOLDAGEM.....	33
4.2.1 Metodologia de análise morfológica dos cordões de solda.....	35
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	37
5.1 TENSÃO DO ARCO VOLTAICO	37
5.2 GEOMETRIA DO ARCO VOLTAICO	40
5.3 PRESSÃO DO ARCO VOLTAICO	43
5.3.1 Pressão de estagnação do arco voltaico	44
5.3.2 Distribuição radial da pressão do arco voltaico.....	47
5.4 ENSAIOS DE SOLDAGEM.....	49
6 CONCLUSÕES.....	56
6.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS	57
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	58
REFERÊNCIAS	59

1 INTRODUÇÃO

No atual mercado industrial, os processos de soldagem a arco são de profunda importância, dentre estes processos evidencia-se o processo de soldagem *Tungsten Inert Gas* (TIG) devido a boa estabilidade do arco voltaico, além da elevada qualidade e pureza dos cordões de solda produzidos.

O arco voltaico constitui-se num condutor elétrico no estado plasma, logo, produz um campo magnético em seu entorno. Portanto, suscetível a ação de interferências externas, como a de campo magnéticos. Estas interferências estão relacionadas com a estabilidade do arco voltaico e, conseqüentemente, com a qualidade e propriedades mecânicas do cordão de solda.

A aplicação de campos magnéticos externos em processos de soldagem não é uma técnica recente, uma vez que diversos trabalhos visam compreender os fenômenos resultantes da aplicação de um campo magnético externo. Larquer, Souza e Reis (2016) atentam que as oscilações magnéticas do arco voltaico são produzidas por uma série de deflexões magnéticas, sendo estas deflexões dependentes do sentido das linhas de fluxo magnético geradas pelo campo magnético em relação ao arco voltaico. Posicionar o campo magnético paralelamente à direção de soldagem resultará na deflexão lateral ou transversal do arco voltaico. Na literatura, a maioria dos estudos aborda os efeitos deste campo magnético externo transversal nos processos de soldagem.

No processo TIG, o arco voltaico é estabelecido entre um eletrodo não consumível e a peça de trabalho. Logo, estudos em relação a aplicação de um campo magnético externo longitudinal são possíveis por ser um processo autógeno e, portanto, permite a análise da física do arco independente dos fenômenos de transferência metálica.

O campo magnético longitudinal é um campo coaxial que, segundo Liu, Li e Su (2018), pode alterar não apenas o comportamento do jato de plasma, como também a transferência de calor para o ânodo, podendo influenciar a fusão e solidificação do metal de solda. Diversas simulações apontam para o fato de que o emprego dessa técnica poderia controlar o processo de cristalização do metal de solda e o refinamento do grão, além de, naturalmente, melhorar as propriedades mecânicas do cordão de solda (JIANRONG et al., 1997; LI et al., 2004; LIU; LI; SU, 2018; LUO et al., 2003; YIN et al., 2011a; YIN et al., 2011b; YIN et al., 2012; YONGBING et al., 2002; ZHONGQIN et al., 2005).

Os efeitos da aplicação do campo magnético longitudinal na soldagem a arco são abordados na literatura, em sua maioria, de forma teórica, sobretudo, empregando simulações numéricas e analíticas. Nestes estudos, observa-se que a aplicação de tal campo magnético pode provocar alterações nas características do arco voltaico, da poça de fusão e do cordão de solda, estabelecendo diferenças em relação ao TIG convencional. Desta forma, o presente estudo pretende analisar como a introdução de um campo magnético externo longitudinal no processo TIG influencia na física do arco voltaico e na aplicabilidade deste na soldagem, através de uma abordagem experimental.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Investigar, a partir de uma abordagem experimental, os efeitos de um campo magnético externo longitudinal sobre algumas características físicas do arco TIG e suas implicações na morfologia do cordão de solda.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Conceber uma bobina capaz de produzir campos magnéticos longitudinais aplicados ao arco voltaico;
- Estruturar uma bancada de ensaios para realização dos ensaios de soldagem;
- Investigar a influência do campo magnético externo longitudinal sobre a tensão, pressão e geometria do arco voltaico no processo TIG;
- Investigar a influência do campo magnético externo longitudinal na morfologia dos cordões de solda.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

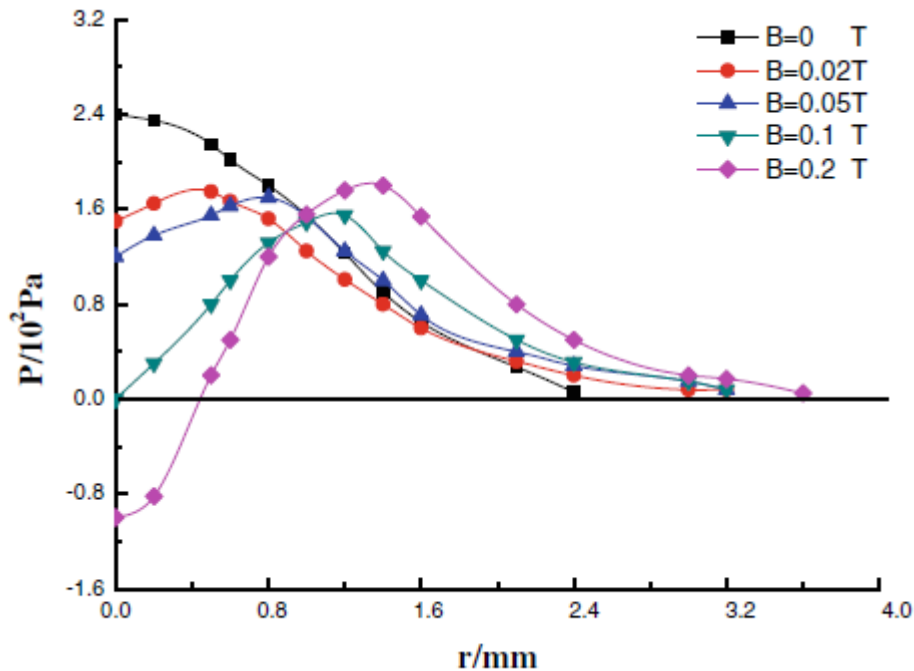
2.1 EFEITOS DA APLICAÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO EXTERNO LONGITUDINAL SOBRE O COMPORTAMENTO DO ARCO VOLTAICO

Uma abordagem para o melhor entendimento dos efeitos do campo magnético na soldagem TIG é a análise do comportamento do arco voltaico. Chang, Li e Yang (2010) mostraram através de experimentos que o arco próximo ao eletrodo é comprimido sob o efeito do campo magnético externo, e quanto maior a corrente aplicada na bobina, mais severamente é a compressão. Também foi percebido o efeito de contração do arco com o aumento do campo magnético aplicado por Liu *et al.* (2015) quando os parâmetros de soldagem não são alterados. Resultados similares foram mencionados por Sun, Yin e Zhang (2013) que afirmam terem verificado que com o aumento da densidade do fluxo magnético, o arco expande-se primeiramente e depois contrai-se devido à força de Lorentz. Jianron *et al.* (1997), definiram que esse formato diferenciado do arco ocorre para densidade magnética de 0,1T, pela alta velocidade de rotação do arco voltaico, então o raio de rotação diminui e a contração acontece.

Em comparação com o arco TIG convencional, Jian *et al.* (2016) alegam que a presença do campo magnético externo longitudinal provoca mudanças na temperatura, velocidade, geometria e campo elétrico do arco voltaico, sendo estas mudanças resultado da força de Lorentz produzida pelo campo magnético externo, assim como obtido pelos autores anteriormente citados. Os autores utilizaram equações matemáticas para descrever um modelo que analisa a influência do campo magnético externo longitudinal, com intensidade de até 0,03T, no comportamento do arco voltaico, com comprimento igual a 5mm e corrente de soldagem variando de 100A a 300A. Os autores constataram que ocorre a contração do arco voltaico próximo ao eletrodo e a sua expansão junto a peça de trabalho com o aumento da intensidade do campo magnético. Jian *et al.* (2016), também, apuraram a presença de uma pressão negativa no centro do arco voltaico, enquanto que os valores máximos de pressão ocorrem em suas extremidades, a partir de determinada intensidade do campo magnético. Esta alteração no comportamento da pressão do arco voltaico impõe, então, uma distribuição em duplo pico, semelhante ao que ocorre com a distribuição da densidade da corrente do arco voltaico, como pode ser visto na Figura 1 para 100A de corrente de soldagem e comprimento de arco de 3mm. Estes autores, afirmam também que a presença do campo magnético externo gera um arco voltaico com o comportamento de um tornado, em que as partículas carregadas

movem-se no sentido horário e na direção vertical do metal de base para o eletrodo no eixo de simetria.

Figura 1 – Medidas e curvas de regressão de distribuição radial da pressão do arco.

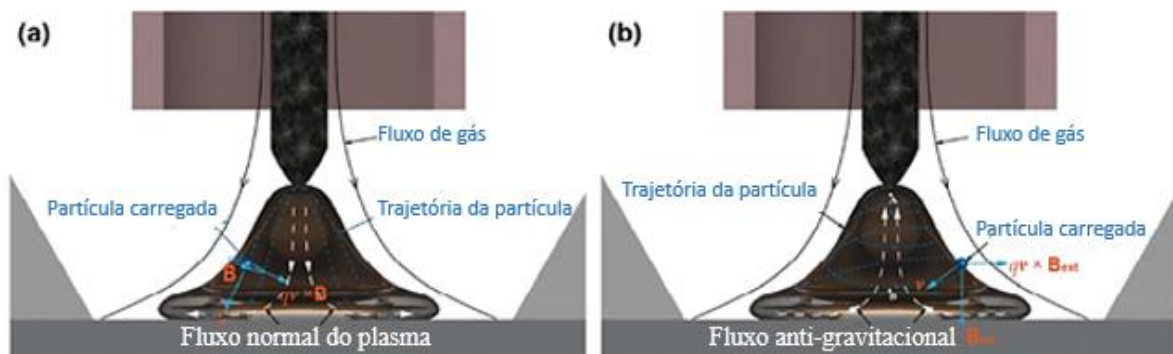


Fonte: Jian et al. (2016)

As características da transferência de calor e do jato de plasma no arco voltaico com a influência do campo magnético externo foram discutidas por Li, Liu e Su (2018), por meio de análises e simulações, realizadas no software FLUENT. Sendo este uma extensão do software ANSYS, o FLUENT é capaz de realizar a simulação de escoamentos, transferência de calor e turbulências. Como resultado dessas simulações, os autores obtiveram que o aumento do campo magnético longitudinal produz uma região de pressão negativa no centro do arco e induz um fluxo ascendente de gás nessa região como apresentado na Figura 2, chamado de fluxo anti-gravitacional. Esse fluxo fortalece com o aumento do campo magnético e concentra a energia anódica para o cátodo, além da formação de vórtices com sentido anti-horário no centro do arco. A distribuição radial da pressão do arco é representada como um duplo pico, assim como a densidade de corrente obtida por Yongbing *et al.* (2002), o que significa que a região de maior pressão ocorre nas extremidades do arco. Utilizou-se nos estudos uma peça de aço inoxidável com espessura de 5mm e que foi fixada sobre uma placa refrigerada de cobre. Além disso, os autores utilizaram um eletrodo de 3,2mm de diâmetro, campo magnético entre 0 e 0,06T,

corrente de soldagem igual a 150A, assim como definiram o argônio puro como gás de proteção e 5mm como a distância entre eletrodo e peça de trabalho. Assim como nos trabalhos anteriormente citados, Li, Liu e Su (2018) constataram que próximo a ponta do eletrodo o arco se constringe, tornando-se mais disperso próximo ao ânodo com um campo magnético longitudinal mais intenso, diferentemente do que ocorre no arco TIG convencional. Em uma comparação realizada com o arco TIG sem a aplicação do campo magnético, os autores perceberam que o fluxo total de calor para o ânodo é maior, mas a eficiência térmica é menor pela maior perda de calor por aumentar a área da superfície do ânodo que é aquecida. Para o arco compensar essa perda de calor ocorrerá o aumento da tensão de soldagem, logo sem a aplicação do campo magnético a tensão obtida pelos autores foi de 9,5V e ao aplicar um campo de 0,06T a tensão foi igual a 11,9V.

Figura 2- Diagrama esquemático do mecanismo do arco: (a) sem a aplicação do campo magnético longitudinal; (b) com a aplicação do campo magnético longitudinal.



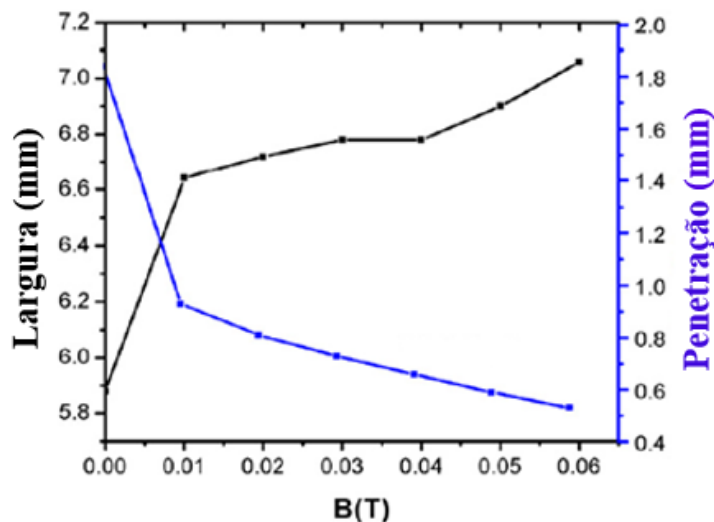
Fonte: Adaptado de Li, Liu e Su (2018)

O estudo do comportamento do arco voltaico sob o efeito do campo magnético longitudinal também é discutido por Yin *et al.* (2011a) com o auxílio de simulações numéricas no software FLUENT. Os autores utilizaram eletrodo com 3,2mm de diâmetro e ângulo de afiação igual a 60°, assim como nos estudos anteriores, porém nessa análise é utilizado um eletrodo truncado. Os autores empregaram um comprimento de arco de 3mm, corrente de soldagem de 170A, argônio como gás de proteção e campo magnético variando de 0 a 0,1T. Para Yin *et al.* (2011a), com a aplicação do campo magnético o arco voltaico rotaciona e transfere o plasma da região central para as extremidades do arco, além de induzir o refluxo do plasma no centro do arco, logo tais comportamentos implicam em um formato cônico do arco voltaico. Na sua análise, a distribuição de fluxo de calor e a pressão do arco na superfície do

ânodo também possuem um comportamento de duplo pico. Os resultados de Yin *et al.* (2011a) revelam que diferentemente do arco TIG convencional, com o campo magnético externo longitudinal a temperatura máxima do arco estará localizada nas suas extremidades. Utilizando os parâmetros de análise descritos por Yin *et al.* (2011a), Yin *et al.* (2011b) também encontraram que as distribuições de fluxo de calor e a pressão do arco são em duplo pico, além de uma maior largura e menor penetração da poça de fusão, com o aumento do campo magnético na liga de cromo (Cr-18Ni-9Ti).

Em uma simulação numérica da poça de fusão e do arco voltaico, com os mesmos parâmetros citados por Yin *et al.* (2011a), Yin *et al.* (2012) analisaram os efeitos do campo magnético no aço inoxidável AISI304 pelo software FLUENT. Os autores aplicaram um campo magnético variando de 0 a 0,06T e os resultados revelaram a existência de vórtices e um fluxo ascendente na direção do eletrodo no centro do arco, fluxo denominado como anti-gravitacional por Li, Liu e Su (2018). Yin *et al.* (2012) afirmam que associada a presença deste fluxo ascendente a temperatura, o fluxo de calor, a densidade de corrente e a pressão do arco possuem uma distribuição de duplo pico na superfície da peça de trabalho. Assim como Yin *et al.* (2011b), pela análise efetuada por Yin *et al.* (2012), diferentemente do processo TIG convencional, a poça torna-se mais larga e menos profunda com o aumento do campo magnético, como pode ser observado no gráfico da Figura 3.

Figura 3 - Largura e penetração após 2s de soldagem.



Fonte: Adaptado de Yin et al. (2012)

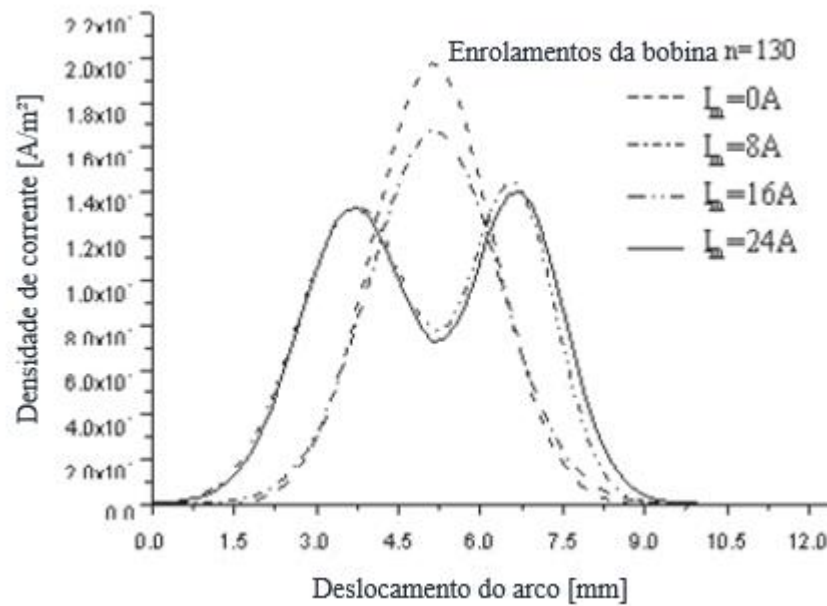
2.2 EFEITOS DA APLICAÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO EXTERNO LONGITUDINAL SOBRE A POÇA DE FUSÃO

As alterações observadas na poça de fusão estão diretamente ligadas com as mudanças que ocorrem no arco voltaico devido a presença do campo magnético externo longitudinal. Para Luo *et al.* (2003) a análise do campo de força é essencial para a compreensão do jato de plasma e da transferência de calor na poça de fusão quando aplicado o campo magnético externo. A ação desse campo de força é definido pelos autores como a força eletromagnética atuando na poça de fusão, sendo essa força composta pela força eletromagnética provocada pela interação da corrente de soldagem e o seu campo magnético, além da força eletromagnética adicional pela influência da corrente na bobina e o campo magnético externo longitudinal. Os autores usaram equações matemáticas para descrever um modelo do campo de força que incorpora a influência do campo magnético adicional atuando na poça de fusão durante a soldagem da liga de alumínio (LD10CS), com um campo de 0,02T e 0,05T de intensidade, comprimento de arco igual a 3mm e uma corrente de soldagem de 100A. Os autores constataram que a polaridade da força eletromagnética não tem influência na poça de fusão.

Um estudo similar foi realizado por Yongbing *et al.* (2002) através de ensaios experimentais e pelo método de elementos finitos, com auxílio do software ANSYS. Os autores empregaram uma bobina fixa na tocha a 10mm de uma chapa de aço inoxidável AISI321, com campo magnético de 0,1T, corrente e velocidade de soldagem, de 100A e 3mm/s, respectivamente. Nas análises e experimentos foi utilizado ainda, o argônio como gás de proteção, eletrodo de tungstênio com 3,2mm de diâmetro e comprimento do arco igual a 2mm. Os autores confirmaram que as forças dominantes na poça de fusão sob a ação do campo magnético externo são as eletromagnéticas e a de arrasto devido à rotação do arco em alta velocidade. Também foi observado que o aumento da intensidade da corrente na bobina provoca uma menor densidade de corrente na linha central do arco, e quando a corrente na bobina atinge um certo valor, a maior densidade fica localizada nas extremidades do arco voltaico, logo a distribuição de densidade da corrente torna-se um duplo pico, e nesse momento o arco rotaciona em alta velocidade, torna-se oco no centro e com formato de sino, conforme apresentado pela análise por elementos finitos no gráfico da Figura 4. Devido a rotação em alta velocidade e a expansão radial do arco próxima à superfície da peça de trabalho, os autores afirmam que parte da energia térmica levada até as extremidades resultam em um aumento da largura da poça e diminuição da penetração no metal de solda. Em uma análise por elementos finitos, realizada no software ANSYS, com o mesmo material e parâmetros de análise descritos por Yongbing *et*

al. (2002), Li *et al.* (2004) e Zhongqin *et al.* (2005) também encontraram que o comportamento da transferência de calor para a poça de fusão é alterado pela alta rotação do metal líquido. Esta alteração é devido a ação de uma força centrífuga que move esse metal líquido em direção as extremidades da poça de fusão, e com o aumento da intensidade do campo magnético a poça de fusão irá apresentar maior largura e menor penetração.

Figura 4 - Regime de distribuição da densidade de corrente na superfície da poça de fusão com campo magnético externo longitudinal.



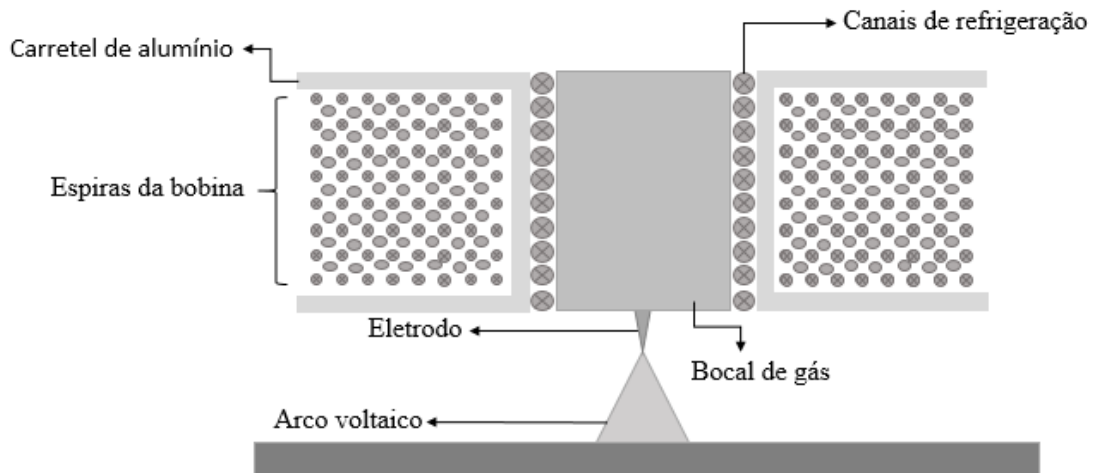
Fonte: Adaptado de Yongbing *et al.* (2002)

3 DESENVOLVIMENTO DA BOBINA

A partir da revisão bibliográfica, observou-se a mudança da geometria do arco pela aplicação de um campo magnético externo longitudinal. A geometria do arco voltaico, que antes muito se assimilava a um sino, após a aplicação do campo magnético adquiriu, então, o formato de tronco de cone, intensificando-se à medida que o campo magnético era aumentado. Notou-se na literatura que, a partir de um campo magnético de aproximadamente 0,02T, alterações na geometria do arco voltaico já eram percebidas, enquanto que a máxima intensidade de campo magnético mencionada pela literatura foi de 0,2T. Portanto, empregou-se como premissa para o dimensionamento da bobina o campo magnético de 0,02T, obtido como o mínimo na literatura para o estudo dos efeitos do campo magnético externo longitudinal na geometria do arco voltaico.

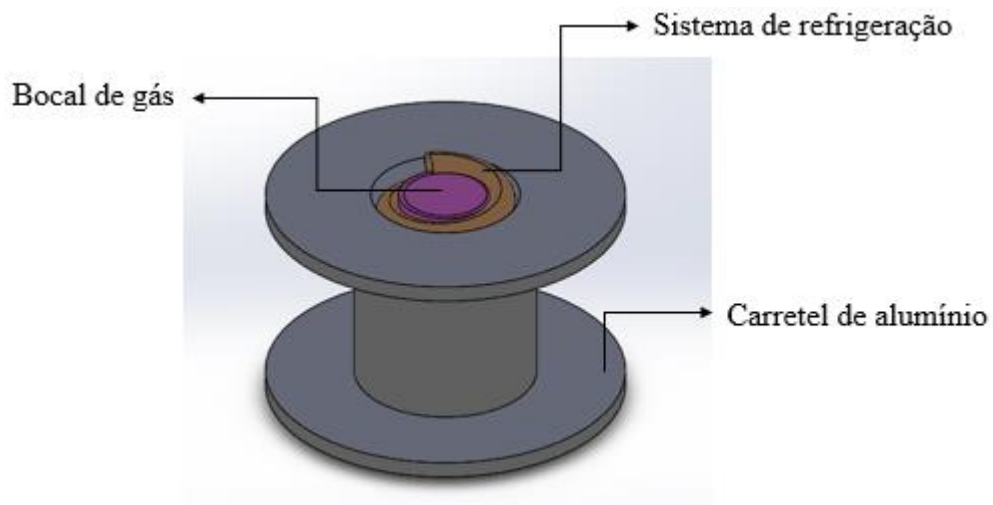
Buscando pela aplicabilidade no processo TIG, há a necessidade por menores bitolas do fio, acarretando em uma grande quantidade de espiras a serem enroladas na bobina. Logo, observa-se a indispensabilidade de um sistema de refrigeração, para então evitar a degradação do isolamento da bitola do fio devido ao número de espiras da bobina, além da evidente necessidade de proteção da bobina em relação ao calor proveniente do arco voltaico e do bocal de gás. Assim, para evitar superaquecimento e, conseqüentemente, a degradação da bobina foi desenvolvido um sistema de refrigeração e um carretel de alumínio, protegendo assim a bobina. A utilização de alumínio para a sua confecção visou melhorar a transferência de calor entre as espiras e o sistema de refrigeração, bem como evitar um acréscimo demasiado de peso ao conjunto. Na Figura 5, é ilustrada a vista em corte do conjunto entre bobina, carretel e sistema de refrigeração, enquanto que a Figura 6 representa o projeto CAD entre o bocal de gás, sistema de refrigeração e carretel de alumínio.

Figura 5 - Vista em corte do conjunto bobina, carretel e sistema de refrigeração.



Fonte: A autora (2019).

Figura 6 - Ilustração do conjunto bocal de gás, sistema de refrigeração e carretel de alumínio.



Fonte: A autora (2019).

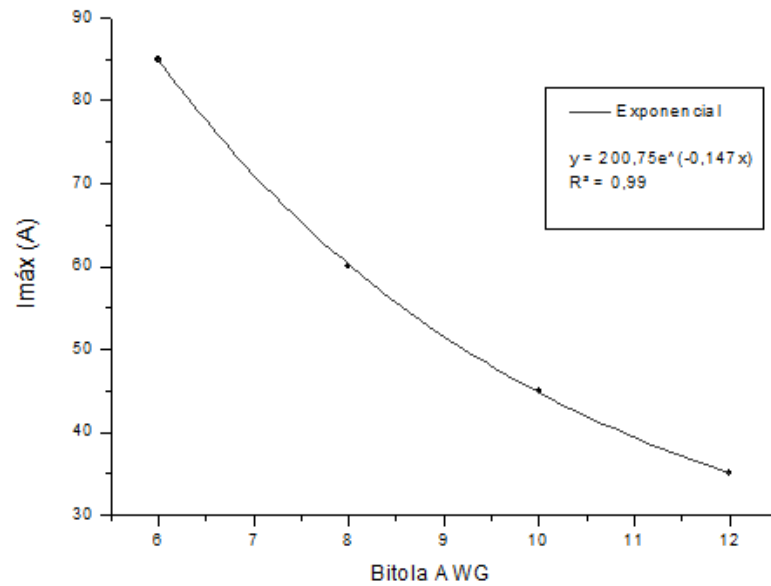
Para o projeto conceitual da bobina, utilizou-se como base a intensidade do campo magnético externo obtido na revisão bibliográfica, por esta magnitude de campo magnético já provocar alterações na geometria do arco voltaico. Por meio da Equação 1 (HALLIDAY; RESNICK, 2012), a magnitude deste campo magnético é aferido no centro da bobina, sendo este em função da permeabilidade magnética do meio (μ_0), o número de espiras (N), a intensidade da corrente (I_c) aplicada na bobina, além do comprimento (L) da bobina. O

comprimento (L) é determinado pela altura do bocal de gás, logo, torna-se um parâmetro limitador para o dimensionamento da bobina.

$$B = \frac{\mu_0 I c N}{L} \quad (1)$$

Dessa maneira, com os parâmetros μ_0 e L já definidos, há apenas a necessidade de definir a corrente máxima aplicada e o número de espiras. A fim de estabelecer o número de espiras para a bobina estipulou-se, inicialmente, a corrente máxima suportada pelo fio que constituirá a bobina. Buscando uma bobina de dimensões reduzidas, variaram-se, então, os parâmetros de projeto da bobina como fator de empacotamento, bitola do fio e, conseqüentemente, corrente máxima admissível. Para o material do fio, optou-se pelo alumínio, em função deste ser mais atrativo que o condutor de cobre, visto que promoveria uma redução de custo no projeto da bobina para aplicação da técnica do campo magnético externo. Durante as análises constatou-se que a bitola do fio produzia variações significativas nas dimensões da bobina, além de ser um fator limitante para a máxima corrente permitida, então, foi necessária a busca do valor máximo de corrente que as bitolas *American Wire Gauge* (AWG) de alumínio suportam. Como base, no *National Electrical Code* (NEC), que aborda padrões de segurança para projetos elétricos, encontrou-se os valores de corrente para as bitolas de alumínio de 6, 8, 10 e 12 AWG. A partir destes valores foi elaborado um gráfico a fim de determinar os valores de corrente máxima que podem ser empregadas em outras bitolas de alumínio. Para isso, ajustou-se através de uma análise de regressão a curva que melhor se ajusta aos valores obtidos na NEC para corrente máxima em função do valor de bitola AWG, conforme pode ser observado na Figura 7.

Figura 7 - Corrente máxima em função da bitola AWG de alumínio.



Fonte: A autora (2019).

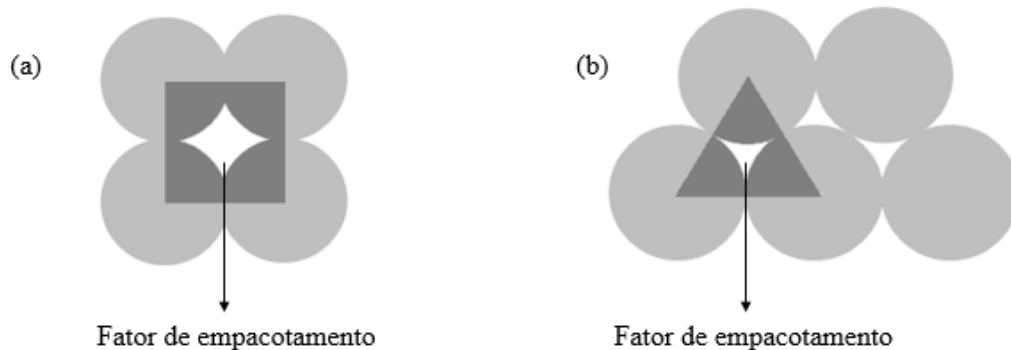
Assim, devido ao sistema de refrigeração, a busca por fios com menores bitolas tornou-se necessária, a fim de evitar um superdimensionamento do projeto. Adotou-se um fio 20 AWG de alumínio esmaltado e, conforme a equação obtida pela Figura 7, a corrente máxima a ser aplicada na bobina é de 11A. Para determinar o número mínimo de espiras para a bobina, estimou-se que seria utilizado 60% da corrente máxima, para que haja a possibilidade de ocorrer uma operação por tempos mais significativos sem que ocorra avaria dos condutores. Então, com base na relação entre os parâmetros N e I_c , adquiridos pela Equação 1, obteve-se que a bobina seria formada por 659 espiras. Contudo, caso sejam aplicados valores superiores aos 60% da corrente máxima definiu-se uma margem de segurança de 10%, resultando em 725 espiras na nova bobina.

O carretel de alumínio no qual a bobina foi construída possui 3mm de espessura em suas paredes. Entre o mesmo e o bocal de cerâmica foi acoplada uma tubulação de cobre que é responsável pelo sistema de refrigeração da bobina, permitindo a passagem de água para a troca de calor do sistema (como ilustrado pela Figura 6) e, assim, evitando que o calor oriundo do bocal de gás alcance a bobina propriamente dita. Deste modo, a altura do carretel é definida como a altura do bocal de gás de 40mm.

A largura da bobina é dependente da bitola do fio, do número de espiras, comprimento da bobina e do fator de empacotamento. O fator de empacotamento (K_w) representa o preenchimento efetivo do material, ou seja, devido à área circular do fio, incluindo o seu isolamento, ao efetuar o enrolamento das espiras em uma bobina, nem todo o espaço útil é

aproveitado. Santos (2013) afirma que o fator de empacotamento, em um enrolamento ortogonal, pode ser calculado pela relação entre a área da bitola do fio e área do quadrado formado ao efetuar a colocação das espiras lado a lado, como ilustrado pela Figura 8(a). Enquanto que para um enrolamento ortocíclico, este fator pode ser calculado pela relação entre a área da bitola do fio e área do triângulo formado ao efetuar o enrolamento das espiras segundo o autor. No fator de empacotamento ortocíclico, como ilustrado pela Figura 8(b), o posicionamento de cada camada deve ser nas fissuras da camada anterior, promovendo um menor volume da bobina. Logo, quanto maior o fator de empacotamento, menor a dimensão da bobina resultante.

Figura 8 - Representação do fator de empacotamento entre as espiras em uma bobina: (a) Enrolamento ortogonal; (b) Enrolamento ortocíclico.



Fonte: A autora (2019).

Para o fator de empacotamento em um enrolamento ortogonal, o valor calculado é de 0,87, enquanto que para o fator de empacotamento ortocíclico, é de aproximadamente 0,91. Neste estudo, foi adotado um valor de 0,8 para o fator de empacotamento ortogonal da bobina, visto que as espiras serão enroladas manualmente, sendo importante adotar um fator mais seguro devido à imprecisão do procedimento.

Estimou-se a largura da bobina a partir do número de espiras, da área da bitola do fio, já considerando seu isolamento (K_w) e o comprimento da bobina, desprezando as parcelas referentes a espessura das paredes do carretel. Assim, foi obtido 17mm de largura para a bobina e, portanto, para estabelecer o diâmetro total da bobina deve-se levar em consideração o conjunto entre diâmetro do bocal e a serpentina de refrigeração, além das paredes do carretel de alumínio, totalizando em um diâmetro de 65mm para o projeto da bobina.

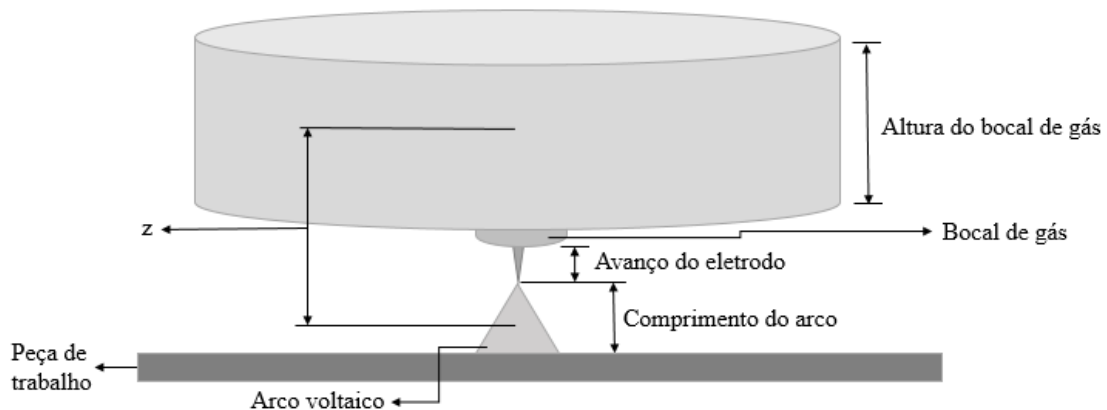
Através do valor da corrente máxima suportada pela bitola do fio escolhida e o número de espiras da bobina, foi possível calcular a máxima intensidade do campo magnético

longitudinal em um ponto externo sobre o eixo (B_z) por meio da Equação 2 (HALLIDAY; RESNICK, 2012). A distância (z), identificada na Figura 9, representa o local de interesse para a obtenção da intensidade do campo magnético durante os estudos para analisar os efeitos do campo magnético externo longitudinal no arco voltaico. Esta distância, definida pela Equação 3, é o somatório do avanço do eletrodo, metade da altura da bobina e metade da distância eletrodo-peça (DEP). A permeabilidade magnética do meio (μ_0), o número de espiras (N), e o raio da bobina (R), são outros parâmetros considerados para o cálculo de B_z .

$$B_z = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2\pi R^2 IN}{(z^2 + R^2)^{3/2}} \quad (2)$$

$$z = \text{Avanço do eletrodo} + \frac{\text{Altura da bobina}}{2} + \frac{\text{DEP}}{2} \quad (3)$$

Figura 9 - Representação da bobina fixada na tocha de soldagem TIG.



Fonte: A autora (2019).

Torna-se importante ressaltar que para o cálculo do campo magnético externo longitudinal em um ponto externo sobre o eixo, foi adotado o raio médio da bobina, levando em consideração o diâmetro do bocal e o sistema de refrigeração. O diâmetro total da bobina é relevante, uma vez que quanto mais próximo do eixo central estiverem as linhas de campo, menor será o afastamento entre estas linhas e mais intenso torna-se o campo magnético.

Assim, buscando a aplicação da técnica do campo magnético externo longitudinal por tempos mais significativos utilizou-se 60% da corrente máxima a ser aplicada na bobina, conforme a equação obtida na Figura 7. Este valor de corrente resulta em um campo magnético de 0,042T, na distância z definida previamente, contudo, existe a possibilidade de alcançar

0,066T de magnitude do campo magnético ao ser utilizada a corrente máxima na bobina de 11A. A distância z de 26mm, definida pela Equação 3, representa o somatório entre 4mm de avanço do eletrodo, 20mm pela metade da altura da bobina e 2mm de metade da DEP. Utilizando os valores de corrente na bobina e a distância z , ambos definidos anteriormente é possível perceber que a premissa de projeto da bobina é obedecida. Além de resultar numa bobina de dimensões minimamente adequada, permitindo a execução do procedimento de soldagem TIG sem interferência ou limitação do processo devido ao tamanho do conjunto tocha-bobina.

4 METODOLOGIA

O presente estudo apresenta uma abordagem experimental quanto a aplicação de um campo magnético externo longitudinal no processo de soldagem TIG. A descrição da forma com a qual serão feitas as observações acerca destes efeitos é descrita neste capítulo.

4.1 METODOLOGIA EMPREGADA NOS ENSAIOS ACERCA DOS EFEITOS DO CAMPO MAGNÉTICO EXTERNO LONGITUDINAL SOBRE AS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO ARCO TIG

Para a realização dos ensaios, utilizou-se da infraestrutura fornecida pelo Laboratório de Tecnologia da Soldagem (LTS) na UFSC - Campus Joinville. De posse da bobina, foram realizados ensaios com o intuito de verificar as alterações na geometria, tensão e pressão do arco voltaico quando aplicadas diferentes intensidades de campo magnético. Desta forma os parâmetros apresentados na Tabela 1 foram mantidos fixos. Utilizou-se correntes de soldagem (I_s) de 50 e 100A nos ensaios. A corrente aplicada na bobina ao ser variada, resulta em diferentes intensidades de campos magnéticos como listado na Tabela 2. Para a aquisição dos dados os ensaios foram divididos em três blocos, sendo um de aquisição da tensão de arco, um de obtenção das imagens a fim de analisar a geometria do arco e o outro para aferir a pressão do arco voltaico.

Tabela 1 - Parâmetros fixos nos ensaios.

Condições de Soldagem	
Distância eletrodo-peça (DEP) [mm]	4
Ângulo de afiação do eletrodo [graus]	60
Diâmetro do eletrodo [mm]	2,4
Tipo do eletrodo	AWS EWTh-2
Avanço do eletrodo [mm]	4
Gás de proteção	Argônio
Vazão de gás [L/min]	10
Tamanho do bocal de gás	Nº 8

Fonte: A autora (2019).

Tabela 2 – Intensidade do campo magnético externo longitudinal na distância z em função da corrente na bobina.

Ic [A]	Bz [T]
0	0,000
1	0,006
2	0,012
3	0,018
4	0,024
5	0,030
6	0,036
7	0,042
8	0,048
9	0,054
10	0,060
11	0,066

Fonte: A autora (2019).

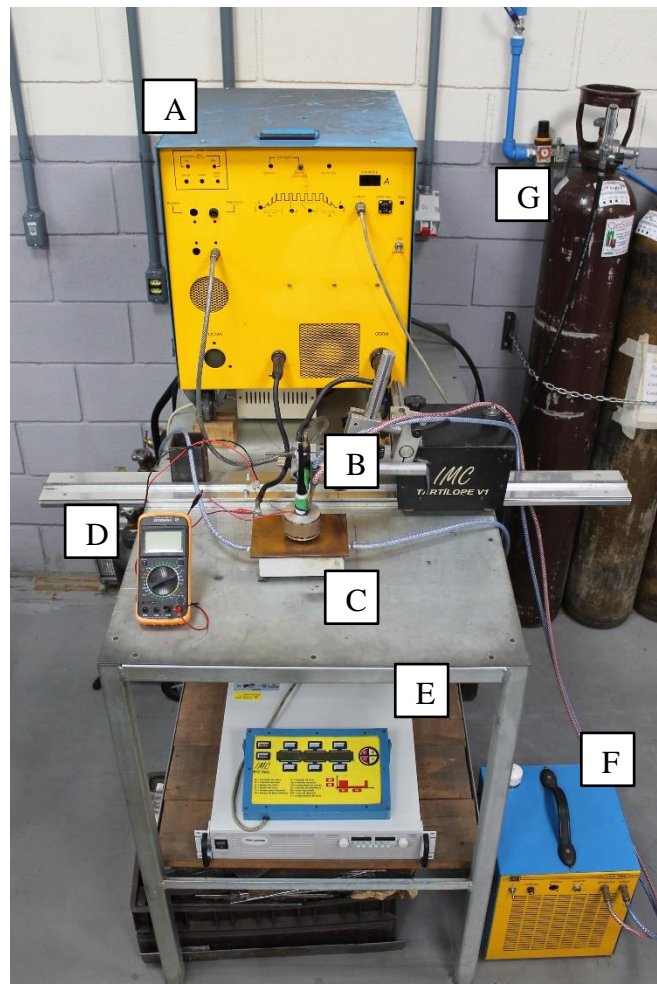
Para os três blocos de ensaios realizados utilizou-se de um dispositivo de medição desenvolvido por Cunha (2013), composto por uma estrutura mecânica, um sensor de pressão eletrônico e um circuito de condicionamento de sinal, que permite a leitura da pressão (em Pascal) diretamente no voltímetro. A estrutura mecânica do dispositivo é constituída por uma placa de cobre com 4,75mm de espessura (127 x 170 mm), refrigerada a água, um tubo prolongador também de cobre e uma cuba fabricada em aço carbono. Assim a cuba refrigerada a água, ao ser preenchida completamente, será capaz de refrigerar a placa de cobre (ânodo), sujeita ao calor do arco voltaico, possibilitando uma melhor visualização do arco voltaico de modo que não haja a formação da poça de fusão. A mesma possui um orifício de 1mm de diâmetro que permite acoplar o sensor de pressão que será utilizado durante os ensaios de medição da pressão do arco.

O campo magnético externo foi induzido de forma longitudinal, acoplando-se uma bobina refrigerada a água ao bocal da tocha TIG. O campo magnético produzido pela bobina foi alterado modificando-se a corrente imposta na bobina, sendo esta variada de um em um ampère, respeitando o limite operacional da bobina projetada. Além disso, variou-se também o sentido do campo magnético externo longitudinal produzido pela bobina, podendo este assumir sentido norte ou sul de campo magnético. A partir desta variação da intensidade do campo magnético na bobina, passaram a ser analisados os efeitos deste campo quanto a tensão, geometria e pressão do arco voltaico.

4.1.1 Metodologia dos ensaios de aquisição da tensão do arco voltaico

A primeira etapa foi a realização dos ensaios de aquisição da tensão do arco voltaico. A bancada de ensaios empregada nesta etapa é composta por uma fonte de soldagem, a bobina juntamente com a tocha de soldagem, cuba refrigerada, multímetro, fonte de tensão, unidade de refrigeração e cilindro de gás, conforme pode ser visto na Figura 10.

Figura 10 – Bancada de ensaios composta por (A) fonte de soldagem, (B) bobina acoplada à tocha de soldagem, (C) cuba de refrigeração, (D) multímetro, (E) fonte de tensão, (F) unidade de refrigeração e (G) cilindro de gás.



Fonte: A autora (2019).

Os dados referentes a tensão do arco voltaico foram coletados com a utilização de um multímetro na função voltímetro na escala 20V e resolução de 10mV. Todas as tensões foram

medidas duas vezes modificando-se a corrente aplicada na bobina a cada um ampère, para as correntes de soldagem de 50 e 100A, conforme mencionado anteriormente.

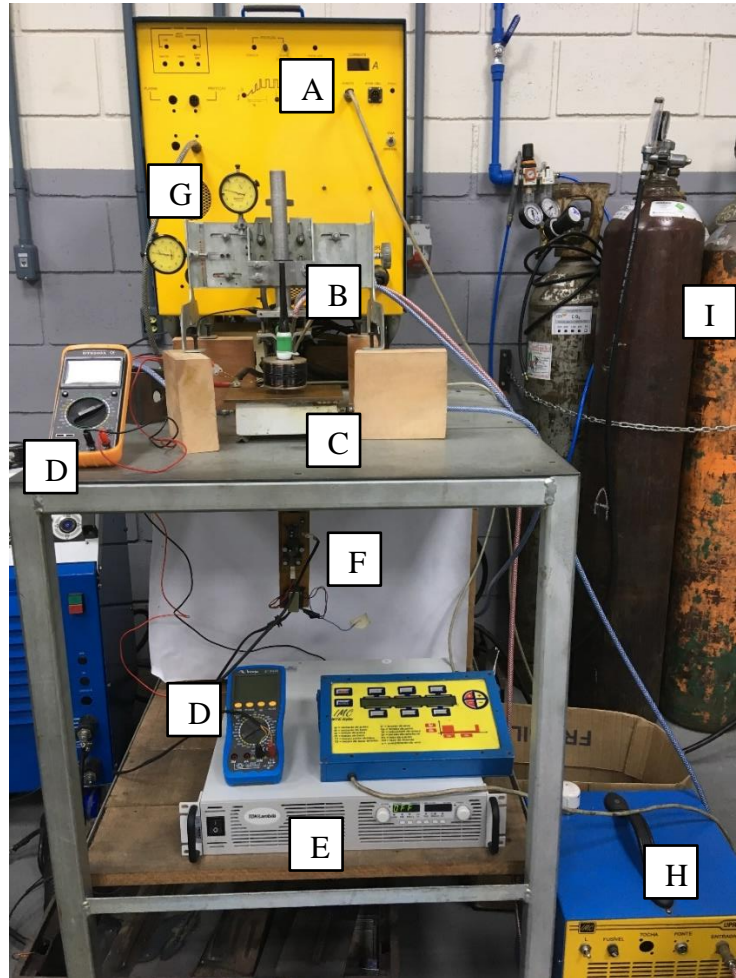
4.1.2 Metodologia dos ensaios de aquisição da geometria do arco voltaico

Concomitante aos ensaios de aquisição de tensão do arco, foram realizadas imagens do arco com o objetivo de avaliar a geometria do mesmo com a aplicação do campo magnético externo longitudinal. Para o registro das imagens utilizou-se uma câmera fotográfica do tipo DSLR, modelo Rebel T3, sendo esta uma câmera mais simples e de baixo custo. Voigt, Cunha e Díaz (2017) mostraram que tal modelo permite o ajuste manual dos parâmetros de exposição e o uso de um filtro de densidade neutra (ND) para a obtenção de uma imagem adequada da geometria do arco voltaico. Ao aplicar o campo magnético externo no processo TIG, obteve-se resultados satisfatórios de imagens para uma abertura de diafragma de f/32 e ISO 100 para ambas as correntes de soldagem utilizadas e, tempos de exposição de (1/160)s e (1/500)s para correntes de soldagem de 50 e 100A, respectivamente.

4.1.3 Metodologia dos ensaios de aquisição da pressão do arco voltaico

A etapa seguinte foi a caracterização dos efeitos da aplicação de um campo magnético externo longitudinal na pressão do arco voltaico. Foram realizados ensaios para determinar a pressão de estagnação no centro do arco, assim como, para definir o perfil da distribuição radial de pressão do arco voltaico. A bancada de ensaios empregada nesta etapa é composta por uma fonte de soldagem, bobina juntamente com a tocha de soldagem, cuba refrigerada, multímetro, fonte de tensão, dispositivo de medição da pressão do arco voltaico, relógios comparadores, unidade de refrigeração e cilindro de gás, conforme pode ser visto na Figura 11.

Figura 11 – Bancada de ensaios composta por (A) fonte de soldagem, (B) bobina acoplada à tocha de soldagem, (C) cuba de refrigeração, (D) multímetros, (E) fonte de tensão, (F) dispositivo de medição da pressão do arco voltaico, (G) relógios comparadores, (H) unidade de refrigeração e (I) cilindro de gás.



Fonte: A autora (2019).

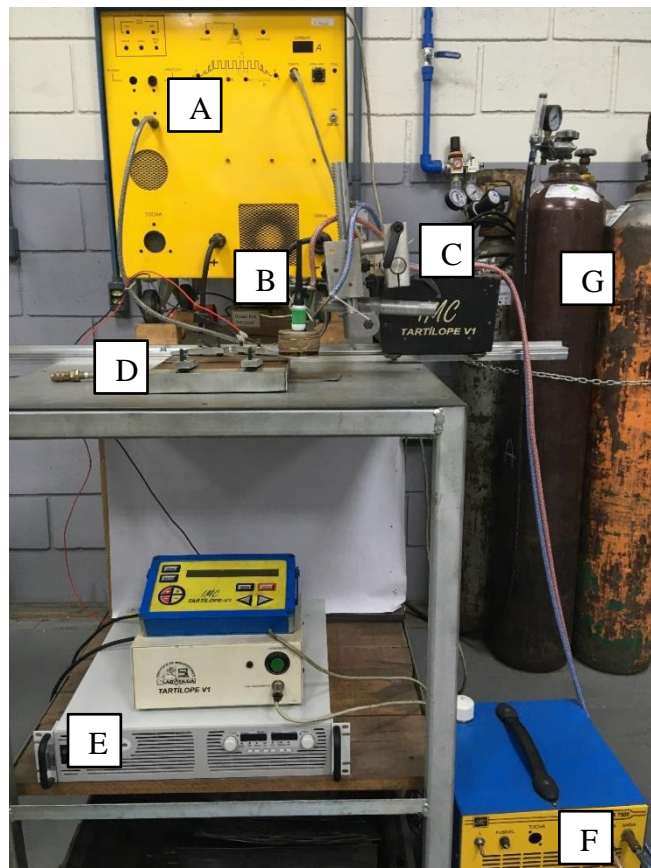
Os relógios comparadores auxiliam na precisão dos deslocamentos verticais e transversais do conjunto tocha-bobina durante os ensaios, determinando a DEP e a deslocamento radial do arco voltaico, respectivamente. O milivoltímetro presente na bancada, conectado ao conjunto tocha-bobina e a cuba refrigerada, foi utilizado apenas para auxiliar na determinação do valor preciso da DEP pelo relógio comparador. Os dados referentes a pressão do arco voltaico foram coletados com a utilização de um milivoltímetro e o dispositivo de medição da pressão. O arco voltaico de 50 e 100A foi estabelecido concentricamente ao orifício de medição presente na cuba refrigerada a fim de obter a pressão de estagnação no centro do arco. Já para a determinação da distribuição radial de pressão do arco, o conjunto tocha-bobina foi deslocado sobre uma linha reta que passa pelo orifício de medição. A leitura da pressão foi

realizada diretamente no mostrador do milivoltímetro conectado ao dispositivo de medição. A fim de obter resultados consistentes, todos os valores de pressão foram medidos três vezes modificando-se a corrente aplicada na bobina a cada um ampère, respeitando o limite operacional da bobina, para as correntes de soldagem empregadas.

4.2 ENSAIOS DE SOLDAGEM

Afim de estudar as implicações da aplicação de um campo magnético externo longitudinal na soldagem TIG, uma bancada de ensaios foi estruturada no LTS. A bancada de ensaios empregada durante os ensaios de soldagem é composta por uma fonte de soldagem, bobina juntamente com a tocha de soldagem, Tartílope V1, dispositivo de fixação dos corpos de prova, fonte de tensão, unidade de refrigeração e cilindro de gás, conforme pode ser visto na Figura 12.

Figura 12 - Bancada de ensaios composta por (A) fonte de soldagem, (B) bobina acoplada à tocha de soldagem, (C) Tartílope V1, (D) dispositivo de fixação dos corpos de prova, (E) fonte de tensão, (F) unidade de refrigeração e (G) cilindro de gás.



Fonte: A autora (2019).

A bobina juntamente com a tocha de soldagem foi fixada no sistema de deslocamento de tocha com um grau de liberdade, Tartilope V1. Sistema que se desloca sobre trilhos, proporcionando o ajuste da posição inicial e final do trajeto, além da velocidade de soldagem (V_s). O dispositivo de fixação dos corpos de prova foi utilizado para garantir uma fixação adequada das chapas ensaiadas, de modo a mitigar a deformação das mesmas devido à deformação térmica ocorrida durante os ensaios.

Durante a realização dos ensaios de soldagem, os parâmetros apresentados na Tabela 1 foram mantidos fixos. Além disso, utilizou-se 50A e 100A como as correntes de soldagem nos ensaios, para cada uma destas correntes foi ajustada uma velocidade de soldagem. Os valores de corrente aplicada na bobina e, conseqüentemente, as diferentes intensidades de campos magnéticos ajustadas durante os ensaios de soldagem estão listadas na Tabela 3, juntamente com as respectivas correntes e velocidades de soldagem.

Tabela 3 – Parâmetros ajustados em cada ensaio de soldagem.

Corpo de prova	I_s [A]	Velocidade de soldagem (V_s)	I_c [A]	B_z [T]
50A-0A-N	50A	5cm/min	0	0,000
50A-1A-N			1	0,006
50A-2A-N			2	0,012
50A-3A-N			3	0,018
100A-0A-N	100A	15cm/min	0	0,000
100A-1A-N			1	0,006
100A-3A-N			3	0,018
100A-5A-N			5	0,030
100A-7A-N			7	0,042
100A-7A-S			7	0,042

Fonte: A autora (2019).

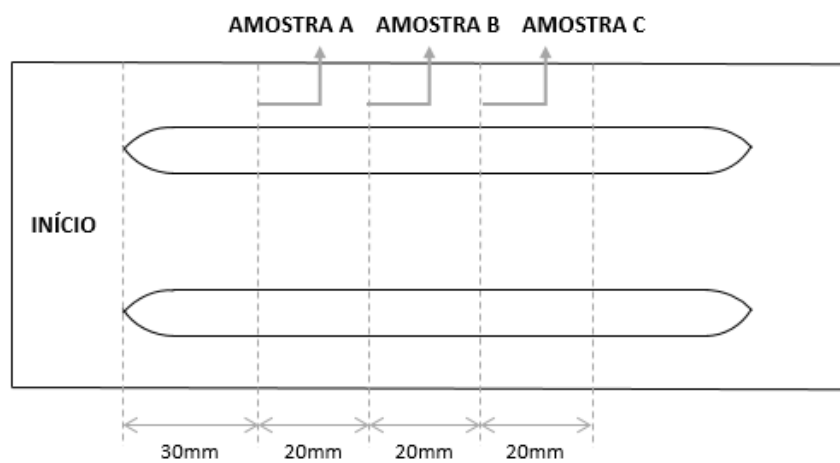
Para a realização dos ensaios de soldagem foram utilizados corpos de prova de aço INOX 304, com dimensões de 160mm x 100mm x 3mm. Este material foi utilizado por tratar-se de um material não magnético o que evita problemas de atração magnética entre o corpo de prova e a bobina durante os ensaios de soldagem.

Antes da realização de cada ensaio foram conferidos os valores de DEP e posição da ponta do eletrodo em relação ao corpo de prova, ajustada em 20mm a partir da borda da chapa, resultando em um cordão de solda de aproximadamente 120mm de comprimento.

4.2.1 Metodologia de análise morfológica dos cordões de solda

Foi realizada preparação metalográfica com o intuito de analisar a seção transversal do cordão de solda e, assim, sua morfologia. Os corpos de prova, após soldados, passaram primeiramente pela etapa de corte e, então, foram retiradas três amostras de cada cordão para realização das macrografias, de modo a melhorar a confiabilidade dos resultados. A Figura 13 apresenta os locais de onde foram retiradas as amostras.

Figura 13 – Posição de onde foram retiradas as amostras para macrografia.



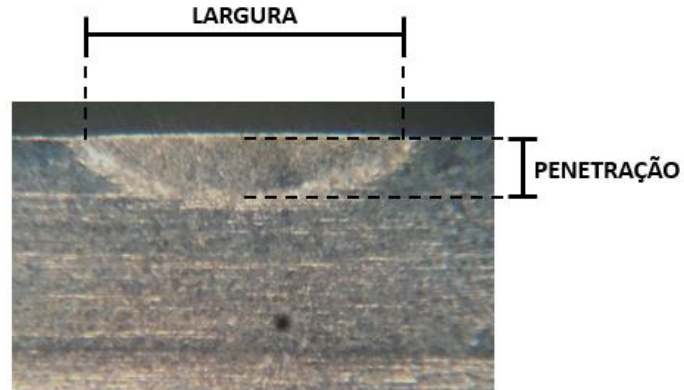
Fonte: A autora (2019).

Após cortadas, as amostras foram embutidas em resina e passaram pelo processo de lixamento superficial, onde foram utilizadas lixas com gramaturas de 80, 180, 240, 400 e 600 mesh. Em seguida foi realizado o ataque químico das amostras, utilizando o reagente Marble, sendo o ataque realizado pela técnica de imersão durante cerca de 15 segundos. Após a imersão, a superfície das amostras foi limpa com álcool e seca com algodão. Com estes procedimentos foi possível revelar nas amostras as regiões de interesse para análise da geometria resultante dos cordões de solda.

As imagens obtidas foram analisadas através do software de tratamento de imagem ImageJ. Este software permite realizar as medidas lineares dos cordões obtidos, a partir de uma calibração por meio de uma medida já conhecida. Assim realizaram-se as medidas de penetração e largura dos cordões obtidos, conforme a Figura 14. As dimensões finais de cada cordão de solda foram as médias obtidas nas amostras. Ademais, com o auxílio da técnica de *thresholding* que permite a segmentação da imagem baseada no seu histograma do nível de

cinza, foi possível realizar a medida do contorno de um dos lados do arco voltaico a partir do ponto em contato com o eletrodo até o início da região de contração anódica.

Figura 14 – Geometria do cordão de solda: penetração e largura.



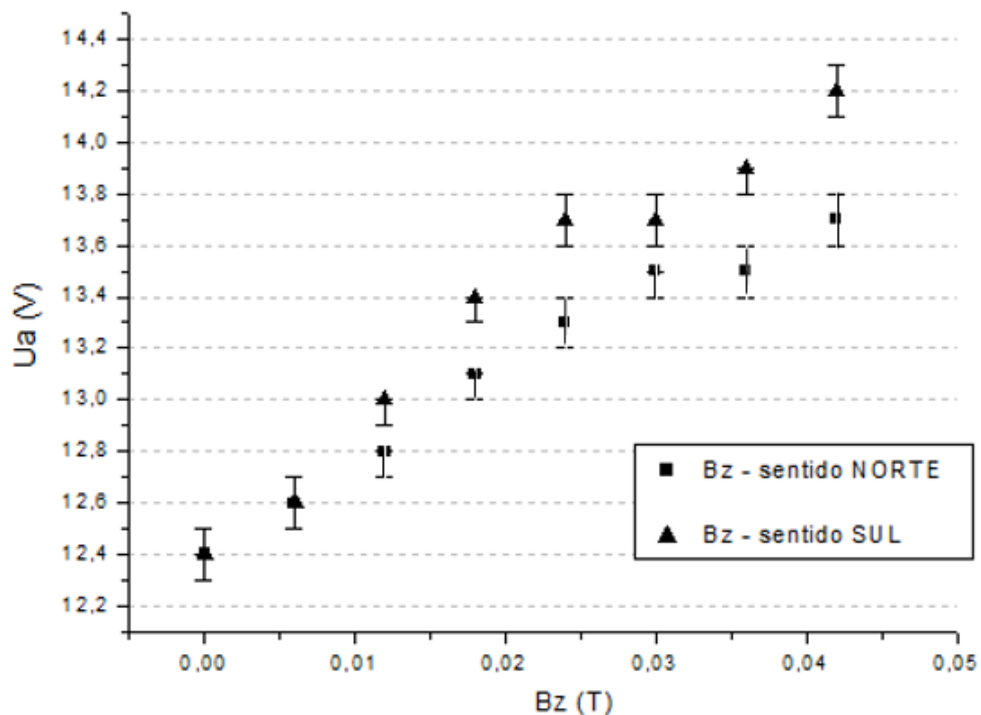
Fonte: A autora (2019).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 TENSÃO DO ARCO VOLTAICO

Ao realizar os ensaios com o auxílio da bancada apresentada na Figura 10, de posse dos dados da tensão do arco foram, então, elaborados gráficos de tensão do arco voltaico em função do campo magnético externo longitudinal em um ponto externo sobre o eixo (B_z), gerado pela aplicação de correntes na bobina. A Figura 15 apresenta o gráfico com os valores médios de tensão do arco voltaico obtidos para o sentido norte e sul de campo magnético externo imposto, para a corrente de soldagem de 50A. Os gráficos, para as correntes de soldagem empregadas, também apresentam as respectivas barras de erro considerando os valores máximo e mínimo das tensões do arco voltaico para cada corrente aplicada na bobina e sentido de campo magnético.

Figura 15 – Gráfico da tensão do arco voltaico em função do campo magnético externo longitudinal, para os sentidos NORTE e SUL do campo magnético externo e corrente de soldagem de 50A.

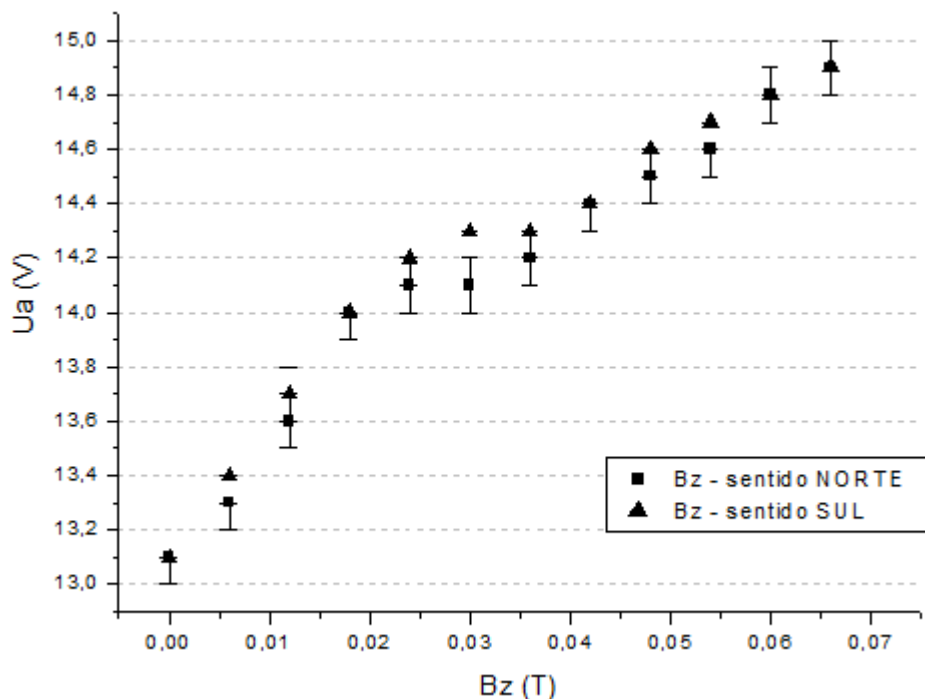


Fonte: A autora (2019).

Para corrente de soldagem de 50A, percebeu-se que, tanto no sentido norte quanto sul do campo magnético, ocorreu a instabilidade na geometria do arco voltaico ao aplicar um campo magnético de 0,018T (corrente a partir de 3A na bobina). Contudo, a partir de um campo magnético de 0,048T (corrente de 8A aplicada na bobina) constatou-se a instabilidade do valor de tensão do arco voltaico, impossibilitando a leitura no milivoltímetro. Portanto, os ensaios foram realizados até um campo magnético de 0,048T para uma corrente de soldagem de 50A.

Diferentemente dos ensaios de 50A, para 100A de corrente de soldagem não se percebeu nenhuma instabilidade nos valores de tensão do arco. Portanto, utilizou-se como fator limitante a corrente máxima suportada pelo fio 20 AWG, que é de 11A, resultando em um campo magnético de 0,066T de intensidade máxima para realização dos ensaios, nos sentidos norte e sul de campo magnético. A Figura 16 apresenta o gráfico com os valores de tensão do arco voltaico obtidos para os sentidos norte e sul de campo magnético em função do campo magnético externo longitudinal, B_z , para a corrente de 100A de soldagem.

Figura 16 - Gráfico da tensão do arco voltaico em função do campo magnético externo longitudinal, para os sentidos NORTE e SUL do campo magnético externo e corrente de soldagem de 100A.

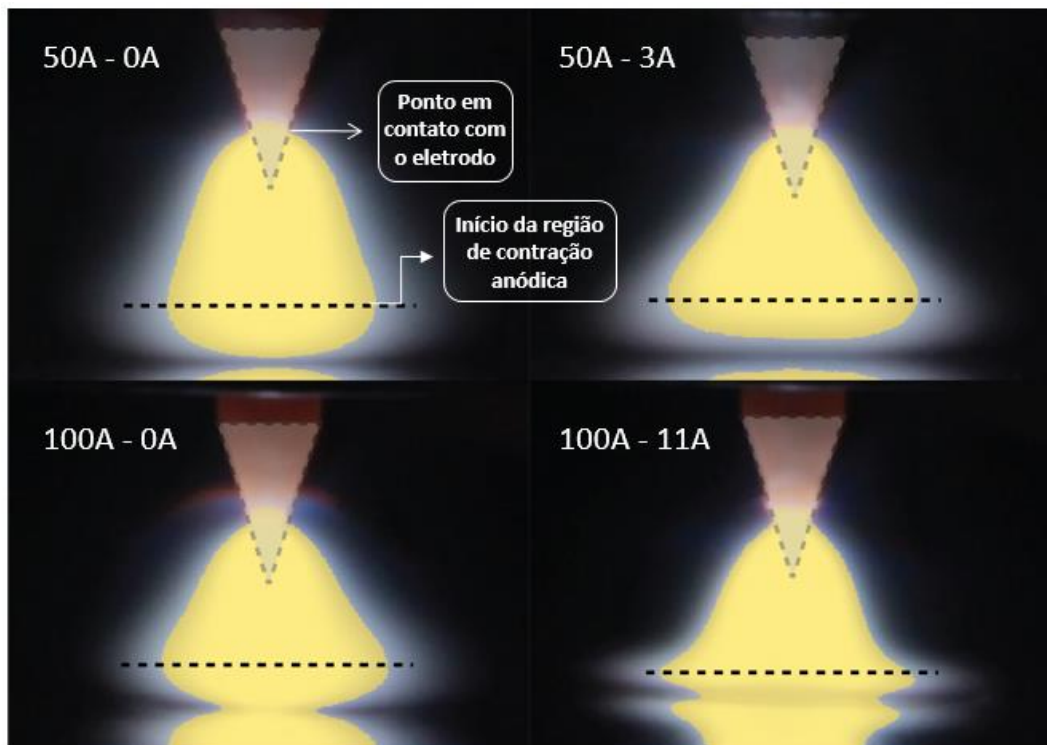


Fonte: A autora (2019).

Portanto, a realização dos ensaios de aquisição da tensão do arco voltaico, demonstram similaridades no comportamento progressivo de crescimento ao intensificar o campo magnético externo aplicado pela bobina acoplada ao bocal TIG nos sentidos norte e sul de campo magnético, para as duas correntes de soldagem estudadas. A tensão do arco voltaico, assim como mencionado por Liu *et al.* (2018), apresenta um aumento com a intensidade do campo magnético externo longitudinal aplicado para as duas correntes de soldagem analisadas, porém para 50A de corrente de soldagem é possível observar um comportamento mais linear dos valores de tensão obtidos. O aumento na tensão para 50A de corrente de soldagem para o sentido sul do campo magnético é de 13% e de 10% para o sentido norte do campo magnético. Ademais, para 100A de corrente de soldagem o aumento é de 12%, para os dois sentidos de campo magnético.

Liu *et al.* (2018), citam que o aumento da tensão do arco voltaico é decorrente da maior perda de calor para o ambiente com o aumento do alongamento do contorno do arco voltaico. Logo, assumindo como referencial o início da região anódica, conforme Figura 17.

Figura 17 – Delimitação do contorno geométrico do arco voltaico.



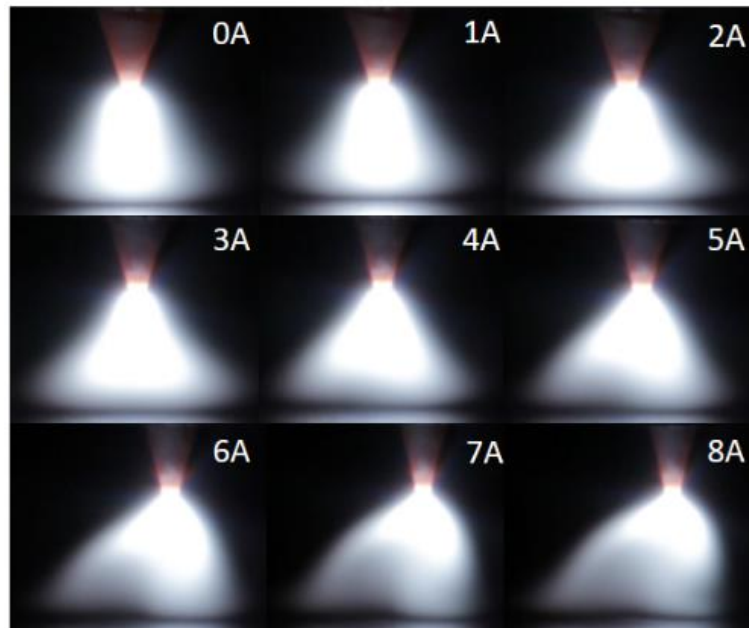
Fonte: A autora (2019).

Encontrou-se 4mm como medida do contorno do arco para o arco TIG convencional e 50A de corrente de soldagem. E ainda com a mesma corrente de soldagem e 0,018T de campo magnético, obteve-se 3,9mm como contorno do arco voltaico, portanto houve uma redução de 1%, considerada ínfima. Para 100A de corrente de soldagem, o contorno para o arco TIG convencional é de 3,8mm e para o campo magnético de 0,066T esse contorno é igual a 4,3mm, o que representa um aumento de 13%. Visto que a região de contração anódica do arco representa o local em que a perda de calor é mais significativa para a peça de trabalho, o aumento de 13% do contorno para o arco a 100A de corrente de soldagem indica que houve, portanto, o aumento da área do arco em contato com o ambiente e, conseqüentemente para a perda de calor. Esse aumento na perda de calor acarreta no aumento da tensão com a intensidade do campo magnético externo longitudinal.

5.2 GEOMETRIA DO ARCO VOLTAICO

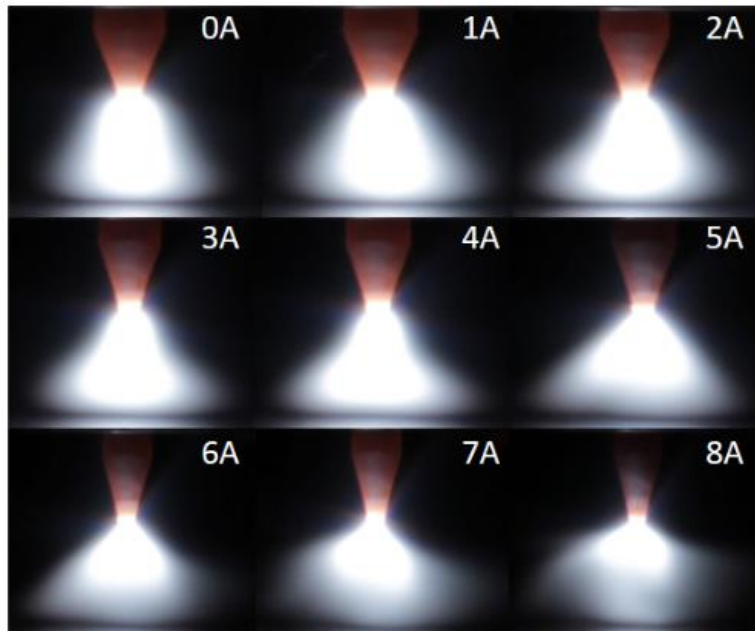
As imagens da geometria do arco voltaico sob o efeito do campo magnético externo longitudinal foram realizadas em conjunto com os ensaios de aquisição da tensão do arco voltaico. Como mencionado anteriormente nos ensaios para 50A de corrente de soldagem, a aquisição das imagens foi realizada até um fluxo magnético de 0,048T (8A de corrente na bobina). Conforme pode ser visto nas Figuras 18 e 19, a variação da geometria do arco voltaico já pode ser observada com a aplicação de um campo magnético de somente 0,006T (corrente de 1A na bobina), para os sentidos norte e sul, respectivamente. Contudo, a partir de um campo magnético de 0,018T (3A de corrente na bobina), é possível notar a instabilidade do arco voltaico. Tal instabilidade é intensificada com o aumento da densidade magnética na bobina havendo certa dispersão e efeito esvoaçante no arco voltaico.

Figura 18 – Geometrias do arco voltaico com a aplicação do campo magnético externo longitudinal no sentido NORTE e corrente de soldagem de 50A.



Fonte: A autora (2019).

Figura 19 – Geometrias do arco voltaico com a aplicação do campo magnético externo longitudinal no sentido SUL e corrente de soldagem de 50A.

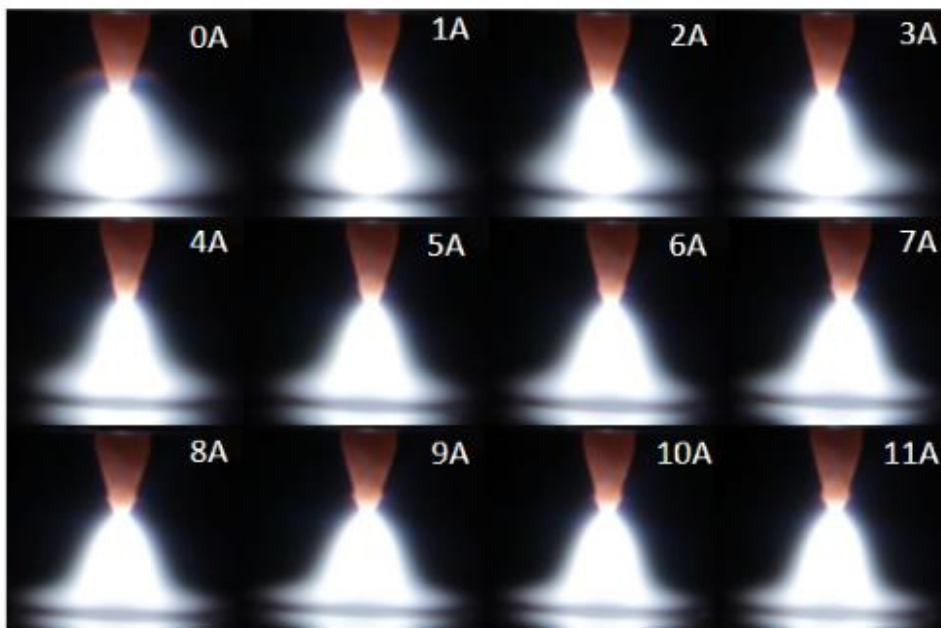


Fonte: A autora (2019).

Percebe-se nas Figuras 18 e 19, para 50A de corrente de soldagem, assim como para 100A de corrente de soldagem nas Figuras 20 e 21, que o arco voltaico próximo ao eletrodo de

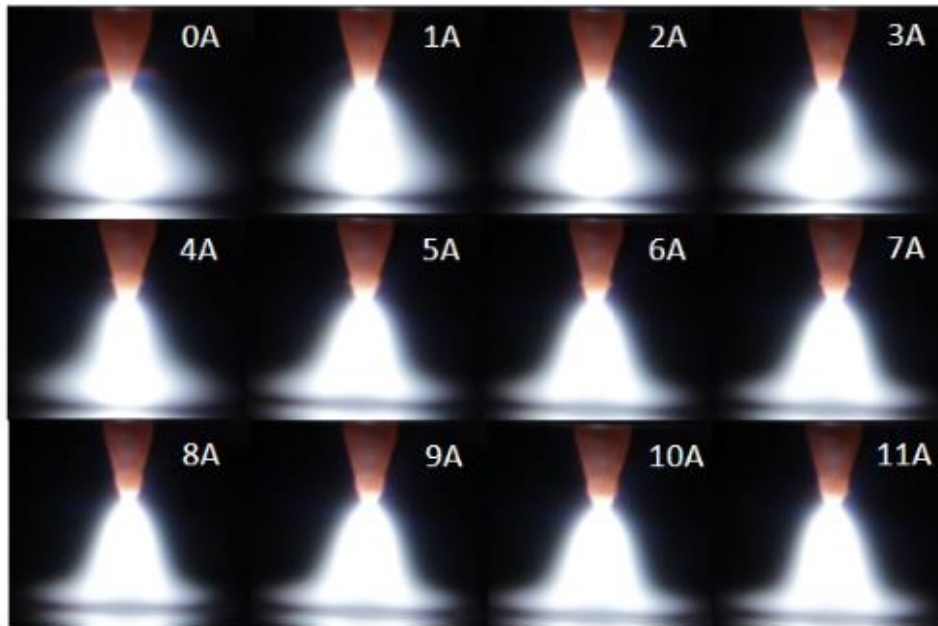
tungstênio é comprimido sob o efeito do campo magnético externo, e quanto maior a intensidade do campo magnético produzido pela bobina mais severamente é esta compressão, independentemente do sentido do campo magnético aplicado durante os ensaios. Estes resultados concordam com as informações disponíveis na literatura (JIANRONG et al., 1997; LI et al., 2004; LIU; LI; SU, 2018; LUO et al., 2003; YIN et al., 2011a; YIN et al., 2011b; YIN et al., 2012; YONGBING et al., 2002; ZHONGQIN et al., 2005; SUN; YIN; ZHANG, 2013).

Figura 20 – Geometrias do arco voltaico com a aplicação do campo magnético externo longitudinal no sentido NORTE e corrente de soldagem de 100A.



Fonte: A autora (2019).

Figura 21 – Geometrias do arco voltaico com a aplicação do campo magnético externo longitudinal no sentido SUL e corrente de soldagem de 100A.



Fonte: A autora (2019).

Nota-se que com a inserção do campo magnético externo longitudinal ocorre a estabilização do arco voltaico e uma mudança em sua geometria. Esta alteração geométrica do arco é vista para todas as correntes de soldagem estudadas. O arco voltaico deixa de apresentar uma forma semelhante à de um sino, e passa a exibir um formato cônico, pronunciando-se cada vez mais com o aumento do campo magnético externo longitudinal produzido pela bobina.

5.3 PRESSÃO DO ARCO VOLTAICO

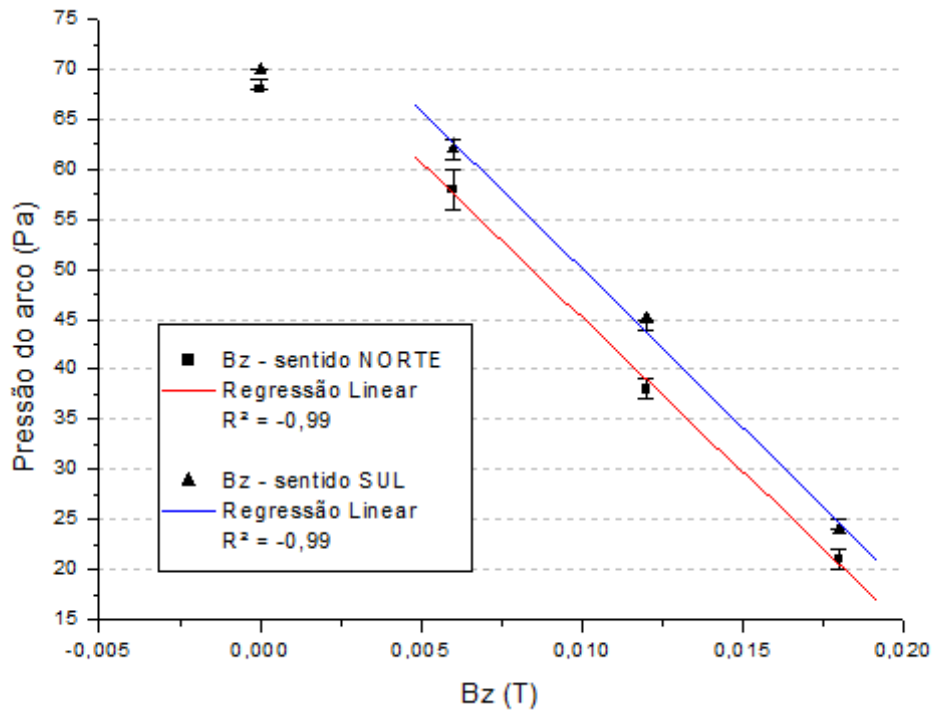
Cunha (2013) ao utilizar a corrente de soldagem de 50A, bocal de gás N°8 e DEP de 4mm, no processo TIG, obteve 70Pa de pressão de estagnação do arco voltaico. Portanto, para a realização dos ensaios de aquisição da pressão do arco voltaico neste estudo empregou-se como valor de referência o valor de pressão obtido por Cunha (2013). Para garantir a mesma precisão da pressão de estagnação na condição de 100A de corrente de soldagem, em um primeiro momento alcançou-se a condição de referência de 70Pa, sendo esta a condição de pressão de estagnação para 50A de corrente de soldagem e, posteriormente, foi ajustada a corrente de soldagem de 100A desejada, determinando 430Pa como o valor de referência ao utilizar a corrente de soldagem de 100A.

5.3.1 Pressão de estagnação do arco voltaico

De posse dos resultados obtidos das alterações na geometria do arco voltaico pela aplicação de um campo magnético externo longitudinal, tornou-se possível determinar os parâmetros a serem utilizados nos estudos do efeito deste campo magnético na pressão de estagnação e radial do arco voltaico. Devido à instabilidade observada durante os ensaios para avaliar a geometria do arco voltaico, optou-se por limitar a um campo magnético de 0,018T (3A de corrente na bobina) para os ensaios de pressão do arco voltaico para 50A de corrente de soldagem. Diferentemente para a corrente de soldagem de 100A, em que os ensaios variaram o campo magnético até 0,066T (corrente máxima suportada de 11A pela bobina).

Com os dados obtidos foram, então, elaborados gráficos da pressão de estagnação do arco voltaico em função do campo magnético imposto pela bobina (B_z) para as correntes de soldagem estudadas, assim como para os sentidos norte e sul de campo magnético. A Figura 22 apresenta o resultado obtido com os valores médios da pressão de estagnação do arco voltaico para corrente de soldagem de 50A, para os sentidos norte e sul de campo magnético. Os gráficos, para as correntes de soldagem empregadas, também apresentam as respectivas barras de erro considerando os valores máximo e mínimo das pressões de estagnação do arco voltaico para cada densidade de campo magnético produzido pela bobina e sentido de campo magnético. Para a barra de erro de cada gráfico referente a pressão do arco, considerou-se os valores de mínimo e máximo entre os três valores medidos para cada intensidade de campo magnético produzido pela bobina e corrente de soldagem considerada nos estudos.

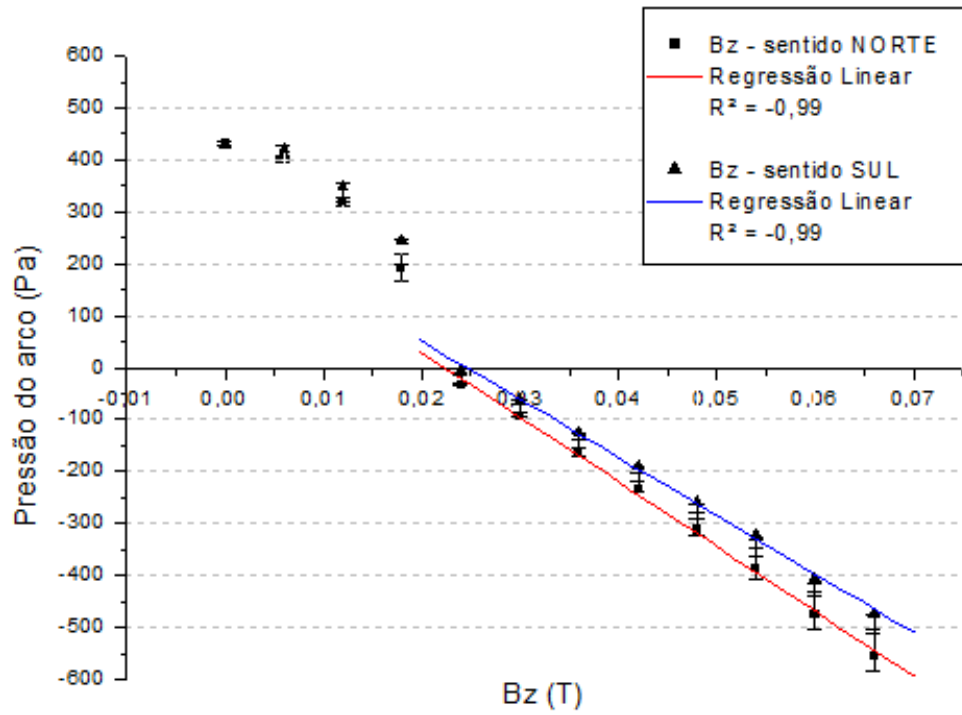
Figura 22 – Gráfico da pressão de estagnação do arco voltaico em função do campo magnético externo longitudinal, para os sentidos NORTE e SUL do campo magnético externo e corrente de soldagem de 50A.



Fonte: A autora (2019).

A partir do gráfico na Figura 22, percebe-se um comportamento linear, representado pela análise de regressão linear, dos valores medidos de pressão de estagnação com início em um campo magnético de 0,006T (1A de corrente na bobina). Tal comportamento repetiu-se para os ensaios de 100A de corrente de soldagem, a partir de um campo magnético de 0,024T (4A de corrente na bobina), como pode ser visto na Figura 23.

Figura 23 - Gráfico da pressão de estagnação do arco voltaico em função do campo magnético externo longitudinal, para os sentidos NORTE e SUL do campo magnético externo e corrente de soldagem de 100A.



Fonte: A autora (2019).

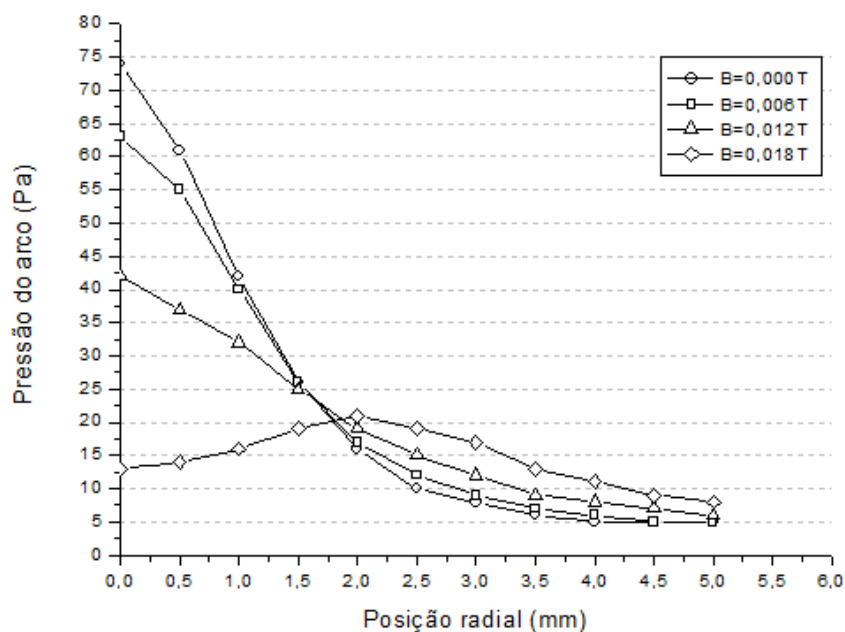
Com base nos resultados da pressão de estagnação da Figura 23, torna-se possível verificar a existência de uma pressão negativa no centro do arco voltaico devido a ação do campo magnético externo longitudinal aplicado durante o processo de soldagem TIG, assim como relatado por Liu *et al.* (2018). Além disso, é possível perceber que não existem diferenças significativas no comportamento do arco voltaico com a alteração de sentido do campo magnético aplicado na bobina, sendo ele norte ou sul, assim como nos resultados de tensão e geometria do arco. Luo *et al.* (2003), também constataram que o sentido do campo magnético não tem influência na poça de fusão. Portanto, a partir da análise destes dados determinou-se que os ensaios para a análise da influência do campo magnético externo longitudinal na distribuição radial da pressão do arco voltaico seria realizado apenas para um sentido de campo magnético, respeitando o limite de campo magnético produzido pela bobina para cada corrente de soldagem estudada, como mencionado anteriormente.

5.3.2 Distribuição radial da pressão do arco voltaico

Após constatar a não influência da alteração do sentido do campo magnético externo longitudinal no comportamento da pressão de estagnação, foi determinado que os ensaios para a aquisição dos dados referentes a distribuição radial de pressão do arco voltaico seriam realizados para o sentido norte de campo magnético. Para uma melhor observação do comportamento radial da pressão sob o efeito do campo magnético externo, uma vez que houve pouca variação entre os três valores medidos durante os ensaios ao realizar o deslocamento radial do conjunto tocha-bobina, optou-se por não ilustrar a barra de erro nos gráficos. Para a corrente de soldagem de 50A, a média do erro entre os valores máximos e mínimos foi de 0,2%, enquanto que para a corrente de 100A a média correspondeu a 1%.

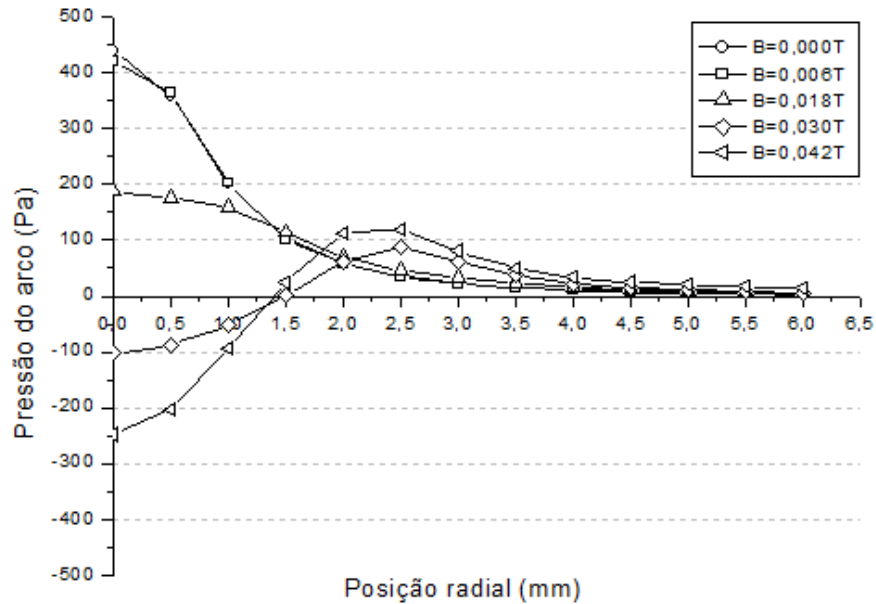
Devido a simetria do arco voltaico, foi realizado o deslocamento do conjunto tocha-bobina em apenas um sentido, variando o posicionamento do conjunto a cada 0,5mm com o auxílio do relógio comparador até que a indicação da pressão no milivoltímetro estabilizasse. Como pode ser visto nas Figuras 24 e 25, os gráficos ilustram o comportamento da distribuição radial da pressão do arco voltaico em função do campo magnético produzido pela bobina, para 50A e 100A de corrente de soldagem, respectivamente.

Figura 24 - Gráfico da pressão radial do arco voltaico em função do campo magnético externo longitudinal, para o sentido NORTE do campo magnético externo e corrente de soldagem de 50A.



Fonte: A autora (2019).

Figura 25 - Gráfico da pressão radial do arco voltaico em função do campo magnético externo longitudinal, para o sentido NORTE do campo magnético externo e corrente de soldagem de 100A.



Fonte: A autora (2019).

Como mencionado na Tabela 2, é possível observar que para um valor de campo magnético de 0,018T, para 50A de corrente de soldagem, enquanto que para um campo magnético de 0,03T, para 100A de corrente de soldagem, a distribuição radial de pressão do arco TIG perante o efeito do campo magnético externo apresenta um comportamento de duplo-pico, assim como nos resultados mencionados por Yongbing *et al.* (2002), Yin *et al.* (2011a), Yin *et al.* (2011b), Yin *et al.* (2012) e Jian *et al.* (2016). O que significa que na distribuição de duplo-pico, a região de maior pressão ocorre nas extremidades do arco voltaico. O aumento do campo magnético externo longitudinal produz uma região de pressão negativa no centro do arco, que para Liu *et al.* (2018) induz um fluxo ascendente de gás nessa região chamado de fluxo anti-gravitacional, assim como para Yin *et al.* (2012) que também descreve a presença de um fluxo ascendente de gás no centro do arco voltaico.

Para 50A de corrente de soldagem, não foi possível obter valores negativos de pressão no centro do arco TIG, porém, a distribuição em duplo-pico da pressão é observada, fato este que valida os comportamentos similares e, proporcionais em magnitude com a corrente de soldagem utilizada.

Como se pode observar, para 50A de corrente de soldagem, a pressão decai de 74Pa, no centro do arco voltaico, para 13Pa ao aplicar um campo magnético externo longitudinal de

0,018T, acarretando em uma redução de 82%. Enquanto que, para 100A de corrente de soldagem, a pressão reduz de 439Pa para -102Pa sob efeito de um campo magnético de 0,03T causando uma queda de 123% e, ao aplicar um campo magnético de 0,042T o que reduz a pressão para -248Pa ocorre um decaimento de 156%. Estas informações de redução da pressão no centro do arco, assim como o perfil de distribuição radial da pressão condizem com a literatura (JIAN et al., 2016; LIU; LI; SU, 2018; YIN et al., 2011a; YIN et al., 2011b; YONGBING et al., 2002).

Na Figura 24, é possível observar que para 0,018T de campo magnético a pressão média do arco é de 15Pa até 3mm de posição radial, ao considerar a simetria do arco voltaico é plausível presumir que para tal intensidade de campo magnético a pressão é praticamente uniforme em toda área superficial da poça de fusão. Ao analisar o perfil de distribuição radial da pressão para 100A de corrente de soldagem, na Figura 25, para um fluxo magnético de 0,03T e 0,042T, a pressão do arco sai do patamar de valores negativos em 1,5mm de posição radial e alcançam os máximos valores de pressão entre 2 e 2,5mm.

Por fim, tanto para 50A quanto 100A de corrente na bobina, percebeu-se a alteração do comportamento da distribuição da pressão do arco ao comparar com o arco do processo TIG convencional. Constata-se que estas modificações no perfil de distribuição poderão afetar a poça de fusão e, conseqüentemente, o cordão de solda.

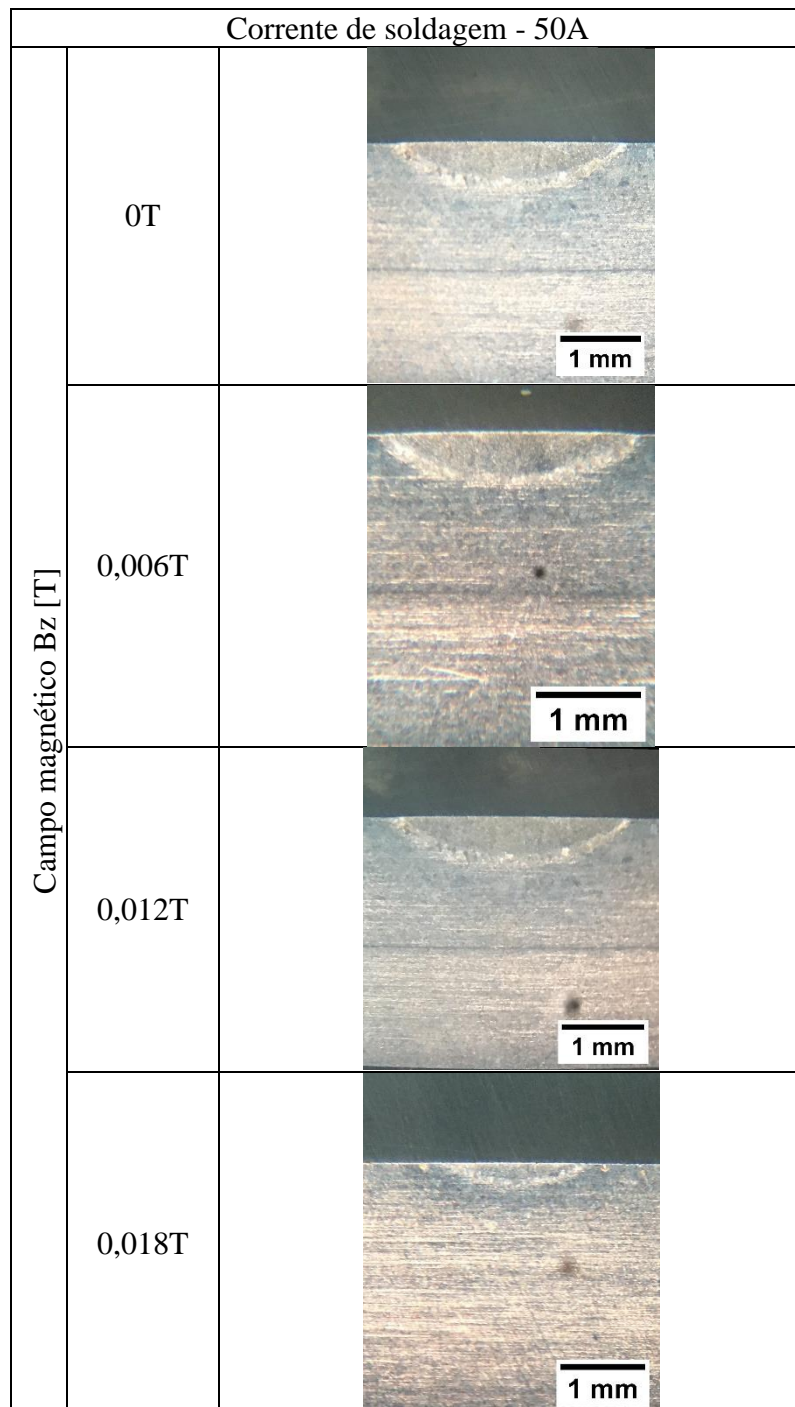
5.4 ENSAIOS DE SOLDAGEM

De posse dos resultados obtidos quanto aos ensaios sobre os efeitos do campo magnético externo longitudinal sobre as características do arco TIG, tornou-se possível determinar os parâmetros a serem utilizados nos ensaios de soldagem com a aplicação do campo magnético externo longitudinal no processo TIG. Realizou-se os ensaios de soldagem com os parâmetros descritos na Tabela 3.

Ao realizar os ensaios, foram obtidos quatro cordões de solda para 50A de corrente de soldagem, como pode ser observado na Figura 26. Para todas as correntes aplicadas na bobina durante estes ensaios, utilizou-se o sentido norte do campo magnético longitudinal.

Do ponto de vista macroscópico, os cordões de solda para 50A de corrente de soldagem foram muito semelhantes e foi possível concluir que para o campo magnético de 0,018T houve uma redução na largura do cordão. Na Figura 26 são apresentadas as macrografias da seção transversal dos cordões de solda obtidos com a aplicação do campo magnético externo.

Figura 26 – Macrografia da seção transversal dos cordões de solda para 50A de corrente de soldagem.

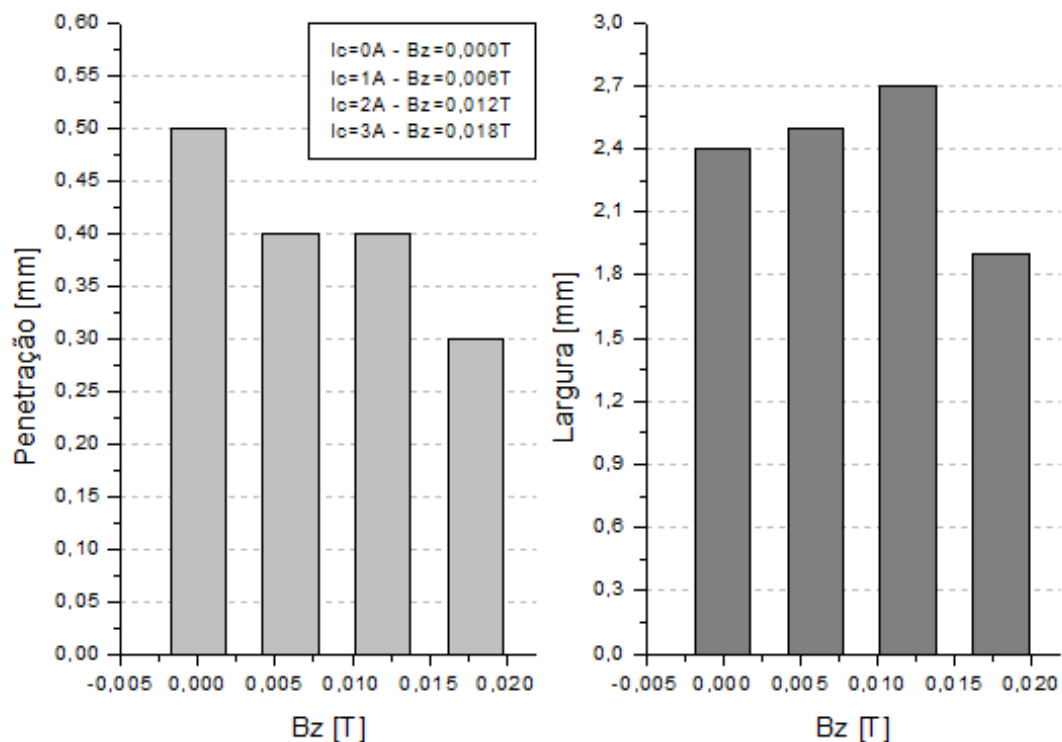


Fonte: A autora (2019).

Conforme pode ser observado, na Figura 26, mediu-se que há um aumento da largura e diminuição da penetração ao aplicar um campo magnético de 0,006T e 0,012T no processo TIG. Contudo, para 0,018T de campo magnético externo ocorreu a diminuição tanto da largura quanto da penetração. Supõe-se que o comportamento em duplo-pico do arco voltaico para uma

menor corrente de soldagem, no caso a de 50A, promova a redução tanto da largura quanto da penetração com a intensidade do campo magnético, diferentemente do que ocorre para 100A de corrente de soldagem. Visto que na literatura a menor corrente de soldagem abordada nos estudos é 100A, sugere-se que sejam realizados ensaios para campos magnéticos superiores a 0,018T para investigar se para a corrente de 50A de corrente de soldagem ocorreu apenas uma anomalia ou há um comportamento diferente para a largura do que o determinado pela literatura. As dimensões finais de penetração e largura para os quatro cordões são ilustradas na Figura 27.

Figura 27 – Gráfico da penetração e largura em função do campo magnético externo longitudinal, para o sentido NORTE do campo magnético externo e corrente de soldagem de 50A.



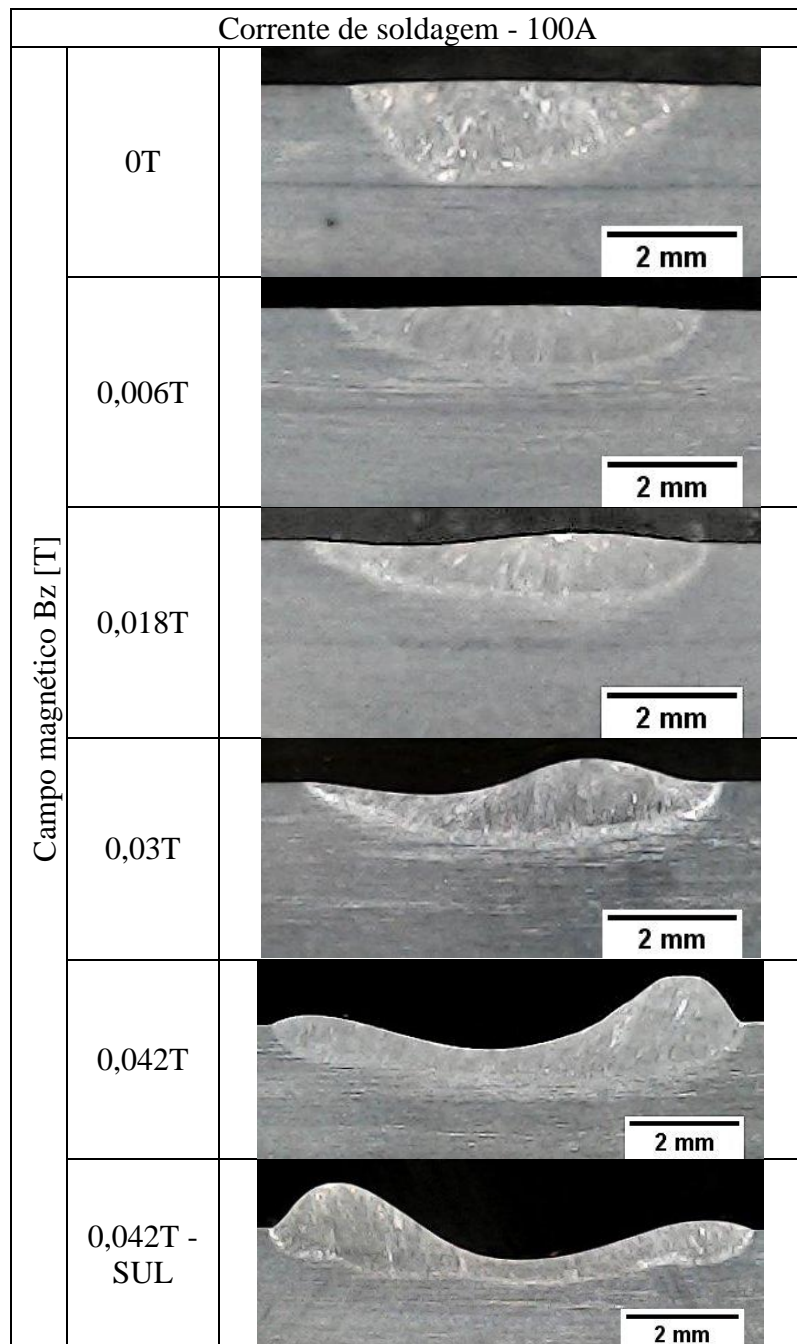
Fonte: A autora (2019).

Como se pode observar, para 50A de corrente de soldagem, a penetração decai de 0,5mm no cordão TIG convencional, para 0,3mm ao aplicar 0,018T de campo magnético acarretando em uma redução de 40%. Ademais, para 0,006T e 0,012T de campo magnético ocorre um aumento na largura do cordão de 3% e 10%, respectivamente. Contudo, é percebida uma redução de 21% na largura do cordão de solda com a aplicação do campo magnético externo de 0,018T.

Ademais, realizou-se ensaios de soldagem para 100A de corrente de soldagem, nos quais foram obtidos oito cordões de solda. Durante os ensaios, percebeu-se que o aumento da intensidade do campo magnético externo promovia o deslocamento do metal de base do centro para a extremidade da poça de fusão. Para 100A de corrente de soldagem, inicialmente, o campo magnético externo foi adotado para o sentido norte. Uma vez notada a repetição do comportamento de deslocamento do metal de base para a direita do cordão de solda, verificou-se o alinhamento da bobina e o posicionamento do cabo-terra como possíveis causas para tal comportamento. Ao adotar um campo magnético de 0,042T, tais causas foram eliminadas como justificativa para o deslocamento do metal de base através de uma avaliação superficial dos cordões de solda. No entanto, ao empregar o sentido do campo magnético externo como sul, notou-se que o deslocamento do metal de base ocorre para a esquerda do cordão.

Na Figura 28 são apresentadas as macrografias da seção transversal dos cordões de solda obtidos com a aplicação do campo magnético externo nos ensaios para 100A de corrente de soldagem. Mediu-se o aumento da largura do cordão com a intensificação do campo magnético externo e, a partir, de 0,018T de campo magnético é possível notar o deslocamento do metal de base para a extremidade do cordão.

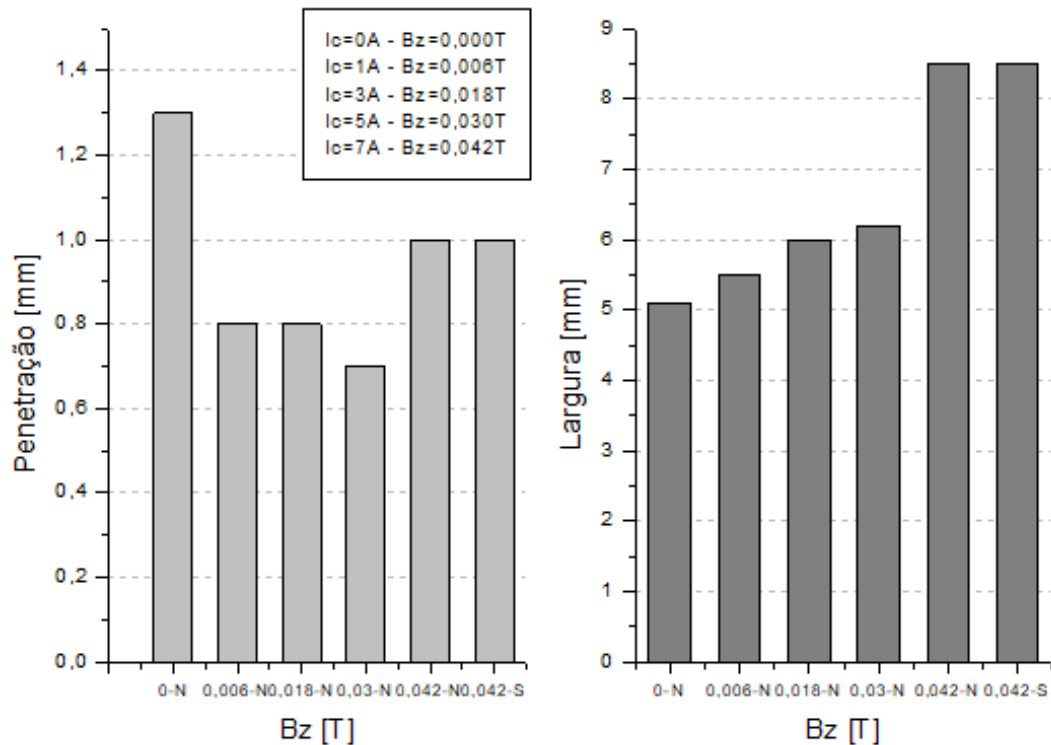
Figura 28 - Macrografia da seção transversal dos cordões de solda para 100A de corrente de soldagem.



Fonte: A autora (2019).

Conforme pode ser visto, na Figura 28, percebe-se o aumento da largura e diminuição da penetração ao intensificar o campo magnético externo longitudinal aplicado. Assim como o deslocamento do material para a extremidade do cordão a partir de 0,018T de campo magnético. As dimensões finais de penetração e largura para a condição de 100A de corrente de soldagem são apresentadas na Figura 29.

Figura 29 – Gráfico da penetração e largura em função do campo magnético externo longitudinal, para o sentido NORTE e SUL do campo magnético externo e corrente de soldagem de 100A.



Fonte: A autora (2019).

Ao analisar a Figura 31, percebe-se que a penetração decaiu de 1,3mm no cordão TIG convencional, para 0,7mm ao se empregar 0,03T de campo magnético, acarretando em uma redução de 48%. Para campo magnético de 0,042T, tanto para o sentido norte quanto o sul do campo magnético externo, esperava-se a redução da penetração do cordão, porém observa-se um aumento da penetração em comparação com 0,03T de campo magnético. Esta redução ocorre devido a depressão provocada pelo campo magnético. Visto que as medidas de penetração foram realizadas com base na superfície da chapa, ocorre, então, o aumento da penetração. Este aumento pode estar associado com a existência da pressão negativa no centro do arco voltaico como relatado por Liu *et al.* (2018) e Yin *et al.* (2012), que afirmam que este fenômeno induz um fluxo ascendente de gás nesta região chamado de fluxo anti-gravitacional. Logo, a pressão do arco age expulsando o material de base do centro e provoca o deslocamento deste material para a extremidade do arco voltaico, fazendo com que a energia de soldagem atue mais profundamente. Ainda podemos constatar que, verifica-se um aumento na largura do cordão de 17% para 0,03T de campo magnético, de 40% para 0,042T de campo magnético.

As dimensões de largura e penetração, conforme visto na Figura 29, são análogos para os dois sentidos do campo magnético de 0,042T. No entanto, o deslocamento do material de base ocorre para a direita para o sentido norte do campo magnético, como ilustrado pela Figura 30(a). Enquanto que para o sentido sul o deslocamento é verificado para a esquerda, como pode ser observado na Figura 30(b).

Figura 30 – Aspecto superficial para 7A de corrente na bobina, 100A de corrente de soldagem e campo magnético externo: (a) No sentido NORTE; (b) No sentido SUL.



Fonte: A autora (2019).

Portanto, os resultados obtidos, tanto para 50A quanto 100A de corrente de soldagem, são compatíveis com outros estudos sobre o campo magnético externo longitudinal na literatura, como Yongbing *et al.* (2002) que afirmam que há o aumento da largura da poça de fusão é devido a rotação em alta velocidade e a expansão radial do arco próxima à superfície da poça de fusão, além de assegurar a diminuição da penetração no metal de base. As mesmas características geométricas do cordão de solda com a aplicação do campo magnético externo longitudinal são confirmadas pelos estudos teóricos de Yin *et al.* (2011b) e Yin *et al.* (2012). Li *et al.* (2004) e Zhongqin *et al.* (2005) que apontam maior largura e menor penetração com o aumento da intensidade do campo magnético devido a presença da pressão negativa no centro do arco e a alta rotação do metal líquido devido a ação de uma força centrífuga que move esse metal líquido em direção as extremidades da poça de fusão. Percebe-se ainda que, a partir dos resultados encontrados pelas alterações na geometria do arco voltaico conforme visto nas Figuras 18 a 21, que o aumento da largura e diminuição da penetração ocorre devido a diminuição da contração anódica com a intensidade do campo magnético externo longitudinal.

6 CONCLUSÕES

Tendo em vista os resultados obtidos ao longo deste trabalho, conclui-se, que o objetivo de avaliar os efeitos da aplicação de um campo magnético externo longitudinal no processo TIG sob a ótica da física do arco e suas implicações na morfologia do cordão foram alcançados.

Logo, as principais conclusões resultantes da realização do presente trabalho foram:

- Quanto à concepção de uma bobina capaz de produzir um campo magnético longitudinal aplicado ao arco voltaico TIG, pode-se concluir que a mesma atendeu as necessidades do trabalho;
- No que se refere a infraestrutura para permitir a realização dos experimentos, foram concebidas complexas bancadas de ensaios que permitiram a avaliação do campo magnético externo na tensão de arco, geometria e pressão do arco voltaico de maneira eficiente, assim como para investigar as implicações deste campo magnético na morfologia do cordão de solda;
- O campo magnético externo longitudinal provoca o aumento da tensão do arco voltaico com a intensidade do campo magnético externo longitudinal;
- Foi possível constatar com os resultados obtidos que, de fato, ocorre a contração do arco voltaico próximo ao eletrodo de tungstênio sob o efeito do campo magnético externo, e quanto maior a intensidade do campo magnético produzido pela bobina, mais severamente é esta constrição;
- Constatou-se a presença da pressão negativa na região central do arco a partir de um campo magnético de 0,024T, para 100A de corrente de soldagem;
- Quanto maior a intensidade do campo magnético aplicado ao processo TIG, maior a magnitude do valor da pressão negativa no centro do arco voltaico;
- A partir de uma distância entre 2 e 2,5mm do centro do arco voltaico para um campo magnético de 0,018T para 50A de corrente de soldagem e a partir do campo magnético de 0,03T para 100A de corrente de soldagem, há uma região de pico da pressão que volta a decair até alcançar valores próximos a zero. Logo, o perfil de distribuição radial da pressão do arco voltaico torna-se um duplo pico. Portanto, percebeu-se que o comportamento se repete para as duas correntes de soldagem estudadas, sendo possível

pressupor que para outros campos magnéticos produzidos pela bobina haverá o mesmo comportamento da distribuição radial em duplo-pico da pressão do arco voltaico;

- Foi possível constatar que para 50A e 100A de corrente de soldagem há a diminuição da penetração e aumento da largura do cordão de solda com a intensidade do campo magnético.

6.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A literatura apresenta resultados sobre a aplicação do campo magnético externo longitudinal no processo de soldagem TIG, em sua maioria, teóricos. Enquanto que para este trabalho adotou-se uma abordagem experimental.

Os ensaios apontaram alterações na tensão, geometria e pressão do arco voltaico, assim como na morfologia dos cordões de solda, com a aplicação do campo magnético externo longitudinal. Vale ressaltar que essas alterações, obtidas durante os ensaios experimentais, portanto concordam com as informações expostas pela literatura.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir da realização deste trabalho e dos resultados obtidos, sugere-se como temas para trabalhos futuros:

- Realizar análise metalográfica para avaliar os efeitos metalúrgicos provindos da aplicação de um campo magnético externo longitudinal no processo de soldagem TIG;
- Avaliar os efeitos da aplicação do campo magnético externo longitudinal juntamente com a adição de material durante a soldagem TIG;
- Estudo da técnica de aplicação do campo magnético externo em uma soldagem de revestimento, uma vez que o perfil geométrico desejado nesse processo se resume a grandes larguras do cordão e baixas penetrações, perfil este que se assemelha a geometria obtida durante os ensaios de soldagem;
- Analisar os efeitos da aplicação do campo magnético na largura e penetração do cordão de solda na soldagem TIG para campos magnéticos superiores a 0,018T e 50A de corrente de soldagem.

REFERÊNCIAS

- CHANG, Y; LI, D; YANG, X. Arc shapes of TIG welding in a longitudinal magnetic field. **Transactions of the China Welding Institution**, [S.l.], v. 4, n. 14, 2010.
- CUNHA, T. **Desenvolvimento e avaliação de tecnologia para soldagem tig com pulsação ultrassônica**. 2013. 266 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.
- HALLIDAY; RESNICK. **Fundamentos da Física: Eletromagnetismo**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012. 3 v.
- JIAN, L. et al. Anti-gravity gradient unique arc behavior in the longitudinal electric magnetic field hybrid tungsten inert gas arc welding. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 84, n. 1-4, p. 661-647, 2016.
- JIANRONG, Y. et al. Contracted effect of bell-shade welding arc and accompanied magnetic field with spiral pipe shape. **Transactions of nonferrous metals society of china**, [s.l.], v.7, n.2, p.95-98, 1997.
- LARQUER, T; SOUZA, D; REIS, R. Soldagem TIG com Oscilação Magnética Sincronizada. **Soldagem & Inspeção**, [S.l.], v. 21, n. 3, p.363-378, 2016. <http://dx.doi.org/10.1590/0104-9224/si2103.11>.
- LI, Y.B. et al. The effect of a longitudinal magnetic field on fluid flow and heat transfer of moving GTA weld pool with experimental and FE methods. **Transactions on the Built Environment**. China: v. 71, p. 319-328, 2004.
- LIU, Z. J. et al. Effect of longitudinal magnetic field on arc profile of TIG welding. **Journal of Shenyang University of Technology**, [s.l.], v. 37, n. 1, p. 34-38, 2015.
- LIU, Z; LI, Y; SU, Y. Simulation and analysis of heat transfer and fluid flow characteristics of arc plasma in longitudinal magnetic field-tungsten inert gas hybrid welding. **The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology**, [s.l.], v. 98, n. 5-8, p.2015-2030, 2018. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-018-2320-3>.
- LUO, J. et al. A new approach for fluid flow model in gas tungsten arc weld pool using longitudinal electromagnetic control. **Welding Journal**, [s.l.], v. 82, n. 8, p. 202-206, 2003.
- NATIONAL ELECTRICAL CODE. **Article 310: Conductors for general wiring**. Estados Unidos, p. 60, 2017.
- VOIGT, A; CUNHA, T; DÍAZ, V. Metodologia de Baixo Custo para Registro de Imagens do Arco Voltaico de Soldagem. **Soldagem & Inspeção**, [s.l.], v. 22, n. 4, p.346-356, 18 dez. 2017. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0104-9224/si2204.02>.

SANTOS, A. **Transformador de potência para aplicações de elevada frequência.** Tese (Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores) – Universidade de Coimbra. Coimbra, p. 111. 2013.

SUN, J; YIN, X; ZHANG, J. Arc Temperature Distribution of Gas Tungsten Arc Welding in External Longitudinal Magnetic Field. **Journal of Xi'an Jiaotong University**, [S.l.], v. 47, n. 3, 2013.

YIN, X. et al. Numerical analysis of GTAW arc behaviors in external axial magnetic field. **Transactions of JWRI**, [S.l.], v. WSE2011, p. 13-16, 2011a.

YIN, X. et al. Numerical simulation of arc and weld pool for gtaw in external axial magnetic fields. **Transactions of JWRI**, [S.l.], v. WSE2011, p. 17-20, 2011b.

YIN, X. et al. Numerical study of arc plasmas and weld pools for GTAW with applied axial magnetic fields. **Journal of Physics D: Applied Physics**, [S.l.], v. 45, n. 28, 2012.

YONGBING, L. et al. Study on moving GTA weld pool in an externally applied longitudinal magnetic field with experimental and finite element methods. **Modelling And Simulation In Materials Science And Engineering**, [S.l.], v. 10, n. 6, p.781-798, 2002. <http://dx.doi.org/10.1088/0965-0393/10/6/311>.

ZHONGQIN, L. et al. Numerical analysis of a moving gas tungsten arc weld pool with an external longitudinal magnetic field applied. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [S.l.], v. 27, n. 3-4, p. 288-295, 2005. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-004-2194-4>.