

HÉLIO CARDOSO MARTIM

MONITORAMENTO DO RISCO OCUPACIONAL DE
CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS PARA O
SOLDADOR EM PROCESSOS DE SOLDAGEM A
ARCO E RESISTÊNCIA ELÉTRICA



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
2021

HÉLIO CARDOSO MARTIM

**MONITORAMENTO DO RISCO OCUPACIONAL DE CAMPOS
ELETROMAGNÉTICOS PARA O SOLDADOR EM PROCESSOS DE
SOLDAGEM A ARCO E RESISTÊNCIA ELÉTRICA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA**.

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Louriel Oliveira Vilarinho

UBERLÂNDIA - MG

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

M378m Martim, Hélio Cardoso, 1990-
2021 Monitoramento do risco ocupacional de campos eletromagnéticos
para o soldador em processos de soldagem a arco e resistência elétrica
[recurso eletrônico] / Hélio Cardoso Martim. - 2021.

Orientador: Louriel Oliveira Vilarinho.
Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.
Modo de acesso: Internet.
Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.te.2021.5522>
Inclui bibliografia.
Inclui ilustrações.

1. Engenharia mecânica. I. Vilarinho, Louriel Oliveira, 1995-,
(Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

CDU:621

Glória Aparecida Bibliotecária -
CRB-6/2047



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
Av. João Naves de Ávila, nº 2121, Bloco 1M, Sala 212 - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902
Telefone: (34) 3239-4282 - www.posgrad.mecanica.ufu.br - secposmec@mecanica.ufu.br



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Mecânica				
Defesa de:	Tese de Doutorado, nº 307, COPEM				
Data:	30/10/2020	Hora de início:	08:15	Hora de encerramento:	11:27
Matrícula do Discente:	11623EMC005				
Nome do Discente:	Helio Cardoso Martim				
Título do Trabalho:	Monitoramento do Risco Ocupacional de Campos Eletromagnéticos para o Soldador em Processos de Soldagem a Arco e Resistência Elétrica				
Área de concentração:	Materiais e Processos de Fabricação				
Linha de pesquisa:	Processos de Fabricação (Usinagem e Soldagem)				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Desenvolvimento de Tecnologias de União 4.0 com Inovação, Gestão e Inclusão Social (CNPq Nº 308201/2018-3)				

Reuniu-se por meio de videoconferência a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, assim composta: Professores Doutores: Rosemar Batista da Silva - FEMEC/UFU; Valtair Antonio Ferraresi - FEMEC/UFU; Alexandre Queiroz Bracarense - UFMG; Sadek Crisostomo Absi Alfaro - UnB; e Louriel Oliveira Vilarinho - FEMEC/UFU, orientador do candidato. Ressalta-se que os Prof. Rosemar Batista da Silva,

Valtair Antonio Ferraresi, Louriel Oliveira Vilarinho e o Discente participaram da defesa por meio de videoconferência desde a cidade de Uberlândia/MG; Alexandre Queiroz Bracarense desde a cidade de Belo Horizonte/MG; e Sadek Crisostomo Absi Alfaro desde a cidade de Ampthill (Reino Unido), em atendimento a Portaria nº 36, de 19 de março de 2020, da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES.

Iniciando os trabalhos, o presidente da mesa, Dr. Louriel Oliveira Vilarinho, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(as) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Alexandre Queiroz Bracarense, Usuário Externo**, em 30/10/2020, às 11:35, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).

Documento assinado eletronicamente por **Sadek Crisostomo Absi Alfaro, Usuário Externo**, em 30/10/2020, às 11:39, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



[de 2015.](#)



Documento assinado eletronicamente por **Rosemar Batista da Silva, Professor(a) do Magistério Superior**, em 30/10/2020, às 11:40, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Valtair Antonio Ferraresi, Professor(a) do Magistério Superior**, em 31/10/2020, às 08:32, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Louriel Oliveira Vilarinho, Professor(a) do Magistério Superior**, em 01/11/2020, às 21:53, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **2355330** e o código CRC **24E57DFF**.

A Deus.

À minha querida avó, sempre.

Aos meus pais Maria Dione e José Martim.

Aos meus irmãos.

À minha madrinha Vanda Brasileiro e a professora Valdenice Brasileiro.

Aos demais familiares e amigos.

AGRADECIMENTOS

A Deus pelo dom da vida e por me colocar sempre em bons lugares e me cercar de pessoas queridas.

Ao meu orientador Prof. Louriel Oliveira Vilarinho pela paciência, incentivo e pelos momentos de aprendizado, que tanto contribuíram para meu crescimento pessoal e profissional.

A todos os professores, colaboradores e colegas do grupo Laprosolda que contribuíram para a realização deste trabalho.

À Universidade Federal de Uberlândia e à Faculdade de Engenharia Mecânica pela oportunidade de realizar este curso.

À minha família e a todos os meus verdadeiros amigos, pelo apoio incondicional e pela presença constante em minha vida.

À Capes, ao CNPq e Fapemig pelo apoio financeiro.

MARTIM, H. C. **Monitoramento do risco ocupacional de campos eletromagnéticos para o soldador em processos de soldagem a arco e resistência elétrica.** 2021. 145f. Tese, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia/MG, Brasil.

RESUMO

Os processos de soldagem a arco e por resistência a ponto são amplamente utilizados na indústria metal-mecânica. Nestes processos são empregados altos níveis de corrente que variam de dezenas a milhares de amperes e que geram campos eletromagnéticos, cujos efeitos à saúde humana são investigados pela comunidade científica. Nesse sentido, órgãos ligados à saúde ocupacional formularam diretrizes que limitam a exposição do trabalhador a tais campos. Estudos mostram que em função dos diferentes parâmetros operacionais comumente utilizados nos processos de soldagem, estes limites podem ser ultrapassados em alguns casos. Nesse contexto, o objetivo deste trabalho consiste na realização de soldagens utilizando processos a arco elétrico (processos Eletrodo Revestido, TIG e MIG/MAG) e processo RSW (soldagem a ponto por resistência) de forma a avaliar a influência das variáveis operatórias comuns a esses processos na intensidade de campo eletromagnético, tanto por via experimental, quanto por meio de simulação computacional, utilizando-se o Método de Elementos Finitos. Os resultados obtidos são posteriormente comparados com os limites estabelecidos pela diretiva apropriada da International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP). Ambas as metodologias mostraram que o campo eletromagnético é maior quanto maior for a corrente de soldagem e menor a altura do arco. O revestimento do eletrodo e o emprego de diferentes metais de base podem influenciar na geração de campo eletromagnético por modificarem a permeabilidade magnética relativa do meio. Os gases de proteção possuem permeabilidades magnéticas relativas próximas a do ar, mas são capazes de interferir na intensidade de campo eletromagnético por modificarem a geometria do arco em função das diferenças de condutividade térmica. Por fim, em soldagens manuais, a mão do soldador é o ponto onde se registra os maiores valores de campo magnético. Nas demais regiões do corpo, a distribuição de campo magnético é heterogênea e depende da posição do soldador que varia a depender do processo de soldagem. Dentro do envelope operacional estabelecido nesse estudo, os limites de referência da ICNIRP são ultrapassados na soldagem por resistência a ponto na versão corrente alternada.

Palavras-Chave: Processos de soldagem; Saúde ocupacional; Limites de Exposição; Sonda Magnética.

MARTIM, H. C. **Monitoring the occupational risk of electromagnetic fields for the welder in arc welding and electrical resistance processes.** 2021. 145p. PhD Thesis, Federal University of Uberlandia, Uberlandia/MG, Brazil.

ABSTRACT

Arc and resistance spot welding processes are widely used in the metalworking industry in a wide range of applications. In these processes, high levels of current varying from tens to thousands of amps are used and generate electromagnetic fields, whose harmful effects on human health are still under investigation by the scientific community. Thus, bureaus linked to occupational health have formulated guidelines that limit the exposure of workers to such fields. Moreover, studies show that, due to the different operational parameters commonly used in welding processes, these reference limits may be exceeded in some cases. therefore, the objective of this work is to carry out weldments by using arc-electric processes (Covered/Stick Electrode, TIG and MIG / MAG processes) and RSW process (Resistance Spot Welding) in order to evaluate the influence of the operational variables common to these processes on the intensity of electromagnetic field, both experimentally and through computer simulation, by using the Finite Element Method. The results obtained are then compared with the limits established by the appropriate ICNIRP directive. Both methodologies showed that the electromagnetic field is larger the greater the welding current and the lower the arc height. The electrode coating and the use of different base metals can influence the generation of the electromagnetic field by modifying the relative magnetic permeability of the medium. The shielding gases have relative magnetic permeability close to that of air, but are capable of interfering in the intensity of the electromagnetic field by modifying the arc geometry due to differences in thermal conductivity. Finally, in manual welding, the welder's hand is the point where the highest magnetic field values are recorded. In other regions of the body, the distribution of the magnetic field is heterogeneous and depends on the position of the welder, which varies depending on the welding process. Within the operational envelope established in this study, the ICNIRP reference limits are exceeded in spot resistance welding in the alternate current version.

Keywords: Welding processes; Occupational health; Exposure Limits; Magnetic Probe.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Imagem de um maçarico do processo de oxicorte (processo afim) retirada da Cartilha Brasil Maior do Governo Federal (2011)	Erro! Indicador não definido.
Figura 2.1 - Densidade do fluxo magnético: Níveis de referência para exposição ocupacional pelas diretrizes ICNIRP 1998 (linha cheia) e 2010 (linha tracejada). (Grassi et al. 2012 - Modificado).....	31
Figura 2.2 - simulação da distribuição do campo eletromagnético em um corte do soldador segurando o cabo e a tocha de soldagem (Corrente de 100 A) (Mair, 2005 - Modificado) ...	35
Figura 2.3 - Distribuição do campo eletromagnético medido no local de trabalho (Corrente em curto-circuito de 100A e altura do plano horizontal de 125 cm) (Mair, 2005 - Modificado)....	35
Figura 2.4 - Configuração para medição de campo eletromagnético para soldagem a arco: posição do soldador (direita) e configuração dos pontos de medição com suporte dos cabos (esquerda) (Melton, 2005 – Modificado).....	40
Figura 2.5 - Medição de campo eletromagnético durante o dia de trabalho (Sachiko et al. 2011 - Modificado).....	41
Figura 2.6 - Níveis médios de exposição aos campos eletromagnéticos ao longo da vida (Man e Shahidan, 2007 - Modificado)	46
Figura 2.7 – Soldador a 34 cm dos eletrodos (esquerda) e a 5 cm dos eletrodos (direita) (Naddem et al. 2004)	47
Figura 2.8 – Distribuição de campo eletromagnético: soldador a 34 cm dos eletrodos (esquerda) e a 5 cm dos eletrodos (direita) (Naddem et al. 2004).....	48
Figura 2.9 – Configuração de posições da pinça de soldagem em relação ao soldador: (a) lado, (b) lado e horizontal, (c) frente e (d) frente e vertical (Canova et al. 2016)	50
Figura 2.10 – Resultado da densidade de fluxo magnético para o modelo posicionado próximo ao cabo de soldagem (Freschi et al. 2016)	50
Figura 3.1 - Configuração dos pontos de medição no trabalhador para os processos de soldagem a arco (a) e por resistência nos modos AC (b) e MFDC (c)	56
Figura 3.2 - Visão geral do medidor de campo eletromagnético TAMB-3D (Globalmag, 2015)	57
Figura 3.3 - Ajuste de zero. (Globalmag, 2015).....	58
Figura 3.4 - Fonte utilizada para soldagem Eletrodo Revestido e TIG	59
Figura 3.5 - Placa para aquisição de dados modelo NI USB-6009 (NATIONAL INSTRUMENTS, 2015).....	Erro! Indicador não definido.
Figura 3.6 - Tocha de soldagem TIG WP 18	Erro! Indicador não definido.

Figura 3.7 - Fonte de energia <i>Power Wave 450/STT</i> e alimentador de arame <i>Power Feed 10M</i> da empresa <i>Lincoln Eletric</i> , utilizada para soldagem MIG/MAG.....	66
Figura 3.8 - Tocha (TBi) utilizada nas soldagens MIG/MAG.....	Erro! Indicador não definido.
Figura 3.9 - Controlador (a) e pinça de soldagem pneumática (b) do equipamento de soldagem por corrente alternada (AC).	70
Figura 3.10 - controlador (a) e pinça de soldagem pneumática (b) do equipamento de soldagem por média frequência corrente continua (MFDC)	70
Figura 3.11 - Equipamentos usados para as medições de tensão (a) e corrente (b) nos processos de soldagem por resistência.....	71
Figura 3.12 - Menu do programa <i>magnetostatic</i> do software ANSYS® <i>Workbench</i>	74
Figura 3.13 – Evolução dos modelos computacionais: a – Modelo fio condutor; b – Modelo ambiente de soldagem; c - Modelo para soldagem a arco; d – Modelo para soldagem por resistência	77
Figura 3.14 – Avaliação gráfica da convergência do modelo de simulação computacional	Erro! Indicador não definido.
Figura 4.1 - Influência da corrente no valor de campo eletromagnético para o processo Eletrodo Revestido	88
Figura 4.2 - Influência da altura do arco no valor de campo eletromagnético para o processo Eletrodo Revestido	89
Figura 4.3 - Representação da densidade de corrente em função da altura do arco de soldagem (H1<H2).....	90
Figura 4.4 - Influência do revestimento do eletrodo no valor de campo eletromagnético para o processo eletrodo revestido.	91
Figura 4.5 - Influência do ponto de medição no valor do campo eletromagnético para o processo Eletrodo Revestido.	92
Figura 4.6 – Distribuição de campo eletromagnético para o processo Eletrodo Revestido. .	93
Figura 4.7 - Influência da corrente no valor de campo eletromagnético para a soldagem TIG	98
Figura 4.8 - Influência da DEP no valor de campo eletromagnético para a soldagem TIG ...	99
Figura 4.9 - Influência do gás de proteção no valor de campo eletromagnético no processo TIG	100
Figura 4.10 - Influência do material de base no valor de campo eletromagnético no processo TIG	101
Figura 4.11 - Influência do ponto de medição no valor de campo eletromagnético no processo TIG	102
Figura 4.12 – Distribuição de campo eletromagnético para o processo TIG	103

Figura 4.13 - Influência da velocidade de alimentação no valor de campo eletromagnético no processo MIG/MAG em modo curto-círcuito convencional	109
Figura 4.14 - Influência da velocidade de alimentação no valor de campo eletromagnético no processo MIG/MAG em modo curto-círcuito controlado	109
Figura 4.15 - Influência da velocidade de alimentação no valor de campo eletromagnético no processo MIG/MAG em modo pulsado	110
Figura 4.16 - Influência da tensão no valor de campo eletromagnético no processo MIG/MAG em modo curto-círcuito convencional	111
Figura 4.17 - Influência da tensão no valor de campo eletromagnético no processo MIG/MAG em modo goticular	111
Figura 4.18 - Influência do gás de proteção no valor de campo eletromagnético no processo MIG/MAG em modo curto-círcuito convencional	113
Figura 4.19 - Influência do ponto de medição no valor de campo eletromagnético no processo MIG/MAG em modo curto-círcuito convencional	114
Figura 4.20 - Influência do ponto de medição no valor de campo eletromagnético no processo MIG/MAG em modo curto-círcuito controlado	115
Figura 4.21 - Influência do ponto de medição no valor de campo eletromagnético no processo MIG/MAG em modo pulsado.....	116
Figura 4.22 - Influência do ponto de medição no valor de campo eletromagnético no processo MIG/MAG em modo goticular.....	116
Figura 4.23 – Comparativo dos modos de transferência metálica do processo MIG/MAG quanto a intensidade de campo eletromagnético	117
Figura 4.24 – Distribuição de campo eletromagnético para o processo MIG/MAG	118
Figura 4.25 - Influência da versão do processo no valor de campo eletromagnético no processo de soldagem por resistência.....	121
Figura 4.26 - Influência da corrente no valor de campo eletromagnético no processo de soldagem por resistência	122
Figura 4.27 - Influência do revestimento do material no valor de campo eletromagnético no processo de soldagem por resistência	123
Figura 4.28 - Influência do ponto de medição no valor de campo eletromagnético no processo de soldagem por resistência	124
Figura 4.29 - Distribuição do campo eletromagnético no processo de soldagem por resistência	125
Figura 4.30 – Intensidade de campo eletromagnético nos processos de soldagem	126

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1- Principais riscos físicos do processo de soldagem e suas consequências (Lucena Neto, 2007 - Modificado).....	22
Tabela 2.2- Efeitos adversos dos campos eletromagnéticos (ICNIRP, 2002 - Modificado) ..	28
Tabela 2.3- Limites de exposição ocupacional para campos eletromagnéticos estáticos (ICNIRP, 1994 - Modificado)	29
Tabela 2.4 - Limites de exposição ocupacional para campos eletromagnéticos estáticos (ICNIRP, 2009 - Modificado)	29
Tabela 2.5 - Limites de exposição ocupacional para campos eletromagnéticos variantes no tempo (ICNIRP, 1998 - Modificado)	30
Tabela 2.6 - Limites de exposição ocupacional para campos eletromagnéticos variantes no tempo (ICNIRP, 2010 - Modificado)	30
Tabela 2.7 - Fontes de campo eletromagnético no local de trabalho (Sachiko et al. 2011 - Modificado).....	42
Tabela 3.1 - Variáveis analisadas nos processos de soldagem.	54
Tabela 3.2 - Composição química e propriedades mecânicas nominais do aço ABNT 1020 (Danelon et al. 2020)	60
Tabela 3.3 - Composição química e propriedades mecânicas nominais dos eletrodos revestidos (Fortes e Vaz 2005)	60
Tabela 3.4- Planejamento experimental para a soldagem Eletrodo Revestido	61
Tabela 3.5 - Composição química e propriedades mecânicas nominais do aço inoxidável austenítico AISI 304 (Melo et al. 2007)	62
Tabela 3.6 - Composição química e propriedades mecânicas nominais do alumínio AA5052 (Capelari e Mazzaferro, 2009)	63
Tabela 3.7 - Planejamento experimental para a soldagem GTAW	64
Tabela 3.8 - Composição química e propriedades mecânicas do arame-eletrodo AWS ER70S-6 (Pereira e Gonçalves, 2017)	67
Tabela 3.9 - Planejamento experimental para a soldagem GMAW curto-círcuito convencional.	67
Tabela 3.10 - Planejamento experimental para a soldagem GMAW curto-círcuito controlado.	68
Tabela 3.11 - Planejamento experimental para a soldagem GMAW goticular.....	68
Tabela 3.12 - Planejamento experimental para a soldagem GMAW pulsado.....	69

Tabela 3.13 - Composição química e propriedades nominais do aço Dual-Phase 600 (Ramazani et al. 2016; Silveira, 2015)	71
Tabela 3.14 - Planejamento experimental para a soldagem por resistência a ponto.	72
Tabela 3.15 – Estimativa da permeabilidade magnética da alma e do revestimento de eletrodos.....	79
Tabela 3.16 - Permeabilidade magnética e condutividade térmica dos gases de proteção..	79
Tabela 4.1- Dados estatísticos das malhas aplicadas ao refinamento do modelo computacional	83
Tabela 4.2- Codificações dos parâmetros experimentais para soldagem SMAW.....	85
Tabela 4.3 - Medidas de sinais elétricos para a soldagem SMAW	85
Tabela 4.4 - Níveis de significância para análise dos resultados do processo SMAW	87
Tabela 4.5 – Medidas de campo eletromagnético para a soldagem SMAW.....	87
Tabela 4.6 - Codificações dos parâmetros experimentais para soldagem GTAW	94
Tabela 4.7 - Medidas de sinais elétricos para a soldagem GTAW	95
Tabela 4.8 – Níveis de significância para análise dos resultados do Processo GTAW.....	96
Tabela 4.9 – Medidas de campo eletromagnético para a soldagem GTAW	97
Tabela 4.10 - Codificações dos parâmetros experimentais para soldagem GMAW	104
Tabela 4.11 - Medidas de sinais elétricos para a soldagem GMAW.....	105
Tabela 4.12 – Níveis de significância para análise dos resultados do Processo GMAW	107
Tabela 4.13 – Medidas de campo eletromagnético para a soldagem MIG/MAG	108
Tabela 4.14 - Codificações dos parâmetros experimentais para soldagem RSW	119
Tabela 4.15 - Medidas de sinais elétricos para a soldagem RSW.....	119
A análise de variância realizada para um nível de significância de 95% revela um modelo estatisticamente significativo quanto aos resultados da tensão (Tab. 4.16). Tendo em vista a correta execução dos ensaios, é possível dar segmento com a investigação de campos eletromagnéticos por via experimental e computacional, cujo procedimento inicial também refere-se a análise de variância dos resultados, seguindo o mesmo padrão estatístico adotado nesse trabalho.	119
Tabela 4.16 – Níveis de significância para análise dos resultados da soldagem RSW	120
Tabela 4.17 – Medidas de campo eletromagnético para a soldagem RSW	120
Tabela A1 – Procedimento de avaliação das leituras de campo eletromagnético	148

LISTA DE SÍMBOLOS

3D	Tridimensional
°C	Graus Celsius
A	Ámpere
B	Densidade do fluxo magnético
eV	Elétron - volt
f	Frequência
g	Gramas
G	Densidade de fluxo magnético medido em Gauss
H	Intensidade do campo magnético
Hz	Hertz
I	Corrente de soldagem
J	Joules
L	Comprimento do arco
L.E.	Tensão Limite de Escoamento
L.R.	Tensão Limite de Resistência
m	Metro
mm	Milímetro ($1m = 1000mm$)
máx.	Máximo
mT	Militesla ($1mT = 0,001T$)
n	Número
N	Niltons
p	Nível de significância
Pa	Pascal
r	Distancia radial do centro do arco até a extremidade do campo magnético.
T	Densidade de fluxo magnético medido em Tesla ($1T = 10000 G$)
θ	Ângulo formado entre o arco e peça
μ	Permeabilidade magnética
V	Volts

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRICEM	Associação Brasileira de Compatibilidade Eletromagnética
AC	<i>Alternating Current</i>
ACGIH	<i>American Conference of Governmental Industrial Hygienists</i>
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANOVA	Análise de variância
AWS	<i>American Welding Society</i>
CAAE	Certificado de Apresentação e Apreciação Ética
CC	Corrente Contínua
CEP	Comitê de Ética em Pesquisa
CONEP	Comissão Nacional de Ética em Pesquisa
CNS	Conselho Nacional de Saúde
DC	<i>Direct Current</i>
DNA	Ácido desoxirribonucleico
ELF	<i>Extremely Low Frequency</i>
EMF	<i>Eletromagnetic Fields</i>
GMAW	<i>Gas Metal Arc Welding</i>
GTAW	<i>Gas-Shielded Tungsten Arc Welding</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICNIRP	<i>International Commissionon Non-Ionizing Radiation Protection</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
MFDC	Média Frequência Corrente Contínua
MIG/MAG	<i>Metal Inert Gas / Metal Active Gas</i>
MMA	Processos de Soldagem Manual
NIOSH	<i>National Institute for Occupational Safety and Health</i>
NR	Norma Regulamentadora
NRPB	Conselho Nacional de Proteção Radiológica
OMS	Organização Mundial de Saúde
OSHA	<i>Occupational Safety and Health Administration</i>
rms	<i>Root mean square</i>
RSW	Soldagem por Resistência a Ponto
SMAW	<i>Shielded Metal Arc Welding</i>

STT	<i>Surface Tension Transfer</i>
TIG	<i>Tungsten Inert Gas</i>
WHO	<i>World Health Organization</i>

SUMÁRIO

CAPÍTULO I.....	18
INTRODUÇÃO.....	18
CAPÍTULO II.....	21
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	21
2.1. Introdução	21
2.2. Evidências científicas dos efeitos do campo eletromagnético sobre o corpo humano	23
2.3. Limites de exposição a campos eletromagnéticos	26
2.4. Fatores de influência na geração de campo eletromagnético nos processos de soldagem	33
2.5. Processos de soldagem a arco	36
2.6. Avaliação de campos eletromagnéticos em processos de soldagem a arco.....	38
2.7. Processos de soldagem por resistência a ponto.....	43
2.8. Avaliação de campos eletromagnéticos em processos de soldagem por resistência a ponto	44
2.9 Avaliação computacional dos campos eletromagnéticos emitidos nos processos de soldagem	47
2.10. Aspectos éticos e legais da pesquisa	51
CAPÍTULO III.....	53
METODOLOGIA.....	53
3.1. Medição de campo eletromagnético	55
3.2. Medição de campo eletromagnético para a soldagem SMAW	58
3.2.1. Fonte de soldagem para o processo Eletrodo Revestido	58
3.2.2. Sistema de aquisição.....	59
3.2.3. Material de base	60
3.2.4. Eletrodos Consumíveis	60
3.2.5. Planejamento experimental	61
3.3. Medição de campo eletromagnético para a soldagem GTAW	62
3.3.1. Material de base	62
3.3.2. Eletrodos não consumíveis	63
3.3.3. Gás de proteção	63
3.3.4. Planejamento experimental	63
3.4. Medição de campo eletromagnético para soldagem GMAW	64
3.4.1. Fonte de soldagem e sistema de alimentação para o processo GMAW	65
3.4.2. Tocha para soldagem GMAW.....	66
3.4.3. Material de base	66
3.4.4. Gás de proteção	66
3.4.5. Metal de adição	66
3.4.6. Planejamento Experimental	67
3.5. Medição de campo eletromagnético para soldagem RSW	69
3.5.1. Equipamentos.....	69
3.5.2. Medição de sinais elétricos	70
3.5.3. Materiais utilizados	71
3.5.4. Planejamento experimental	72
3.6. Avaliação de campos eletromagnéticos por simulação computacional	72
3.6.1. Construção do modelo computacional	72
3.6.2. Modelo magnetostatic.....	73
3.6.3. Estimativa de propriedades magnéticas	77
3.6.4. Convergência do modelo	80

CAPÍTULO IV	82
RESULTADOS E DISCUSSÃO	82
4.1. Convergência do modelo computacional	82
4.2. Avaliação de campos eletromagnéticos para o processo SMAW	84
4.3. Avaliação de campos eletromagnéticos para o processo GTAW	94
4.4. Avaliação de campos eletromagnéticos para o processo GMAW	103
4.5. Avaliação de campos eletromagnéticos para o processo de soldagem RSW	118
4.6. Considerações finais sobre a avaliação de campos magnéticos nos processos de soldagem	125
CAPÍTULO V	129
CONCLUSÃO	129
CAPÍTULO VI	132
TRABALHOS FUTUROS	132
CAPÍTULO VII	133
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	133
ANEXO A	147
SISTEMA DE EQUAÇÕES DO <i>MAGNETOSTATIC</i>	147
ANEXO B	148
LEITURAS DE CAMPO ELETROMAGNÉTICO	148

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

Os processos de soldagem ocupam posição de destaque na indústria de fabricação mecânica como o método mais empregado na união de metais, podendo ainda ser utilizado para o corte e recuperação de peças desgastadas. Em função da vasta gama de aplicações e do uso de tecnologias avançadas, o controle operacional da atividade vem se tornando cada vez mais complexo e, quanto não realizado de forma adequada, pode ocasionar impactos negativos ao cordão de solda, ao meio ambiente e representar um risco potencial à saúde do trabalhador (Silva et al. 2019).

Os riscos ao soldador estão associados aos agentes físicos, químicos e ergonômicos oriundos dos processos de soldagem (Barros e Morais, 2017). Dentre os riscos físicos, a exposição à radiação não ionizante representada pela emissão de campos eletromagnéticos é ainda pouco discutida na comunidade científica e depende, dentre outros fatores, dos níveis de corrente empregados nos diferentes processos. Tais níveis, são cada vez mais elevados, sobretudo em processos mecanizados, robotizados e automatizados, que despontam na indústria metal-mecânica, em função da crescente necessidade de aumentar a produtividade e assegurar a competitividade no ambiente industrial (Shimizu et al. 2006).

O valor da corrente de soldagem varia desde valores inferiores a 1 A, no caso da soldagem micro plasma, podendo ultrapassar valores da ordem de 10000 A em processos de soldagem por resistência (Wolff et al. 2010), o que representa uma geração mais intensa de campos eletromagnéticos (Ali, 2012), cujos efeitos nocivos aos organismos incluem, dentre outros que serão tratados com maior profundidade no capítulo II, aborrecimento, audição de micro-ondas e perturbações ao sistema nervoso central e periférico (ICNIRP, 2002).

Em virtude dos prejuízos causados à saúde humana, entidades relacionadas ao estudo e a criação de medidas de proteção ao trabalhador têm se dedicado à investigação da emissão de campos eletromagnéticos e seus possíveis efeitos à saúde ocupacional no sentido

de estabelecer limites de exposição que garantam a segurança dessas atividades. Essas entidades, em grande parte europeias, estabelecem esses limites embasados em documentos elaborados pela *International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection* (ICNIRP) em função da credibilidade no âmbito internacional no tratamento dos assuntos relativos à exposição do trabalhador aos campos eletromagnéticos.

No caso específico dos processos de soldagem, as normas de qualidade (ISO 3834, 2005), relatam que se trata de uma atividade industrial complexa que requer adequado monitoramento durante todas as etapas de produção. Uma vez que grande parte dos acidentes de trabalho e dos prejuízos à saúde do trabalhador são reflexos da ausência de informação a respeito dos riscos ocupacionais inerentes à atividade que executam, é de fundamental importância o estudo da emissão de campos eletromagnéticos durante a soldagem (Silva et al. 2014).

Sendo assim, esta tese tem como objetivo geral avaliar os campos eletromagnéticos emitidos pelos processos de soldagem a arco Eletrodo Revestido - SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*), TIG - GTAW (*Tungsten Inert Gas*), MIG/MAG - GMAW (*Metal Inert Gas/Metal Active Gas*) e soldagem por resistência - RSW (*Resistance Spot Welding*), realizados majoritariamente de forma manual, entender a relação das variáveis envolvidas nesses processos com a intensidade de campo eletromagnético produzido e correlacioná-los com os limites de exposição estabelecidos pela Comissão Internacional de Proteção Contra Radiação Não-Ionizante (ICNIRP), de modo a propor mecanismos de proteção quanto ao ajuste de variáveis operatórias, visto que ainda não há nenhuma medida de blindagem ou proteção para soldadores expostos a campos eletromagnéticos.

Para tanto os objetivos específicos incluem a medição dos campos eletromagnéticos em condições experimentais que reproduzam situações habituais da execução desses processos no ambiente industrial, levando em consideração as variações dos parâmetros comuns aos processos, como níveis de corrente, tensão, materiais e consumíveis. Além disso, afim de intensificar os resultados obtidos experimentalmente, esse estudo contempla o desenvolvimento e determinação de um modelo computacional capaz de reproduzir as condições estabelecidas em laboratório, no sentido de criar metodologias que possibilitem a previsão de resultados de campos eletromagnéticos em diferentes processos de soldagem.

A introdução de ferramentas computacionais nesse estudo acrescenta os benefícios da simulação numérica, como redução do custo com aparato experimental e do tempo de análise, permitindo que novos resultados sejam obtidos com menores investimentos. Esse contexto se adequa aos novos conceitos da Indústria 4.0 no que se refere ao monitoramento adequado de processos, uma vez que a criação de novas metodologias ou ferramentas computacionais que colaborem com o rigoroso controle de qualidade fundamental aos processos de

soldagem, garantem o uso adequado dos recursos e possibilitam o aumento de produtividade (Mazzaferro, 2018).

Em função destes objetivos, considera-se que a principal meta deste estudo é ao final obter os valores pontuais para os campos eletromagnéticos emitidos por diferentes processos de soldagem em condições industriais, tanto por via experimental quanto por meio de simulação. A aproximação entre os resultados obtidos experimentalmente e numericamente permitirá a validação das metodologias aplicadas na previsão da intensidade de campo eletromagnético emitidos nos processos de soldagem, criando a possibilidade de utilização de dois mecanismos de estudos acerca do tema.

O trabalho encontra-se estruturado da seguinte forma: o capítulo I conta uma breve introdução acerca dos aspectos gerais que justificam a importância da pesquisa e esclarecem os objetivos almejados. No capítulo II, a revisão bibliográfica aprofunda os conceitos fundamentais e o estado da arte acerca da emissão de campos eletromagnéticos em processos de soldagem a arco e por resistência elétrica, solidificando a relevância do referido tema. No capítulo III é descrita a metodologia experimental e numérica utilizadas para o cumprimento dos objetivos propostos nesse trabalho. No capítulo IV são apresentados e discutidos os resultados oriundos desse estudo em consonância com a literatura técnica correspondente. Nos capítulos V e VI são relatados, respectivamente, as principais conclusões desse trabalho e os possíveis trabalhos que podem ser desenvolvidos posteriormente. Por fim, no capítulo VII são listadas as referências bibliográficas consultadas para elaboração dessa pesquisa e no apêndice, as informações auxiliares para a melhor compreensão do trabalho como um todo.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será apresentada uma revisão detalhada da literatura técnica e científica acerca dos conceitos fundamentais sobre a emissão de campos eletromagnéticos nos processos de soldagem, seus possíveis efeitos à saúde humana e o estado da arte no que diz respeito as condições de restrição quanto a exposição de trabalhadores a radiação não ionizante sob uma perspectiva nacional e internacional. Os estudos aqui relatados são oriundos das principais bases de pesquisa científica, nos quais são identificadas as principais contribuições quanto a emissão de campos eletromagnéticos em processos de soldagem a arco e por resistência avaliados por via experimental e numérica. No entanto também são identificadas as dificuldades encontradas e carência de informações mais detalhadas nos trabalhos anteriores, o que realça a importância da realização desse estudo.

2.1. Introdução

O acelerado crescimento econômico tem impulsionado o avanço tecnológico da indústria no sentido do desenvolvimento de novos métodos de fabricação a fim de garantir a melhoria dos produtos acabados e a qualidade nos processos. Diante desse cenário, a soldagem ocupa papel de destaque, não só pelo constante investimento em pesquisas relacionadas à melhoria de propriedades, mas também pela redução de custos e monitoramento dos processos (Gallego e Ventrella, 2014).

Sob esse aspecto é possível afirmar que o monitoramento dos processos de soldagem envolve, além de todas as etapas de preparação, execução e controle de qualidade da peça soldada, os aspectos relacionados com a segurança ocupacional, visto que a presença do soldador/operador é indispensável à realização do processo. Bianchi (2014) acrescenta que os processos de soldagem são atualmente considerados um dos principais meios de

fabricação em diversos segmentos da indústria, desde aqueles de baixa tecnologia (como processos manuais de soldagem a arco) até aqueles com elevado grau tecnológico e de complexidade (processos automatizados e/ou robotizados). Além disso, segundo Melton (2005), aproximadamente 1,8% da população economicamente ativa está diretamente relacionada à fabricação soldada, quantidade essa que pode ter aumentado de volume nos dias atuais. Esses trabalhadores estão expostos diariamente aos campos eletromagnéticos gerados pelos processos de soldagem, em especial, processos a arco e por resistência que demandam maiores níveis de corrente de soldagem.

Campos eletromagnéticos são exemplos de radiações não ionizantes, cuja energia não é suficiente para ionizar os átomos da matéria ou qualquer outra partícula com que interagem e possuem energia fotônica inferior a 12 eV (elétron-Volts) (Queiroz, 2011). De acordo com Spinelli et al. (2010), são comumente denominadas ondas eletromagnéticas e com frequência abaixo de 10^{17} Hz, bem como aquelas registradas nos processos de soldagem. Os riscos à saúde e integridade física do trabalhador podem depender, segundo Centurion (2003), da natureza dos campos eletromagnéticos, concentração, intensidade, suscetibilidade e tempo de exposição.

Segundo a Norma Regulamentadora NR-15, a os campos eletromagnéticos, encontram-se inseridos no grupo de riscos físicos oriundos dos processos de soldagem, cujos efeitos, de acordo com Lecena Neto (2007), estão descritos na Tab. 2.1, a qual reúne outros riscos associados aos processos de soldagem e suas respectivas consequências. O autor relata que a exposição ao campo eletromagnético pode acarretar diferentes prejuízos à saúde humana, no entanto, cabe ressaltar que muitos desses efeitos ainda se encontram em fase de investigação. Estudos recentes trazem outros efeitos nocivos à saúde humana em associação com campos eletromagnéticos.

Tabela 2.1- Principais riscos físicos do processo de soldagem e suas consequências (Lucena Neto, 2007 - Modificado)

Riscos físicos	Consequências
Ruído	Cansaço, irritação, dores de cabeça, diminuição da audição, aumento da pressão arterial, problemas do aparelho digestivo, taquicardia e perigo de infarto.
Vibrações	Cansaço, irritação, dores nos membros superiores e inferiores, dores na coluna, doenças do movimento, artrite, problemas

digestivos, lesões ósseas e lesões circulatórias.

	Taquicardia, aumento da pulsação, cansaço, irritação, internação (afecção orgânica produzida pelo calor), choque térmico, fadiga térmica, perturbações das funções digestivas e hipertensão.
Calor	
Radiações ionizantes	Alterações celulares, câncer, fadiga, problemas visuais e doenças ocupacionais.
Radiações não ionizantes	Queimaduras, lesões nos olhos, na pele e em outros órgãos e problemas pulmonares.
Pressões anormais	Hiperbarismo e hipobarismo

2.2. Evidências científicas dos efeitos do campo eletromagnético sobre o corpo humano

De acordo com Desidério (2017), desde o século passado os estudos para verificação dos efeitos dos campos magnéticos e eletromagnéticos em sistemas biológicos vêm sendo realizados. Esses estudos englobam a investigação dos efeitos da exposição a campos eletromagnéticos estáticos ou variantes no tempo sob diferentes condições de intensidade e grupos de controle afim de avaliar as possíveis adversidades à saúde humana. Para tanto, Rosen (2003) classifica a densidade de campo eletromagnético, como parâmetro inicial para investigações em pesquisas de natureza biológica. Segundo o autor, campos eletromagnéticos fracos possuem densidade menor que 1 mT, os moderados entre 1 mT a 1000 mT, os fortes de 1000 mT a 5000 mT e os ultra fortes possuem densidade superior a 5000 mT.

Saiko et al. (2006) e Bekhite et al. (2016) utilizaram metodologias distintas para avaliar, respectivamente, os efeitos da exposição a campos eletromagnéticos estáticos e variantes no tempo, ambas realizadas em fetos de camundongos. Os resultados de Saiko et al. (2006) apontaram para más formações como polidactilia, fissura abdominal, costelas fundidas, hérnia cerebral, décima terceira costela vestigial e rabo enrolado com fusão de vértebras caudais em fetos expostos a campos eletromagnéticos estáticos de 400 mT. A pesquisa de Bekhite et al.

(2016) demonstrou que exposição a campos sinusoidais de 50 Hz e 10 mT pode representar o aumento de fetos mortos e causar alterações histológicas e na diferenciação de vasos sanguíneos, demonstrando um potencial risco teratogênico da exposição a campos eletromagnéticos, por extração, em humanos, especialmente para gestantes.

Rosen (2003) descreve alguns efeitos sobre o sistema nervoso central em pesquisas realizadas em animais, registrando mudanças em eletroencefalogramas de coelhos expostos a campos eletromagnéticos de 20 mT, mudanças no potencial evocado visual de gatos observados após a exposição a campos eletromagnéticos de 120 mT e mudanças comportamentais em ratos expostos a campos de 600 mT e em macacos expostos a campos de magnitude de 4600 a 7000 mT. O autor ainda relata que nenhum efeito relacionado a capacidade de aprendizagem de animais pode ser associado a exposição persistente a campos eletromagnéticos.

No trabalho de Marcilio et al. (2009) há relatos que destacam a relação entre a exposição a campos eletromagnéticos e as doenças neurodegenerativas. Os dados apontam que o maior risco para doenças como esclerose lateral amiotrófica e mal de Alzheimer para indivíduos expostos a campos eletromagnéticos de maior intensidade, sobretudo para exposição de base ocupacional. Estudos referentes ao mal de Parkinson e depressão não reproduziram resultados consistentes para a associação com a exposição.

Quanto às doenças cardiovasculares, a suspeita de associação com a exposição a campos eletromagnéticos teve início na década de 60 a partir de relatos de trabalhadores com exposição ocupacional elevada. Estudos posteriores mostraram uma diminuição na variação da frequência cardíaca após a exposição, o que pode ser considerado um fator de risco para seres humanos (Savitz et al. 1999). Outras pesquisas mais específicas apontaram para o aumento do risco de morte por arritmias e doenças isquêmicas do coração ao considerarem um tempo de exposição superior a 20 anos (Ahlbom et al. 2004). No entanto, nenhum registro revela aumento de risco para infartos do miocárdio.

Pesquisas em seres humanos revelam que os efeitos biológicos em indivíduos expostos a campos eletromagnéticos a 60 Hz entre 0,1 e 0,5 mT são mudanças no metabolismo do cálcio e possíveis supressão na produção de melatonina. Sob campos mais intensos na ordem de 0,5 a 50 mT são observadas mudanças na latência de respostas em testes complexos de raciocínio, sensações visuais oscilatórias, excitabilidade do sistema nervoso central e efeitos irreversíveis como fibrilações cardíacas (Desidério, 2017). Esses resultados são semelhantes aos encontrados no trabalho de Ali (2012), o qual revela que a forma de interação dos campos eletromagnéticos com os processos biológicos básicos dos seres humanos, pode ocasionar alterações nas funções das células e tecidos, alterações do sistema imunológico, crescimento

acelerado de tumores, alterações no biorritmo e mudanças na atividade cerebral humana e frequência cardíaca.

Dias e Siqueira (2002), ao estudarem a interação das radiações não ionizantes com os sistemas biológicos, relataram que os efeitos dos campos eletromagnéticos não ionizantes à saúde humana podem ser agrupados em térmicos e não térmicos, sendo os efeitos térmicos mais significativos em baixas frequências (1Hz a 10 MHz). Estes efeitos surgem diretamente do aquecimento do tecido, como resultado da absorção de campo eletromagnético em um meio dissipativo. Sob circunstâncias normais os vasos sanguíneos se dilatam e o aquecimento é removido pela corrente sanguínea. Portanto, o risco principal de dano térmico se concentra nas áreas de baixa vascularização, como olhos e têmpora. No entanto, Santos (2019) alerta que, a depender da intensidade de tais campos, podem ocorrer disfunções em implantes eletrônicos (marca passo e dosadores de insulina) e a circulação de correntes em próteses metálicas, a ponto de provocar aquecimento intenso e, consequentemente, lesões internas.

Mild et al. (2009) acrescentam que o estudo dos efeitos do campo eletromagnético à saúde humana é complexo e detalhado e quando se refere a avaliação da exposição ocupacional, considera-se sempre a pior situação. Com relação a interação entre campos eletromagnéticos e o sistema nervoso, o autor explica que a excitação nervosa é ocasionada pela presença de correntes elétricas significativas no corpo, induzidas pela presença dos campos eletromagnéticos.

Em colaboração ao trabalho de Mild et al. (2009), Bednarek (2010) relata que os efeitos relacionados com a absorção da energia do campo eletromagnético ocorrem sob a forma da corrente de indução de fluxo através dos tecidos, resultando no aumento de temperatura ou queimaduras. Os resultados da exposição a longo prazo (incluindo possíveis efeitos cancerígenos) não são levados em consideração, uma vez que até a data de publicação do estudo não houve provas científicas suficientes para essas hipóteses.

Embora algumas pesquisas tenham apontado para a relação entre a exposição a campos eletromagnéticos e a proliferação de bactérias e células, o que pode representar um risco para o desenvolvimento de tumores, Desidério (2017) afirma que devido a discrepância entre os resultados de estudos dessa natureza, outros fatores podem estar envolvidos de forma dependente quanto à possibilidade de efeitos cancerígenos oriundos da exposição a campos eletromagnéticos. Habermann et al. (2010) acrescentam que a exposição a campos eletromagnéticos induz correntes fracas com energia insuficiente para danificar diretamente o DNA e desencadear processo de carcinogênese e que os estudos referentes aos efeitos da exposição a campos eletromagnéticos à saúde humana esbarram na dificuldade metodológica em quantificar esses campos.

O caráter impreciso das pesquisas referentes aos efeitos dos campos eletromagnéticos à saúde humana pode ser atribuído a não de identificação de um órgão ou mecanismo alvo dos campos eletromagnéticos e a dificuldade de replicação desses estudos. Todavia, embora não haja um parecer claro referente à interação entre um processo biofísico e a resposta biológica induzida por campos eletromagnéticos, a exposição a campos eletromagnéticos deve ser investigada, visto que os resultados obtidos por estudos epidemiológicos demonstram a possibilidade de prejuízos à saúde (Marcilio et al. 2009).

Nesse sentido, a saúde de trabalhadores expostos diariamente a campos eletromagnéticos merece ser investigada, visto que tal exposição é, segundo Marcilio et al. (2009), ainda mais complexa de ser avaliada em função das particularidades do ambiente de trabalho, como a variação da intensidade de campo eletromagnético em decorrência do local ou função que o trabalhador executa e a dificuldade de quantificar de modo preciso o tempo de exposição. Para Santos (2019), esses fatores podem afetar os efeitos dos campos eletromagnéticos nos organismos vivos.

Em estudo específico realizado com soldadores, Dasdag et al. (2002) investigaram os efeitos dos campos eletromagnéticos de baixa frequência emitidos por processos de soldagem a arco sobre os parâmetros hematológicos e imunológicos de soldadores. Para tanto, os autores analisaram um grupo de soldadores que desempenham a função de 3 a 4 horas por dia expostos a campos eletromagnéticos entre 0,10 e 0,25 mT e outro grupo controle de adultos saudáveis da mesma faixa etária e com rotinas semelhantes. Os resultados mostraram que não há diferenças clinicamente significativas entre os dois grupos analisados e, portanto, a exposição ao campo eletromagnético não altera os parâmetros hematológicos e imunológicos dos soldadores.

Aliado ao que foi exposto, Fuhr (2012) considera que o campo eletromagnético é dos principais agentes físicos presentes no ambiente de trabalho onde existe soldagem. Sendo assim, embora ainda não se registrem muitos prejuízos à saúde decorrentes da exposição a campos eletromagnéticos, grupos de pesquisas e entidades ligadas à saúde ocupacional tem se dedicado em reunir os danos à saúde devidamente comprovados por dados científicos e propor mecanismos de defesa ou de limitações quanto à exposição. Esses estudos podem ser reproduzidos para o ambiente de soldagem, no sentido de contribuir com a prevenção de possíveis doenças do trabalho e promover a perpetuação da atividade.

2.3. Limites de exposição a campos eletromagnéticos

As pesquisas referentes aos efeitos da exposição a campos eletromagnéticos à saúde humana tiveram maior intensidade nos últimos 30 anos, com foco principal na comprovação desses efeitos, sobretudo após a *International Agency for Research on Cancer* (IARC) ter incluído em 2002 os campos eletromagnéticos de baixa frequência entre os agentes denominados “possivelmente carcinogênicos”, assim como o café, vegetais enlatados e os gases de escapamento de motores à gasolina (IARC, 2002). A mesma classificação foi mantida em 2011 (IARC, 2011) e desde então outros prejuízos à saúde são investigados pela comunidade científica, despertando o interesse de entidades nacionais e internacionais para a elaboração de documentos capazes de promover a segurança em atividades que, bem como na soldagem, envolvam a emissão de campos eletromagnéticos.

Como exemplo dessas entidades, podem ser citados o *National Institute for Occupational Safety and Health* (NIOSH) - Instituto Nacional de Segurança e Saúde Ocupacional , *Occupational Safety and Health Administration* (OSHA) - Administração de Segurança e Saúde Ocupacional, *American Welding Society* (AWS) - Sociedade Americana de Soldagem, *International Commissionon Non-Ionizing Radiation Protection* (ICNIRP) - Comissão Internacional de Proteção contra Radiação Não-Ionizante, *World Health Organization* (WHO) - Organização Mundial de Saúde, *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) - Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos e a *American Conference of Governmental Industrial Hygienists* (ACGIH) - Conferência Americana de Higienistas Industriais Governamentais. Dentre essas instituições, destacam-se o IEEE por avanços tecnológicos relacionados as condições de exposição a campos elétricos e magnéticos e o ICNIRP por se ocupar com questões relativas aos efeitos adversos que podem ocorrer à saúde humana devido à exposição à radiação não-ionizante, formulando diretrizes que restringem tal exposição (Cerqueira, 2013).

Os limites de exposição correspondem, segundo Bednarek (2010), ao domínio de valores admissíveis de valor de campo eletromagnético a que as pessoas possam estar expostas sem deterioração da saúde ou bem-estar, de modo geral. Estes limites surgem da combinação entre os resultados da investigação e a avaliação de risco através da colaboração da Organização Mundial de Saúde (OMS) - *World Health Organization* (WHO).

As diretrizes propostas pelo ICNIRP são exclusivamente baseadas em dados científicos, não levando em conta quaisquer considerações econômicas ou outras questões não científicas (Cerqueira, 2013). O documento que contém os dados científicos devidamente comprovados referentes aos efeitos adversos à saúde humana (Tab. 2.2), fundamentais para o desenvolvimento das linhas de orientação, foi publicado em 2002 pela referida comissão.

Diante do que foi exposto, entende-se que a existência desses efeitos constitui um motivo lógico para o desenvolvimento das diretrizes de exposição pelo ICNIRP. Nesse

sentido, esta comissão, cujo principal objetivo é aconselhar sobre os riscos deste tipo de radiação à saúde humana, publicou em 1994 diretrivas a respeito dos limites de exposição contra campos eletromagnéticos estáticos e, em 1998, diretrivas para campos eletromagnéticos variantes até 300 GHz. Nestas diretrivas é ressaltado que os limites de exposição condizem com os níveis em que há evidências consideráveis de efeitos adversos à saúde. Além destes níveis não há evidências das consequências à saúde do trabalhador e por este motivo não devem ser ultrapassados (ICNIRP, 2009).

Tabela 2.2- Efeitos adversos dos campos eletromagnéticos (ICNIRP, 2002 - Modificado)

Parte do espectro da radiação não - ionizante	Efeito adverso
Campo eletromagnético estático	Efeitos sobre o sistema nervoso central e cardiovascular
Campo eletromagnético variante no tempo (até 10 MHz)	Estimulação de células nervosas e musculares e efeitos sobre as funções do sistema nervoso
Campo eletromagnético (100 kHz a 300 GHz)	Aborrecimento e audição de micro-ondas

Segundo essas diretrivas, para efeitos de proteção, o campo eletromagnético pode ser expresso como densidade do fluxo magnético, B , expresso em Tesla (T), ou como intensidade do campo eletromagnético, H , expresso em ampere por metro ($A \cdot m^{-1}$). As duas grandezas estão relacionadas pela Equação 2.1. Nela μ corresponde à constante de proporcionalidade (permeabilidade magnética); no vácuo e no ar, bem como em materiais não magnéticos (incluindo biológicos) e tem valor de $4\pi \times 10^{-7} H \cdot m^{-1}$ (ICNIRP, 1994). Neste trabalho o campo eletromagnético será expresso como densidade de fluxo magnético (T), assim como as diretrizes do ICNIRP para maior praticidade nas comparações posteriores.

$$B = \mu \cdot H \quad (2.1)$$

De acordo com a diretiva de 1994, a densidade de fluxo magnético a que são expostos os trabalhadores durante o dia de trabalho é em média 200 mT e não deve exceder o valor de 2000 mT para cabeça e tronco e 5000 mT especificamente para membros (Tab. 2.3). Esta diretiva, bem como as demais diretrivas do ICNIRP, traz também os limites de exposição para o público geral (ICNIRP, 1994). No entanto, estes últimos não serão mencionados, visto que

o presente estudo é centrado apenas na exposição de trabalhadores aos campos eletromagnéticos.

Tabela 2.3- Limites de exposição ocupacional para campos eletromagnéticos estáticos (ICNIRP, 1994 - Modificado)

Características da exposição	Densidade de fluxo magnético (mT)
Dia inteiro de trabalho (Tempo médio ponderado)	200
Exposição para cabeça e tronco	2000
Exposição para membros	5000

Em 2009 o ICNIRP publicou uma nova diretiva a respeito dos limites de exposição a campos eletromagnéticos estáticos que substitui aquelas encontradas na diretiva de 1994 (Tab. 2.4). Segundo a nova diretiva, o limite máximo de exposição ocupacional para os membros passa a ser 8000 mT, pois estudos baseados em modelagem de fluxo sanguíneo em vasos menores (referente aos membros) não trouxeram nenhum relato de algum efeito negativo para este novo limite de exposição. Os demais valores da diretiva de 1994 permanecem inalterados (ICNIRP, 2009).

Tabela 2.4 - Limites de exposição ocupacional para campos eletromagnéticos estáticos (ICNIRP, 2009 - Modificado)

Características da exposição	Densidade de fluxo magnético (mT)
Exposição para cabeça e tronco	2000
Exposição para membros	8000

Para os campos eletromagnéticos variáveis no tempo, a Comissão Internacional de Proteção Contra Radiação Não-Ionizante publicou em 1998 uma diretiva a respeito dos limites de exposição, na qual são contemplados os campos eletromagnéticos variantes no tempo em uma gama de frequências até 300 GHz. Os valores médios dos campos eletromagnéticos a que o trabalhador pode estar exposto são determinados, na maioria dos casos, em função da frequência (f) em Hz, a qual é incorporada no cálculo para determinação do campo eletromagnético limite, bem como mostra a Tab. 2.5. Diferentemente das diretrizes referentes a campos eletromagnéticos estáticos, na diretiva de 1998 os níveis de referência estão

relacionados a todo o corpo do indivíduo, não sendo diferenciadas as partes como cabeça, tronco ou membros (ICNIRP, 1998).

Tabela 2.5 - Limites de exposição ocupacional para campos eletromagnéticos variantes no tempo (ICNIRP, 1998 - Modificado)

Intervalo de frequências	Densidade de fluxo magnético (mT)
Até 1 Hz	$2,0 \times 10^2$
1 – 8 Hz	$2,0 \times 10^2/f^2$
8 – 25 Hz	$25/f$
0,025 – 0,82 kHz	$2,5 \times 10^{-2}/f$
0,82 – 65 kHz	$3,07 \times 10^{-2}$
0,065 – 1 MHz	$2,0 \times 10^{-3}/f$
1 – 10 MHz	$2,0 \times 10^{-3}/f$
10 – 400 MHz	$2,0 \times 10^{-2}$
400 – 2000 MHz	$(1,0 \times 10^{-5})f^{1/2}$
2 – 300 GHz	$4,5 \times 10^{-4}$

A última diretiva do ICNIRP a respeito dos limites de exposição aos campos eletromagnéticos variantes no tempo foi publicada em 2010, porém ela não substitui completamente a diretiva de 1998, pelo fato de que na diretiva mais recente são estabelecidos os limites de exposição apenas para uma gama de baixa frequências (1 Hz a 100 kHz) e por esta razão ela substitui a diretiva de 1998 somente para este intervalo. No entanto, algumas orientações da diretiva de 2010 são estendidas até a frequência de 10 MHz (Tab. 2.6), dependendo das condições de exposição. As orientações para gama de alta frequência (acima de 100 kHz) ainda estão sendo revisadas pela comissão (ICNIRP, 2010).

Tabela 2.6 - Limites de exposição ocupacional para campos eletromagnéticos variantes no tempo (ICNIRP, 2010 - Modificado)

Intervalo de frequências	Densidade de fluxo magnético (mT)
1 – 8 Hz	$2,0 \times 10^2/f^2$
8 – 25 Hz	$25/f$
25 – 300 Hz	1
300 Hz – 3 kHz	$3,0 \times 10^2/f$
3 kHz – 10 MHz	0,1

Ao comparar os níveis de referência para exposição ocupacional aos campos eletromagnéticos variantes no tempo fornecidos por ambas as diretrizes Grassi et al. (2012)

verificaram que na medida em que a faixa de frequência é aumentada os limites de referência são maiores para a diretiva de 2010, com exceção da faixa de frequência até 25 Hz, na qual os limites coincidem. As diferenças mais acentuadas ocorrem na faixa de frequência mais alta entre 1 MHz e 10 MHz, como pode ser visto na Fig. 2.1. Freschi et al. (2016) explicam que o aumento nos valores dos limites de exposição a partir do limite de 25 Hz deve-se a melhor compreensão dos efeitos dos campos eletromagnéticos em seres humanos, justificando a redução dos fatores de segurança.

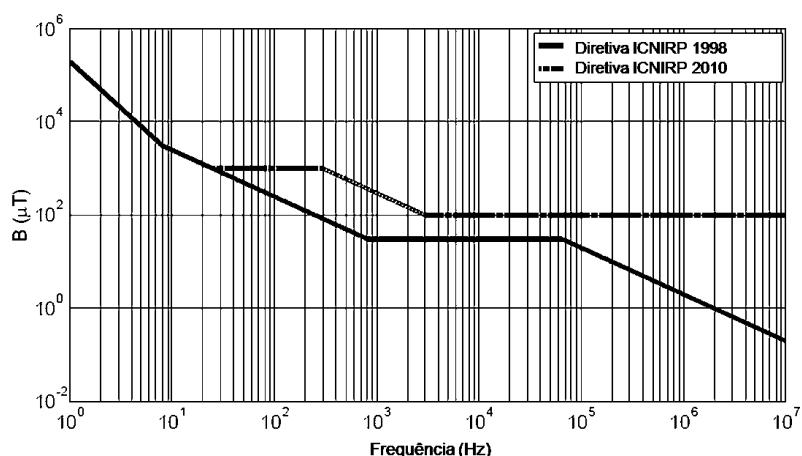


Figura 2.1 - Densidade do fluxo magnético: Níveis de referência para exposição ocupacional pelas diretrizes ICNIRP 1998 (linha cheia) e 2010 (linha tracejada). (Grassi et al. 2012 - Modificado).

Segundo Grassi et al. (2012), a legislação internacional está em constante evolução em direção a novos alinhamentos com os novos documentos produzidos pelo ICNIRP. Por exemplo, a Diretiva Europeia EC/40/2004, embasada na diretiva ICNIRP de 1998, encontrava-se em discussão para aprovação de uma versão revista que, presumivelmente, incorporaria as orientações contidas da diretiva ICNIRP de 2010, fato este de grande interesse para indústria de soldagem.

Em 26 de junho de 2013, foi aprovada a Diretiva 2013/35/UE do Parlamento Europeu e do Conselho, que revogou a Diretiva 2004/40/CE. Esta nova Diretiva introduz medidas que protegem os trabalhadores dos riscos associados aos campos eletromagnéticos (0-300 GHz), dados os seus efeitos sobre a saúde e segurança dos trabalhadores e baseia-se em orientações da ICNIRP de 1998 e 2010 relativas a campos eletromagnéticos variantes no tempo e da ICNIRP 2009, com relação aos campos eletromagnéticos estáticos.

No âmbito nacional, constitui-se em 1989 a Associação Brasileira de Compatibilidade Eletromagnética (ABRICEM), criada através de um grupo de empresas da área de

eletroeletrônica em convenio com universidades e órgãos governamentais, destinada a medição dos campos eletromagnéticos e seus desdobramentos com o objetivo de regulamentar as áreas de eletromagnetismo no país (Lipp et al. 2010). Em 1998, as recomendações da ICNIRP para frequências de 9 kHz a 300 GHz foram sugeridas pela ABRICEM à Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL), a qual incorporou as recomendações em 2002, através da provação da Resolução nº 303 (BRASIL, 2002).

Em virtude da ausência de recomendações para a faixa de baixas frequências traduzida do inglês *Extremely Low Frequency* (ELF), na faixa de 50 a 60Hz, a ABRICEM, apoiada pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), concessionárias e outras empresas do setor, liderou a realização do estudo referente aos riscos de exposição aos campos ELF, desenvolvendo o que foi considerado o maior estudo realizado sobre esse tema na América do Sul. Baseado nesse estudo, em 2009 foi elaborada a lei 11.934 de 05 de maio de 2009, sobre os limites à exposição humana a campos elétricos, magnéticos e eletromagnéticos alinhada a Resolução nº 303 (BRASIL, 2009).

Desde então, outras resoluções nacionais foram criadas com relação aos limites de exposição em operações específicas. A Resolução nº 700, de 28 de setembro de 2018 aprovou o regulamento sobre a avaliação da exposição humana a campos elétricos, magnéticos e eletromagnéticos associados à operação de estações transmissoras de radiocomunicação e revoga a Resolução nº 303 de 2002, levando em consideração as recomendações das diretrivas da ICNIRP e, por essa razão, servem de base para outras operações que também envolvam a emissão de campos eletromagnéticos, tais como os processos de soldagem.

Crotti e Giordano (2009) ressaltam a importância da avaliação da conformidade da exposição humana aos campos eletromagnéticos com os níveis de referência dados pela ICNIRP. Segundo os autores, esta comparação entre os valores de campo eletromagnético medidos e os limites de exposição da ICNIRP funciona como uma primeira investigação capaz de indicar sobre os procedimentos a serem adotados tanto na avaliação da exposição ocupacional quanto na verificação das emissões pelo dispositivo em estudo (por exemplo, fontes de soldagem).

Por fim, cabe lembrar que estas diretrivas representam restrições básicas e níveis de referência gerais, que não necessariamente indicam limites estanques que se excedidos representam danos potenciais à saúde. Em especial para a soldagem, situações podem existir onde estes limites são superados, o que demanda maior investigação por parte da comunidade científica, com destaque para os processos que utilizam altos níveis de corrente e, consequentemente, geram maiores campos eletromagnéticos (Melton, 2005). Entre os

processos de soldagem, aqueles que utilizam o arco elétrico como fonte de energia e a soldagem por resistência chamam a atenção pelo seu amplo uso industrial.

2.4. Fatores de influência na geração de campo eletromagnético nos processos de soldagem

Na soldagem, a radiação não ionizante representada pelos campos eletromagnéticos tem sua intensidade e tamanho de onda variáveis em função dos parâmetros adotados durante o processo, como por exemplo o tipo de eletrodo, material de fluxo ou revestimento (Sousa e Barra, 2012). Além dessas variáveis, Bolte e Pruppers (2006) destacam a intensidade e o tipo de corrente (AC ou DC) utilizados, a faixa de frequência, o grau de mecanização (manual, semiautomática ou automática), procedimento de trabalho (distância do soldador a máquina de soldagem, manuseio da tocha ou suporte do eletrodo e transporte dos cabos de corrente) e medidas de blindagem e proteção. O tempo em que o equipamento de soldagem está ligado não é um fator significativo para o estudo da geração de campos eletromagnéticos.

Quanto ao tipo, correntes DC geram campos estáticos, enquanto que correntes AC e pulsadas geram campos eletromagnéticos variantes no tempo. Mair (2005) acrescenta que além do formato de onda da corrente empregada no processo, efeitos dinâmicos como curtos-circuitos ou interrupções no próprio arco, como pode ocorrer na soldagem SMAW, ou até mesmo formas de onda complexas utilizadas para processos pulsados, podem ser fatores que alterem o campo eletromagnético. Neste contexto, o autor também afirma que normalmente os campos eletromagnéticos mais intensos estão relacionados com os maiores valores de frequência. Com exceção da soldagem por resistência de alta frequência, todos os processos de soldagem são comumente realizados usando uma frequência inferior a 100 kHz (Melton, 2005).

A intensidade da corrente de soldagem, de acordo com Bolte e Pruppers (2006), varia de acordo com o processo, de dezenas de ampères, para o caso da soldagem a plasma, centenas de ampères (para a maioria dos processos de soldagem a arco) até milhares de ampère na soldagem por resistência. Este fator é, segundo Melton (2005) e Ali (2012), o mais relevante na geração do campo eletromagnético, o qual é mais forte quanto maior for o valor da corrente empregada.

Este fato pode ser explicado fisicamente pelas teorias básicas do eletromagnetismo, uma vez que o arco de soldagem pode ser interpretado como um condutor fluídico-gasoso de corrente elétrica e sendo assim, sofre interação da corrente elétrica por ele transportada com

os campos elétricos por ela gerados. Sendo assim, como já foi exposto no Item 2.3, para o presente estudo, a intensidade do campo eletromagnético pode ser expressa como a densidade de campo eletromagnético (B), que de acordo com a lei de Biot-Savart, matematicamente expressa pela Equação 2.2, é diretamente proporcional a corrente de soldagem.

$$B = \frac{\mu \cdot I \cdot L \cdot \sin\theta}{4 \cdot \pi \cdot r^2} \quad (2.2)$$

Onde,

B é a densidade de campo eletromagnético,

μ é a permeabilidade magnética do meio,

I é a corrente elétrica,

L é o comprimento do fio condutor (ou comprimento do arco elétrico),

θ

r é a distância radial entre o centro do condutor (arco elétrico) e ponto de medição

De acordo com Santos e Gardelli (2017), a densidade de campo eletromagnético (B) é diretamente proporcional a corrente elétrica (I), a permeabilidade magnética do meio (μ) e ao comprimento (L) do fio condutor e inversamente proporcional ao quadrado da distância (r) formada entre o condutor o ponto de medição do campo eletromagnético. Assim, o comprimento (L) passa a representar a altura do arco e a variável (r), a distância radial entre o centro do arco elétrico o ponto de medição do campo eletromagnético.

A Equação 2.2 além de explicar a influência da corrente no campo eletromagnético, permite presumir que a densidade de campo eletromagnético pode ser alterada por fatores geométricos. Neris (2015) explica que a intensidade do campo eletromagnético varia de modo inversamente proporcional com o quadrado da distância do centro do arco a extremidade do campo eletromagnético e é por esta razão que o campo eletromagnético é maior na região do arco mais próxima ao eletrodo e menor na região mais próxima a peça, devido ao formato cônico do arco, sugerindo desse modo que arcos de menor comprimento geram campos eletromagnéticos de maior valor.

Esta teoria pode ser confirmada no trabalho de Mair (2005) ao avaliar a distância do soldador ao cabo de soldagem (Fig. 2.2) e o perfil de distribuição do campo eletromagnético em um ambiente de trabalho (Fig. 2.3). A Fig. 2.2 revela que o campo eletromagnético é mais intenso quanto mais próximo o soldador estiver do cabo ou da máquina de soldagem, enquanto que a Fig. 2.3 ilustra que a distribuição do campo eletromagnético é semelhante ao formato do arco elétrico e que o campo eletromagnético é mais intenso na região superior

onde se observa uma geometria mais constrita, semelhante a arcos de menor comprimento. Arcos mais longos podem apresentar maior distribuição das linhas de campo eletromagnético, representando em um menor valor de densidade de campo eletromagnético. Logo, de acordo com os trabalhos de Neris (2015) e Mair (2005), é possível presumir que arcos de menor comprimento, mais próximos do eletrodo, apresentem campo eletromagnético mais intenso.

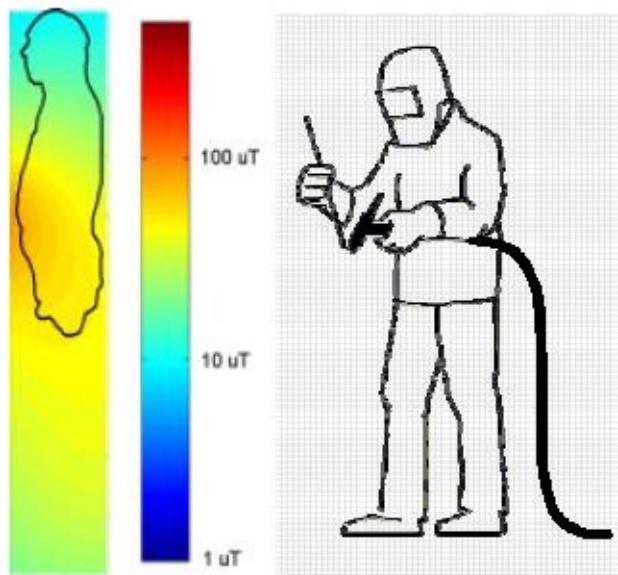


Figura 2.2 - simulação da distribuição do campo eletromagnético em um corte do soldador segurando o cabo e a tocha de soldagem (Corrente de 100 A) (Mair, 2005 - Modificado)

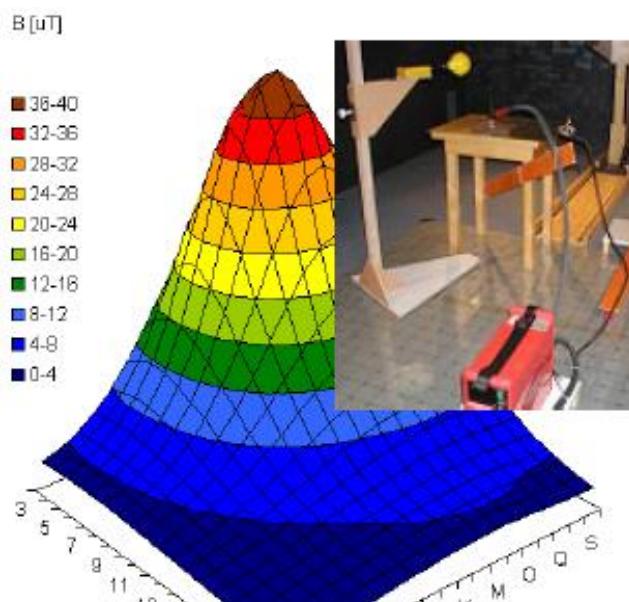


Figura 2.3 - Distribuição do campo eletromagnético medido no local de trabalho (Corrente em curto-círcuito de 100A e altura do plano horizontal de 125 cm) (Mair, 2005 - Modificado)

Assim como Mair (2005), Dasdag et al. (2002) também observaram que o valor do campo eletromagnético sobre o corpo humano é bastante heterogêneo e dependente da distância do corpo à fonte de soldagem. Quanto mais próximo estiver o soldador da máquina de soldagem, maior será a sua exposição ao campo eletromagnético.

A distância do soldador aos equipamentos e acessórios usados nos processos de soldagem está relacionada com o grau de mecanização e ao procedimento de trabalho, uma vez que normalmente se observa em processos de soldagem manuais que, para melhor segurar o porta-eletrodo (para o caso do processo SMAW) ou a tocha (para o processo GTAW ou GMAW), muitas vezes o soldador coloca os cabos de soldagem envoltos no corpo, aumentando o nível de exposição. Em soldagens mecanizadas, o nível de exposição é reduzido à medida que o operador se distancia da fonte de soldagem (Bolte e Pruppers, 2006).

As medidas de blindagem e proteção surgem da necessidade de reduzir a exposição do trabalhador ao campo eletromagnético, embora ainda não seja confirmado nenhum prejuízo potencial a saúde humana. O cumprimento destas medidas não altera o valor do campo eletromagnético gerado no processo de soldagem, mas contribui com a redução da exposição do trabalhador. Dentre essas medidas, Ciamp (2013) recomenda que o soldador não deve se posicionar entre o cabo do eletrodo e o cabo de alimentação do equipamento. Ambos devem ser mantidos tão longe quanto possível do corpo e nunca devem ser enrolados no corpo.

Bolte e Pruppers (2006) advertem que o campo eletromagnético gerado durante a soldagem pode perturbar o funcionamento de outros equipamentos, sendo um fator de risco para o caso do trabalhador que faz uso de marca-passo, por exemplo. Estes autores recomendam ainda a blindagem dos cabos e máquinas de soldagem como forma reduzir a emissão destes campos eletromagnéticos e a adoção de uma distância de segurança durante a execução do trabalho. Tal medida não é aplicável a processos de soldagem manual, visto a necessidade de manuseio de porta-eletrodos ou tochas para soldagem.

Sendo assim, é possível verificar que para melhor avaliar a exposição de soldadores aos campos eletromagnéticos gerados nos diferentes processos de soldagem a arco e por resistência, é preciso conhecê-los separadamente, de modo a obter as principais características, capazes de influenciar nesta exposição, até mesmo no sentido de elaborar medidas de segurança que sejam aplicáveis a tais processos de modo a garantir a continuidade destes sem prejuízos aos produtos soldados.

2.5. Processos de soldagem a arco

Existem diferentes processos de soldagem arco que fazem o uso de corrente alternada (AC), corrente contínua (DC) e corrente pulsada. A intensidade da corrente varia de algumas dezenas de ampères até algumas centenas de ampères. Estes processos, cujos conceitos básicos são facilmente encontrados na literatura comum, podem ser realizados manualmente ou de forma mecanizada. Dentre eles, os mais comuns são os processos SMAW, GTAW, GMAW, soldagem (e corte) a plasma e a soldagem FCAW, sendo estes últimos normalmente mecanizados (Melton, 2005).

De modo geral, os processos de soldagem SMAW, GTAW e GMAW são, dentre os processos de soldagem a arco, os mais utilizados e realizados por soldadores (Shimizu et al. 2006). O processo SMAW foi, durante a maior parte do século XX, o mais importante processo de união permanente de aços. Atualmente, mesmo existindo processos de soldagem mais produtivos, os eletrodos revestidos ainda continuam sendo empregados em grande volume na indústria de fabricação mecânica. Nesse processo, também conhecido como soldagem manual a arco elétrico, é comum o uso de fontes inversoras, especialmente para uso diário e de manutenção. A corrente de soldagem pode ser alternada ou contínua, com uma forte tendência ao uso de corrente contínua, a qual depende do diâmetro do eletrodo e varia entre 40 e 400 A (Melton, 2005).

No que se refere ao processo GTAW pode-se afirmar que, atualmente, é largamente utilizado para soldar diversos materiais na indústria com boa qualidade. A corrente, que normalmente não ultrapassa o valor de 250 A no ambiente industrial (Schwidersky et al. 2011), é escolhida em função do tipo de material e espessura da peça a ser soldada, podendo ser utilizada corrente contínua ou corrente alternada, dependendo das características do cordão de solda que se deseja obter (Silva, 2015).

Na obtenção do aumento de produtividade e resultados satisfatórios de juntas soldadas, o processo MIG/MAG desponta no cenário da fabricação mecânica, por satisfazer essa demanda em função do emprego de maiores níveis de corrente (variando entre 50 e 600 A), quando comparados com os processos de soldagem a arco como, por exemplo, soldagem SMAW (Groetelaars, 2005; Azevedo, 2019). Além disso, a facilidade de automação do processo, a possibilidade de soldar diferentes tipos de materiais e a utilização desse processo na recuperação de peças desgastadas, colaboram com a vasta aplicação dessa modalidade de soldagem na indústria (Tagibaba et al. 2012; Silva et al. 2019).

Em virtude do controle da possibilidade de controle de energia do processo, na soldagem MIG/MAG é possível, a depender dos parâmetros operacionais utilizados, obter diferentes modos de transferência metálica, classificados de acordo com *International Institute of Welding* (IIW) em curto circuito, globular, goticular, goticular projetado, goticular moderado

ou alongado e goticular rotativo, além dos não convencionais como o pulsado (GMAW-P) (Oliveira, 2013).

De modo geral, os processos de soldagem SMAW, GTAW e GMAW são, dentre os processos de soldagem a arco, os mais utilizados e realizados por soldadores, sendo o GMAW aquele que utiliza maiores níveis de corrente, chegando a 400 A em versão ainda semiautomática (Fortes, 2005). Para níveis de corrente maiores, o processo é conduzido em versão mecanizada ou mesmo automatizada (Shimizu et al. 2006).

Para execução dos referidos processos de soldagem a arco são requeridos equipamentos especialmente projetados para fornecer altos níveis de correntes (10 a 1200 A). Por este motivo desde as últimas décadas do século passado, tem ocorrido um vigoroso desenvolvimento (ou mesmo uma revolução) no projeto e construção de fontes para soldagem associados com a introdução de sistemas eletrônicos para o controle nestes equipamentos.

Nos processos a arco, diferentes fontes de soldagem podem ser utilizadas, indo desde simples transformadores às modernas inversoras (chaveadas no primário). Estas fontes são capazes de gerar correntes até ~ 1.500 A (no caso do processo FCAW) em corrente alternada (AC) ou contínua (DC), com diferentes formatos de onda (constante, pulsado, com controle de curto-circuito, etc.) em diferentes frequências (indo desde 1,0 Hz no caso da soldagem GTAW pulsado a 400 Hz para a soldagem GMAW). Destaca-se a alta frequência de chaveamento das fontes modernas (micro processadas), que pode chegar a mais de 25 kHz, o que geraria altos campos eletromagnéticos em função deste chaveamento e seus harmônicos (Rosa, 2013).

Além do que foi exposto sobre os processos de soldagem a arco, nas técnicas operatórias, o suporte do eletrodo (no caso da soldagem SMAW) ou a tocha (para o processo GTAW ou GMAW) é segurado pelo soldador e conectado a fonte pelo cabo de solda por onde passa a corrente de soldagem. Considerando a faixa de corrente e de frequência utilizadas em conjunto com a proximidade do trabalhador ao cabo de soldagem, a avaliação da exposição humana a campos eletromagnéticos nestes processos se torna indispensável, uma vez que é possível encontrar evidências de que o campo eletromagnético gerado ultrapasse as restrições básicas propostas pelo ICNIRP (Grassi et al. 2012).

2.6. Avaliação de campos eletromagnéticos em processos de soldagem a arco

De acordo com Garrido (2013), há na literatura científica poucos registros contendo informações sobre medição de campos eletromagnéticos nos processos de soldagem a arco e por resistência. Um dos primeiros trabalhos encontrados acerca deste tema foi feito por

Bowman et al. (1988), onde foram mensurados os campos eletromagnéticos gerados em frequências extremamente baixas (abaixo de 100 Hz) em oito soldadores do processo GTAW. Na soldagem GTAW AC foi registrado um campo eletromagnético na faixa de 0,0024 a 0,009 mT e 0,0004 a 0,0016 mT para o processo GTAW DC. No referido trabalho não foi apresentada nenhuma correlação dos valores de campo eletromagnético com a corrente de soldagem utilizada. Os menores valores registrados na soldagem em corrente contínua concordam com os estudos de Mair (2005) e Bolte e Pruppers (2006), visto que esses autores afirmam que os maiores valores de campo eletromagnético estão associados aos processos realizados em corrente alternada.

Stuchly e Lecuyer (1989) obtiveram resultados de medidas de campos eletromagnéticos em processos de soldagem, que posteriormente foram reproduzidos por Allen (1994) no relatório R 265 do Conselho Nacional de Proteção Radiológica (NRPB). Estes autores realizaram medições a 10 cm do corpo do soldador e encontraram campos eletromagnéticos na ordem de 0,2 mT, 0,3 mT e 0,4 mT nas proximidades da cabeça, peito e cintura dos soldadores, respectivamente. O valor do campo eletromagnético medido próximo à mão foi bastante superior, na ordem de 1 mT, devido ao fato do soldador estar segurando a tocha de soldagem ou o porta-eletrodo, de acordo com o processo observado. Outras medições feitas a 10 cm do cabo de soldagem registraram um campo eletromagnético superior a 1,256 mT, que é cerca de três vezes o nível de referência ICNIRP para uma frequência de 60Hz.

No estudo feito por Allen (1994), as medidas de campo eletromagnético oriundo do processo GTAW resultou em valores de campo eletromagnético superiores àqueles encontrados por Bowman et al. (1988). A faixa de valores registrada foi de 0,1 a 0,2 mT, próximo ao corpo do soldador, 0,1 mT perto da fonte de alimentação e 1 mT na superfície do cabo terra. O autor não relata informações acerca da polaridade, parâmetros ou técnicas operatórias do processo.

Skotte e Hjollund (1997) avaliaram a exposição de soldadores a campos eletromagnéticos oriundos de diferentes processos de soldagem durante todo o dia de trabalho, encontrado valores de 0,1 mT para o processo SMAW utilizando corrente alternada e 0,01 mT na soldagem GMAW com utilização de corrente contínua. Próximo ao corpo dos soldadores SMAW e GMAW foram encontrados, respectivamente, os valores médios de campo eletromagnético na ordem de 0,0212 mT e 0,0023 mT. Já os valores encontrados próximo ao cabo terra na soldagem GMAW foram na faixa de 0,9 a 1,9 mT. Neste trabalho também não é revelada as condições operacionais dos processos estudados.

Melton (2005) também mediou os campos eletromagnéticos gerados nos processos SMAW e GMAW utilizando um magnetômetro Hall acoplado a um sensor em pontos de medição localizado no corpo do soldador na configuração mostrada na Fig. 2.4. No estudo do

processo SMAW, as medições feitas no corpo do soldador, utilizando uma fonte AC convencional e corrente de 200 A, mostraram que o campo eletromagnético é predominante em 50 Hz (frequência da rede elétrica) e as medições realizadas na cabeça, pescoço, tronco e cintura do soldador não ultrapassam o valor limite de 0,5 mT para esta faixa de frequência. O maior valor de campo eletromagnético encontrado foi 0,298 mT na cintura do soldador. No entanto, ao avaliar o campo eletromagnético gerado a 10 cm do corpo do soldador (correspondente a mão do soldador), o valor de medido foi de 0,644 mT, o que ultrapassa o limite de referência.

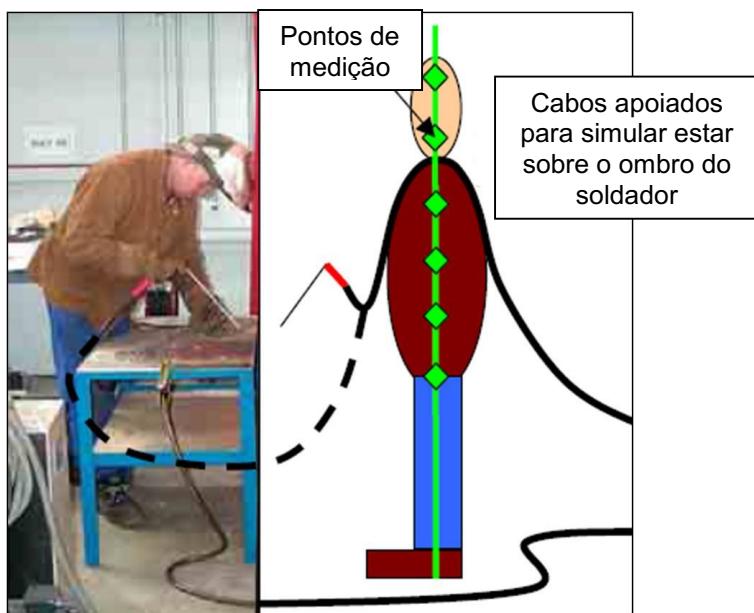


Figura 2.4 - Configuração para medição de campo eletromagnético para soldagem a arco: posição do soldador (direita) e configuração dos pontos de medição com suporte dos cabos (esquerda) (Melton, 2005 – Modificado)

Ao avaliar o campo eletromagnético gerado na soldagem GMAW, Melton (2005) incluiu uma avaliação dos modos de transferência metálica por curto-círcito em modo convencional em 150 A e com transferência controlada pulsada em 200 A, os valores de campo eletromagnético foram respectivamente de 0,056 mT e de 0,17 mT. No entanto, não há na literatura registros consistentes que associam os resultados de campo eletromagnético com o modo de transferência metálica.

De modo geral, os dados obtidos da literatura até então concordam com as teorias de Dasdag et al. (2002), Mair (2005), e Neris (2015) ao indicarem que o ponto mais crítico quanto à exposição a campos eletromagnéticos ocorre em distâncias muito próximas ao corpo do soldador (menores ou iguais 10 cm), ou seja, na mão do soldador, para o caso da soldagem manual. Seguindo essa linha de raciocínio, percebe-se que alguns trabalhos mais recentes

se centraram em avaliações relativas a mão do soldador ou em distâncias curtas de máquinas de soldagem.

Sachiko et al. (2011) concentraram seus estudos em medições feitas na mão do soldador durante processos de soldagem a arco. Os autores comentam que os resultados dependem do tipo de processo de soldagem a arco e para tanto realizaram medidas com um magnetômetro *Hall* através de uma sonda presa ao pulso do trabalhador, conforme a Fig. 2.5, durante toda a jornada de trabalho. O valor do campo máximo encontrado estava na faixa de 0,35 a 3,35 mT (média de 1,55 mT) e o valor médio por dia de trabalho foi de 0,04 a 0,12 mT (média de 0,07 mT). Ambos os resultados são provenientes de um total de 17 medições realizadas em 5 empresas. O valor de campo eletromagnético atribuído a mão do soldador é de 1,49 mT, o que é inferior ao limite de referência estabelecido pela ICNIRP.

Estes mesmos autores acrescentaram ainda que soldadores podem, durante o dia de trabalho, estar envolvidos com outras formas de trabalho como corte, esmerilhamento, furação e outras operações de apoio à fabricação soldada, que utilizam outras fontes de campo eletromagnético como brocas, esmeril e martelos de pressão, por exemplo. No entanto, esses campos eletromagnéticos são muito mais baixos, quando comparados com aqueles existentes nos processos de soldagem (Tab. 2.7).

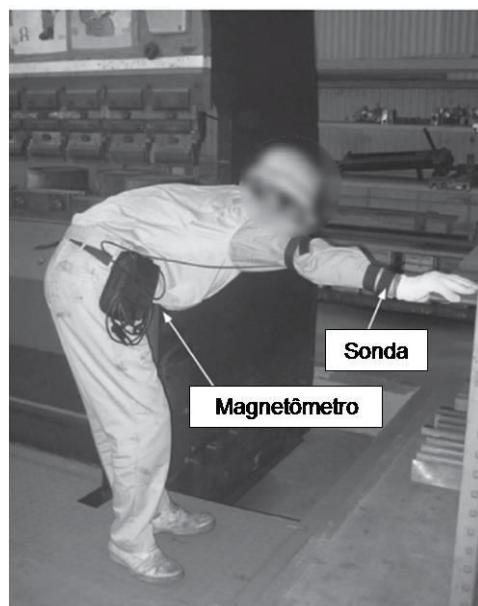


Figura 2.5 - Medição de campo eletromagnético durante o dia de trabalho (Sachiko et al. 2011 - Modificado)

Tabela 2.7 - Fontes de campo eletromagnético no local de trabalho (Sachiko et al. 2011 - Modificado)

Campo de exposição máximo (mT)	
Soldagem	8,69
Esmeril	1,01
Furadeira	1,70
Pregador pneumático	1,68

Ali (2012) avaliou os campos eletromagnéticos gerados nas proximidades de diferentes máquinas de soldagem a arco operando com baixa, média e alta corrente e em distintas distâncias de medição. Os resultados indicaram que o campo eletromagnético mais expressivo é encontrado a menor distância das fontes de soldagem, o que representa o risco mais elevado para o soldador. Os valores medidos também confirmaram o que foi relatado por Melton (2005), onde o campo eletromagnético é mais forte para os maiores níveis de corrente. O maior valor de campo eletromagnético registrado no trabalho de Ali (2012) foi 0,41 mT, numa faixa de corrente de 250 A, a 10 cm de uma máquina de soldagem a arco trifásica. Não é informado em qual dos processos a arco este valor foi encontrado.

Garrido (2013), embasado na metodologia de medição de campos eletromagnéticos de Melton (2005), realizou medições junto a cabeça, cintura, mãos e tórax em 31 soldadores GMAW em empresas distintas durante a jornada de trabalho utilizando um equipamento de medição da marca: AARONIA AG e modelo: Spectran NF-5035 em conjunto com um software MCS da Aaronia (*MCS Real Time Spectrum analyzer software*) que permite, através do computador, gravar em tempo real a exposição a campos eletromagnéticos para análises posteriores. O autor também realizou medições a diferentes distâncias dos cabos de soldagem, onde conseguiu registrar os maiores valores de campo eletromagnético próximo aos cabos de soldagem (0,762 mT), junto a tocha/mão (0,635 mT) e cabeça do soldador (0,105 mT).

Farrugia et al. (2016) compararam a densidade de campo eletromagnético proveniente dos processos SMAW em modo AC e GTAW e GMAW em modo DC e registraram o maior valor da densidade de campo eletromagnético para o processo SMAW. O resultado foi atribuído ao elevado valor de corrente empregado nesse processo em função do diâmetro do eletrodo utilizado. Os autores ainda reafirmaram os estudos anteriores, ao identificarem que o campo eletromagnético tem seu valor reduzido com o aumento da distância. Pelo fato de não serem utilizados os mesmos parâmetros durante os processos, não é possível realizar uma comparação adequada entre eles. Nesse sentido, os autores recomendam que outras

pesquisas sejam realizadas para contribuir com as medidas de segurança no ambiente de soldagem, resguardando a integridade dos cordões de solda.

Nestes trabalhos não fica clara a correlação do campo eletromagnético com a corrente de soldagem efetivamente utilizada, levando a crer que as correntes mencionadas correspondem às correntes máximas fornecidas pela fonte de energia. Os autores ainda ressaltam que as medidas foram feitas em rms (*root mean square*), mas os resultados também podem ser apresentados em níveis médios. Além disto, a frequência em que se analisa o campo eletromagnético influí em seu valor. Os valores apresentados foram, na maioria dos casos, correspondentes a um harmônico de 60 Hz, mas foi observado que alguns equipamentos produziram campo eletromagnético mais forte em 120 Hz ou 180 Hz.

A revisão da literatura mostrou que, para a maioria dos processos de soldagem a arco, os níveis de referência propostos pelo ICNIRP não são ultrapassados, a menos que a medição seja feita muito próxima ao cabo de soldagem, tocha ou porta eletrodo, ou seja, na mão do soldador. No entanto, na maioria dos casos apresentados os detalhes experimentais são insuficientes para tirar conclusões significativas sobre os resultados. Não são dadas informações precisas sobre o nível de corrente utilizado, material e outros parâmetros operacionais comuns aos processos de soldagem. Por esta razão neste trabalho são investigados os campos eletromagnéticos oriundos das soldagens SMAW, GTAW e GMAW em condições experimentais previamente especificadas para que os resultados obtidos possam ser comparados com os limites ICNIRP de forma mais consistente.

2.7. Processos de soldagem por resistência a ponto

No que se refere aos processos de soldagem por resistência, pode-se afirmar que estes são amplamente utilizados onde há um grande número de peças a serem soldadas na forma de chapas em indústria de alto volume de produção, como é o setor automotivo. Em específico, a soldagem a ponto por resistência (RSW) é o processo mais utilizado para a união de juntas sobrepostas onde não há a necessidade de solda estanque em todo o comprimento da junta soldada. Este processo é comumente realizado com uso de corrente alternada (AC), mas recentemente fontes com corrente contínua operando em média frequência de 1000 a 2000 Hz têm sido comercializadas, sendo denominadas de fontes MFDC (*Medium Frequency Direct Current*). Diferentes trabalhos têm sido publicados apresentando as vantagens e limitações de uma e de outra fonte, mas sem apresentar resultados acerca dos campos eletromagnéticos gerados (Rosa, 2013).

Gomes et al. (2017) destacam o processo RSW por apresentar características que favorecem a indústria com operação ágil, facilmente adequada para processos automáticos, manuseio simples, aplicações diversas e baixo custo. Nesse sentido novas metodologias para ajuste de parâmetros são aplicadas para aperfeiçoar o RSW, favorecendo o controle e a capacidade desse processo.

O processo de soldagem por resistência pode ser conduzido de diferentes maneiras (mecanizada/robotizada/automatizada ou manualmente por um operador). Neste caso, chama-se a atenção para os altos níveis de corrente, haja vista que a fonte de calor é o Efeito Joule gerado pela passagem de corrente na peça. Níveis de corrente da ordem de 30.000 A podem ser utilizados, objetivando-se menores tempos de soldagem (Wolff et al. 2010). Destaca-se que os equipamentos podem trazer os transformadores incorporados às pinças de soldagem (mais comuns no caso das fontes MFDC ou ainda AC portáteis de baixa potência) ou colocados afastados destas pinças (mais comumente utilizados para as fontes AC). Estes dois aspectos construtivos geram campos eletromagnéticos diferentes próximos ao operador, devendo, portanto, serem avaliados distintamente.

2.8. Avaliação de campos eletromagnéticos em processos de soldagem por resistência a ponto

A grande maioria dos processos de soldagem por resistência são automatizados ou robotizados, exigindo menor grau de interação com o soldador quando comparados com os processos de soldagem a arco executados manualmente. No entanto, ainda existem versões do processo que necessitam que o soldador esteja segurando a pinça para soldagem ou esteja localizado a pequenas distâncias da fonte. Sendo assim, em virtude das particularidades do processo e aos elevados níveis de corrente empregados, as pesquisas referentes a exposição de soldadores a campos eletromagnéticos durante a soldagem RSW estão, em sua maioria, relacionadas a distâncias mínimas entre o soldador e a fonte de soldagem, nas quais a exposição aos campos eletromagnéticos encontra-se dentro de um determinado padrão de segurança, normalmente estabelecidos por diretrizes da ICNIRP.

Stuchly e Lecuyer (1989) estudaram os níveis de campos eletromagnéticos no processo de soldagem por resistência utilizando uma fonte AC de baixa potência. As medições foram feitas a uma distância de 10 cm da cintura, peito e mãos, encontrando, respectivamente, os valores de 0,438 mT, 0,625 mT e 1 mT. Neste artigo não é mencionada nenhuma correlação clara com a corrente de soldagem empregada no processo.

Em outro trabalho, Silny et al. (2001) mediram campos eletromagnéticos variando entre 0,02 mT e 0,700 mT em função do ponto de medição. Cooper (2002) ao utilizar um equipamento de maior potência e operando em corrente contínua a 14,1 kA, obteve medidas de campo eletromagnético no valor de 30 mT a 5 cm da cabeça do soldador e 10 mT a 20 cm também da cabeça do operador. Ao reduzir o valor da corrente para 8 kA o campo eletromagnético diminuiu para 0,2 mT. A depender da frequência analisada, os valores de campo eletromagnético podem exceder os níveis de referência, como foi o caso de algumas medidas encontradas na posição do tronco e cabeça de soldadores. Outros valores de até 1,52 mT foram encontrados a uma distância de 100 cm da pinça.

Melton (2005) encontrou um valor de campo eletromagnético de 13,08 mT a 50 Hz, a 10 cm de distância do eletrodo e de 1,7 mT próximo ao transformador utilizando uma corrente de 15 kA, operando na mesma faixa de corrente em um equipamento AC. Este último valor é dez vezes maior do que aquele encontrado para a soldagem GMAW pulsada por este autor, o que evidencia o fato de que na soldagem por resistência, por serem empregadas correntes muito elevadas na ordem de kA, os campos eletromagnéticos gerados são também muito elevados e muitas vezes superam os níveis de referência da ICNIRP, sobretudo a distâncias menores que 100 cm do cabo terra ou dos eletrodos.

Herrault e Donati (2006) observaram o campo eletromagnético oriundo do processo RSW em quatro situações distintas: em um equipamento com transformador remoto, em uma máquina fixa do tipo prensa, em uma máquina de soldagem a ponto com o transformador integrado a pinça e em uma máquina de soldagem por pontos contínuos. As medições foram feitas a 50 Hz no plano horizontal realizando inclinações de 0 °, 45° e 90° da sonda do medidor com relação aos eletrodos ou as pinças e em distâncias que variavam entre 10 cm e 90 cm entre o soldador e o equipamento.

Os resultados encontrados por Herrault e Donati (2006) revelaram que o campo eletromagnético é menos intenso na posição frontal aos eletrodos/pinças e, para uma mesma distância, aumenta gradativamente com a inclinação da sonda do medidor, atingindo seu valor máximo a 90° a altura do ponto de soldagem, decrescendo o seu valor à medida que sonda se afasta, alcançando seu valor mínimo na parte traseira dos equipamentos, local esse comumente ocupado pelo soldador. Os autores ainda confirmaram outras proposições encontradas na literatura ao verificarem que o campo eletromagnético varia diretamente com o aumento da corrente e independe do tempo de soldagem.

Garrido (2013) expandiu a metodologia utilizada para medição de campos eletromagnéticos em processos de soldagem a arco para avaliar o processo RSW, realizando as medições a 90° dos eletrodos, por ser essa considerada a pior situação, segundo os dados de Herrault e Donati (2006). O autor registrou os maiores valores junto aos cabos de

soldagem, sendo este valor superior a 1 mT em uma máquina monoponto e 0,646 mT para uma pinça em ‘C’. No entanto, não é possível comparar efetivamente as máquinas ou processos de soldagem a ponto em virtude da diferença nos parâmetros operacionais empregados.

Os elevados valores de campos eletromagnéticos encontrados no processo RSW chama atenção da comunidade científica. Man e Shahidan (2007) compararam a soldagem por resistência com outros processos de soldagem a arco, em uma avaliação da exposição de 56 soldadores através de entrevistas e quantificações nos locais de trabalho. Os autores observaram que os soldadores estão submetidos a uma vasta gama de exposição ao longo da vida a depender do processo que executam, sendo o processo de soldagem por resistência aquele que reflete o maior nível de exposição, como pode ser ilustrado na Fig. 2.6.

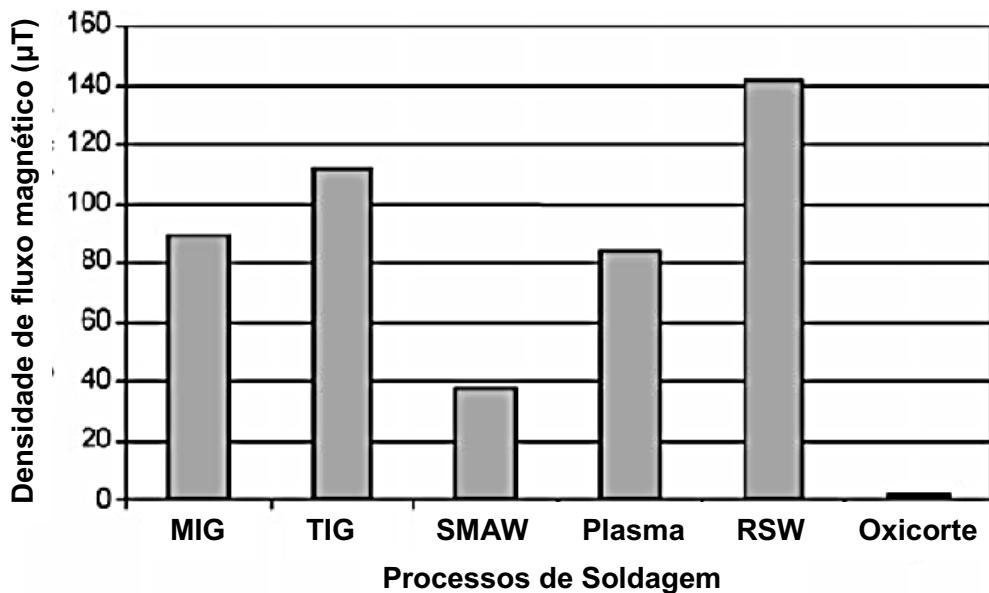


Figura 2.6 - Níveis médios de exposição aos campos eletromagnéticos ao longo da vida (Man e Shahidan, 2007 - Modificado)

Na maioria dos trabalhos observados verifica-se que há ausência de detalhamento experimental ou de correlações entre os parâmetros empregados nos processos com a emissão de campo eletromagnético. Tal carência de informações pode ser consequência das dificuldades em realizar a medição destes campos em processos de soldagem, visto que outros riscos ocupacionais estão presentes durante a atividade tais como aspiração de fumos, exposição à radiação UV, ruídos e vibrações (Fuhr, 2012).

Desta forma, percebe-se que nas últimas décadas muitos modelos computacionais estão sendo desenvolvidos com o objetivo de realizar avaliações da exposição humana a campos elétricos e magnéticos. Esses modelos incorporam os benefícios operacionais da

simulação computacional em comparação com estudos experimentais, como redução de custos e otimização do tempo empregado para análises.

2.9 Avaliação computacional dos campos eletromagnéticos emitidos nos processos de soldagem

As simulações numéricas acerca da avaliação de campos eletromagnéticos nos processos de soldagem são, em sua maioria, referentes ao processo de soldagem por resistência a ponto. Doebelein et al. (2002) realizaram simulações numéricas para avaliação do campo eletromagnético emitido por equipamentos de soldagem a ponto no modo MFDC operando a 1 kHz. Os resultados mostraram que a distância mínima para operação nessas máquinas é de 30 cm, considerando que a corrente máxima de indução no corpo humano não deve ultrapassar o valor de 7mA/m^2 .

Seguindo essa mesma linha de pesquisa Nadeem et al. (2004) realizaram simulações em modelos 3D (Fig. 2.7) afim de comparar duas distâncias do eletrodo de soldagem: uma delas a 34 cm (Fig. 2.7 - a) e outra a 5 cm do eletrodo (Fig. 2.7 - b), como forma de reproduzir duas posições distintas de soldagem. A densidade de campo eletromagnético é mostrada na Fig. 2.8. Os autores revelam que a média da densidade de campo eletromagnético decorrente da exposição está abaixo dos limites propostos pelo ICNIRP quando o soldador está a 34 cm dos eletrodos em equipamentos operando numa faixa de 4 Hz a 1 kHz.

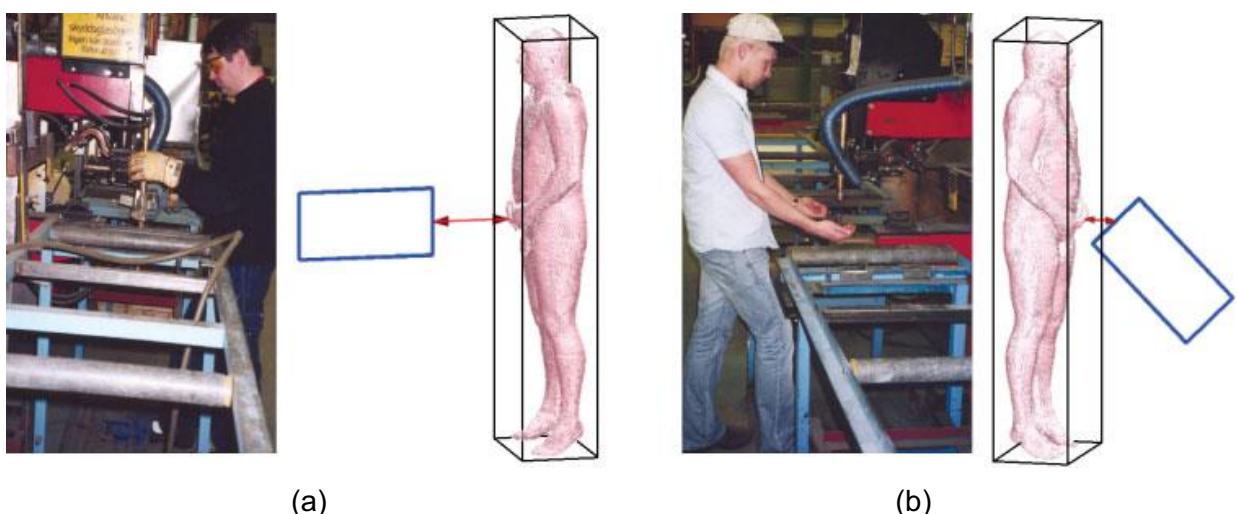


Figura 2.7 – Soldador a 34 cm dos eletrodos (a) e a 5 cm dos eletrodos (b) (Naddem et al. 2004)

Nadeem et al. (2004) acrescentam que a metodologia proposta em seu trabalho é eficaz para avaliar a exposição de trabalhadores a campos eletromagnéticos oriundos de equipamentos de soldagem por resistência, uma vez que o estudo foi realizado com base em cálculos numéricos desenvolvidos para várias situações de exposição nos locais de trabalho e os resultados obtidos foram incluídos em um banco de dados e comparados com os valores limites de exposição estabelecidos, compondo um sistema de referência que permite avaliar o nível de exposição do trabalhador. Desse modo, na prática industrial, se reduz o esforço para realização de cálculos numéricos demorados, desde que o esse sistema seja consultado.

Canova et al. (2010) utilizaram dois modelos computacionais para comparar a diferença entre os valores de campos eletromagnéticos emitidos por equipamentos AC e MFDC. Um dos modelos utilizados é mais simples e proposto pela norma IEC 62226-3-1:2007. O outro é mais realístico e desenvolvido por Sachse et al. (2000). Os cálculos foram feitos considerando o soldador localizado a 150 cm dos equipamentos de soldagem operando a 20 kA a uma frequência de 50 Hz. Os resultados mostraram que a densidade de campo eletromagnético pode ser superior a 0,9 mT e que os campos eletromagnéticos gerados pelos equipamentos AC ocorrem predominantemente a 50 Hz e são maiores que os campos estáticos gerados por máquinas MFDC. Sendo assim, deve ser dada uma maior atenção a exposição de soldadores que operam em equipamentos de corrente alternada.

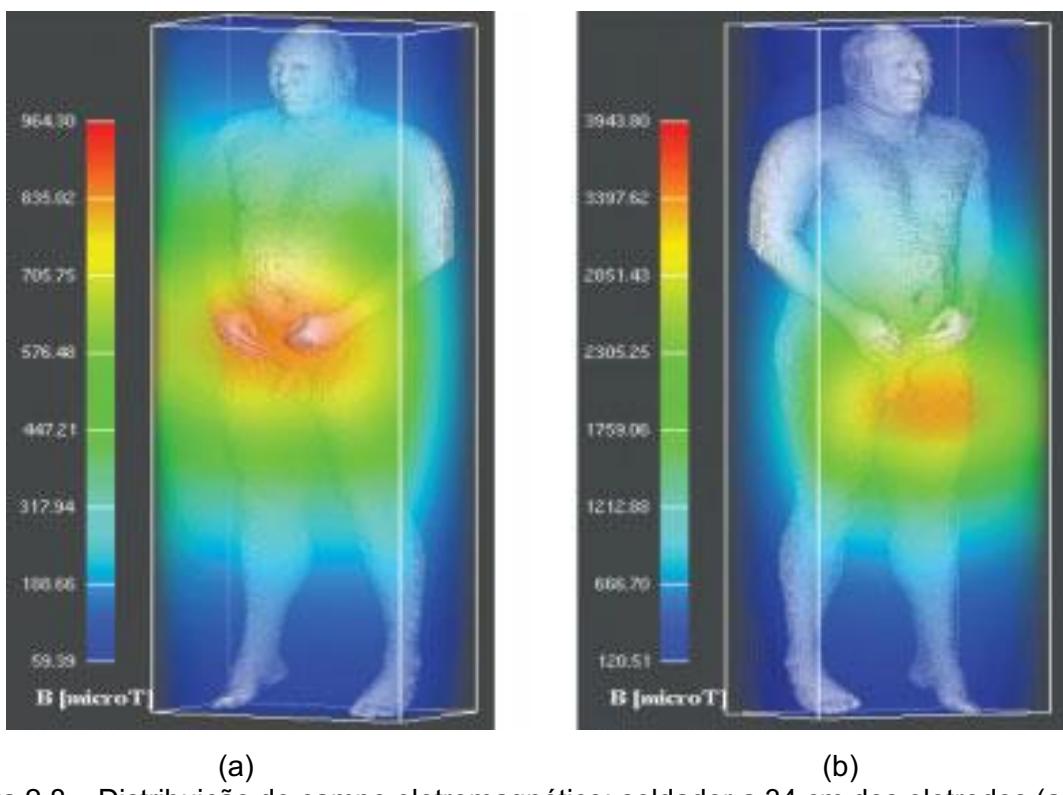


Figura 2.8 – Distribuição de campo eletromagnético: soldador a 34 cm dos eletrodos (a) e a 5 cm dos eletrodos (b) (Naddem et al. 2004)

Com relação a comparação entre os modelos computacionais, os autores revelam que o modelo mais realístico apresenta soluções complexas e esbarra na dificuldade de diferenciação entre tecidos e órgãos, uma vez que um determinado tecido ou órgão necessita de um nível de discretização mais refinado que outro. Nesse caso, os autores sugerem que ambos os modelos são eficazes na avaliação da exposição de campos eletromagnéticos, mas que devem ser utilizados de acordo com objetivo específico.

Dughiero et al. (2010) avaliaram a conformidade do campo eletromagnético produzido por equipamentos de soldagem por resistência através da construção de modelos cilíndricos do corpo humano. Segundo estes autores os equipamentos que operam a baixas frequências e com correntes de alta intensidade, como o caso de equipamentos de soldagem por resistência, produzem campos eletromagnéticos elevados capazes de estimular o sistema nervoso do trabalhador. Nesse estudo, ao utilizarem modelos mais complexos do corpo humano, os autores não obtiveram melhores resultados.

Desideri e Maschio (2012) desenvolveram um modelo de simulação numérica para avaliar a exposição ocupacional de soldadores GMAW em modo pulsado. Para tanto, implementaram um modelo de soldagem a um modelo anterior em MatLab referente as formas de onda com o objetivo de caracterizar o formato ondulatório do modo de transferência pulsada. Os autores concluíram que os formato de onda não é um parâmetro importante no que se refere a exposição de soldadores a campos eletromagnéticos, mas afirmam que o modelo proposto pode ser útil para realizar avaliações em processos de soldagem.

Canova et al. (2016) desenvolveram uma metodologia específica para a avaliação da exposição humana a campos eletromagnéticos gerados por pinças de soldagem por resistência a ponto na versão MFDC, por considerarem que esse processo gera um campo eletromagnético que inclui componentes de frequências mais altas. Os autores utilizaram um modelo do corpo humano e uma geometria cubica simplificada representativa da pinça de soldagem. Ao realizarem as simulações computacionais em diferentes posicionamentos (Fig. 2.9), concluíram que a exposição ao campo eletromagnético depende da posição da pinça de soldagem e que na posição “front 1”, corresponde a posição em que o soldador se encontra em frente a pinça de soldagem, os limites da ICNIRP são ultrapassados. Os autores chamam a atenção para o processo RSW pelo fato de considerarem críticos os equipamentos empregados nesse tipo de soldagem quanto a emissão de campos eletromagnéticos.

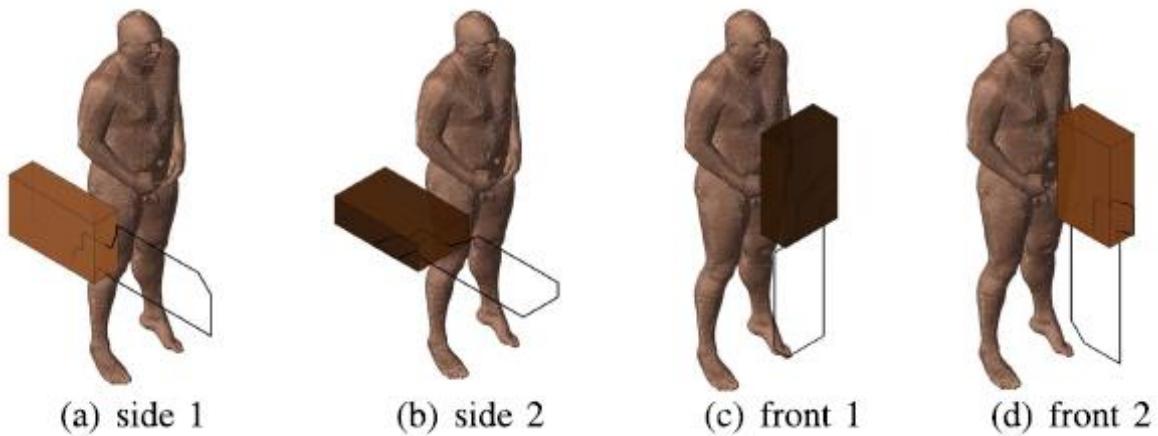


Figura 2.9 – Configuração de posições da pinça de soldagem em relação ao soldador: (a) lado, (b) lado e horizontal, (c) frente e (d) frente e vertical (Canova et al. 2016)

Utilizando o método de elementos finitos, Freschi et al. (2016) simularam a exposição de um soldador de 34 anos (1,80 m de altura e 72,8 kg), modelado conforme recomendações da norma EN 50444:2008-02, em um processo de soldagem a arco realizado a uma corrente de 100 A, posicionando o soldador a 20 cm do cabo de soldagem. Os resultados revelaram que o campo eletromagnético ultrapassa os valores limites estabelecidos pela ICNIRP, principalmente para as regiões mais próximas ao cabo de soldagem e em tecidos do sistema nervoso periférico (Fig. 2.10).

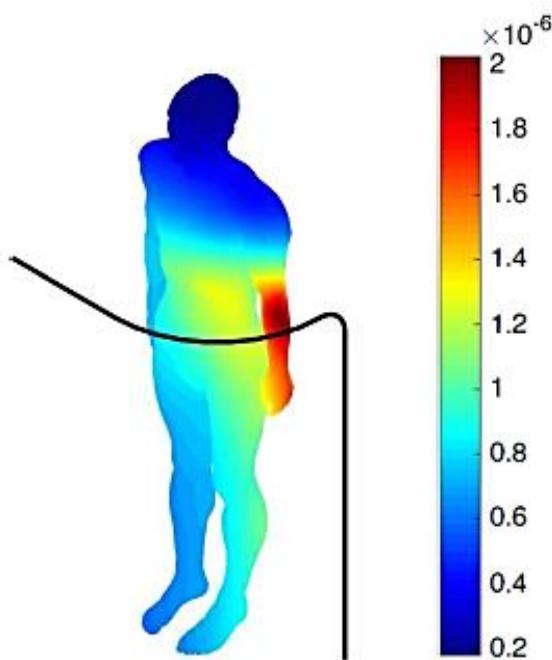


Figura 2.10 - Resultado da densidade de fluxo magnético para o modelo posicionado próximo ao cabo de soldagem (Freschi et al. 2016)

Percebe-se pelos registros encontrados na literatura que as informações oriundas de simulações computacionais também carecem de dados mais detalhados acerca dos processos de soldagem ou, em alguns casos, tratam de situações específicas. Ambas as implicações impossibilitam a correlação entre os parâmetros de soldagem e a emissão de campos eletromagnéticos. Dessa forma, no presente estudo as simulações computacionais realizadas tentarão se aproximar de cenários reais dos processos de soldagem, afim de demonstrar resultados úteis à exposição segura se soldadores aos campos eletromagnéticos.

Ainda, cabe acrescentar que a utilização detalhada de duas vias metodológicas para avaliação de campos eletromagnéticos contribui com a redução da dificuldade em quantificar campos eletromagnéticos ressaltada por Habermann et al. (2010), visto que, além das limitações das pesquisas relacionadas a determinação de campos eletromagnéticos por via de simulação computacional, a metodologia de medição experimental proposta por Melton (2005) e reproduzida de modo semelhante por Sachiko et al. (2011) e Garrido (2013) não revelam detalhes quanto ao posicionamento da sonda eletromagnética ou método de leitura dos valores adquiridos.

2.10. Aspectos éticos e legais da pesquisa

Em consonância com o que foi exposto, a elaboração desse trabalho tem como objetivo criar dados que permitam correlacionar as variáveis operacionais empregadas nos processos de soldagem a arco e por resistência a ponto com a emissão de campos eletromagnéticos de modo a contribuir com a segurança ocupacional da atividade. Aliado a isso, nos processos de soldagem é indispensável a presença de um soldador/operador, sobretudo para aqueles realizados manualmente, que é o interesse desse estudo.

Dante desse fato, é fundamental que toda pesquisa que, de algum modo envolva a participação de seres humanos, seja revisada por um Comitê de Ética em Pesquisa (CEP) que, no Brasil, foi criado a partir da Resolução de 1988 do Conselho Nacional de Saúde (CNS) e posteriormente revisado pela Resolução 196 de 1996 que definiu a criação e a consolidação do sistema brasileiro de revisão ética das pesquisas, o sistema Comitê de Ética em Pesquisa/Comissão Nacional de Ética em Pesquisa (CEP/CONEP) (Batista et al. 2012).

A resolução n. 466 de 12 de dezembro de 2012 do Conselho Nacional de Saúde preconiza que toda pesquisa que envolva coleta de dados de seres humanos, em sua totalidade ou em partes, direta ou indiretamente deve ser submetida à análise ética de um Comitê de Ética em Pesquisa (CEP) e só poderá ser executada se receber um parecer de aprovação. Os Pesquisadores devem apresentar documentos específicos e relacionados ao

seu projeto de pesquisa com seres humanos, para serem analisados pelo CEP da instituição na qual desenvolvem a pesquisa (BRASIL, 2012).

Em obediência a referida resolução foi submetido ao CEP da Universidade Federal de Uberlândia um projeto de pesquisa e os demais documentos necessários para a realização desse estudo, sob número de Certificado de Apresentação e Apreciação Ética CAAE 13582419.6.0000.5152. O documento continha todos os dados técnicos da pesquisa, ressaltando a participação dos integrantes da pesquisa, destacando o papel do soldador e os riscos aos quais ele estava exposto que são aqueles inerentes aos processos de soldagem, cuja prevenção é feita pelo uso de equipamentos de proteção individual e coletiva.

Nesse contexto o CEP julgou o protocolo submetido sob parecer n. 3.475.254 considerando a natureza técnica do protocolo, entende-se que não se trata de pesquisa com ser humano e sim da avaliação de processos de soldagem. O CEP considera, portanto, o soldador como um prestador de serviço e não um participante da pesquisa e, por isso, conduz com a retirada do protocolo e a continuidade da pesquisa, uma vez que o ser humano não é objeto de estudo e não será utilizado como participante nessa pesquisa.

Diante do parecer do órgão competente a pesquisa pôde ser conduzida respeitando os preceitos éticos e legais vigentes no país. Sob esse aspecto, embora o protocolo não reflita uma necessidade de acompanhamento pelo comité de ética em pesquisa, em função do papel de soldador/operador no trabalho, todas as recomendações acerca do sigilo de identidade do soldador no trabalho foram respeitadas, não contrariando as premissas da Resolução n. 466 de 2012.

CAPÍTULO III

METODOLOGIA

Neste capítulo estará relatado a metodologia experimental e numérica desenvolvida para o cumprimento dos objetivos propostos. Portanto, são descritos os materiais e métodos empregados nos ensaios com os diferentes tipos de soldagem a arco e por resistência elétrica, bem como o desenvolvimento e as características do modelo computacional utilizado para obtenção dos valores pontuais de campo eletromagnético. Ressalta-se que o emprego dessas duas abordagens metodológicas se dá com o intuito de contribuição entre os resultados alcançados e não de comparação entre as metodologias.

A metodologia geral para o desenvolvimento desse trabalho, pôde ser sintetizada através do fluxograma ilustrado na Fig. 3.1. O ponto de partida do trabalho se deu na pesquisa de metodologias experimentais para medição de campos eletromagnéticos em processos de soldagem (Etapa 1). Nessa etapa foi possível adquirir um medidor de campos eletromagnéticos capaz de atender ao envelope experimental estimado que, inicialmente abrangia os processos SMAW e GTAW (Etapa 2). A medição de campos eletromagnéticos nesses processos foi realizada pelo próprio autor (Martim, 2016), embasados nos trabalhos de Melton (2005) e Sachiko et al. (2011). Uma vez alcançados resultados satisfatórios, a mesma metodologia foi empregada para medição experimental de campos eletromagnéticos nos processos GMAW e RSW (Etapa 3).

Com a finalidade de investigar e contribuir com os resultados experimentais, foram estudados métodos computacionais para obtenção de campos eletromagnéticos provenientes de processos de soldagem. A partir desse ponto, foi desenvolvido um modelo de simulação computacional afim de investigar numericamente os valores pontuais de campos eletromagnéticos emitidos nos processos mencionados (Etapa 4). Em todas as etapas, os valores obtidos por ambas as vias metodológicas foram comparados com os valores de referência estipulados pelo ICNIRP, quanto à exposição de trabalhadores a campos eletromagnéticos.

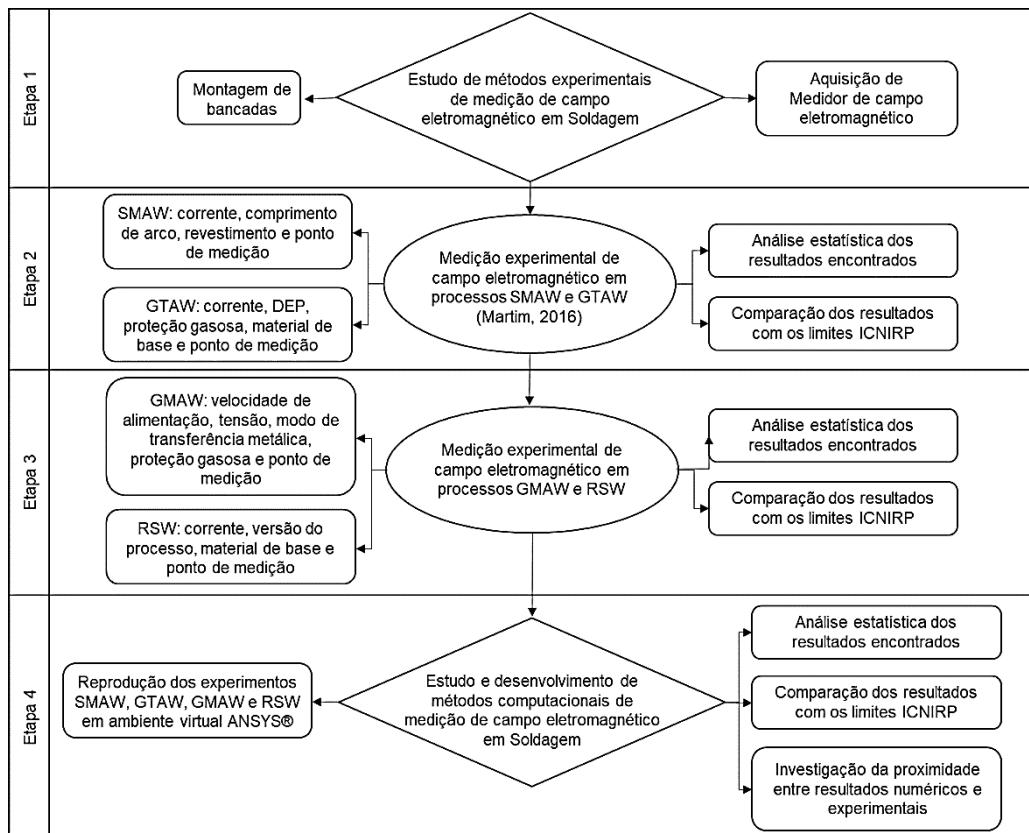


Figura 3.1 – Fluxograma geral da metodologia de avaliação de campos eletromagnéticos

As variáveis analisadas em cada um dos processos de soldagem podem ser observadas na Tab. 3.1. Os valores encontrados constituem uma base de dados essencial à avaliação da influência dessas variáveis na geração dos campos eletromagnéticos, além de permitir comparar os valores extraídos com os limites estabelecidos pelas diretrivas mais atualizadas da ICNIRP, visto que as medições são realizadas em regiões específicas do corpo do soldador.

Tabela 3.1 - Variáveis analisadas nos processos de soldagem.

Processo de soldagem	Variáveis analisadas
SMAW	Faixa de corrente, altura do arco, eletrodos consumíveis e ponto de medição.
GTAW	Faixa e versão da corrente, altura do arco, gás de proteção, material de base e ponto de medição.
GMAW	Faixa da tensão, velocidade de alimentação, tipo de transferência metálica, gás de proteção e ponto de medição.
RSW	Versão de processo (AC ou MFDC), faixa de corrente, material de base e ponto de medição.

Cabe salientar que a execução dos testes de soldagem SMAW e GTAW, descrita pelo próprio autor em trabalho anterior (Martim, 2016), é descrita no presente estudo como forma de facilitar a leitura deste trabalho, visto que os processos GMAW e RSW seguem uma abordagem experimental semelhante. Além disso o desenvolvimento do modelo de simulação computacional baseia-se, principalmente, na reprodução de todas as condições experimentais apresentadas. Dessa forma a leitura posterior dos resultados apresentados é muito mais clara em posse de todas as informações experimentais e numéricas de todos os processos analisados.

3.1. Medição de campo eletromagnético

Durante a realização dos experimentos, foi mensurado o campo eletromagnético ao qual o soldador estava exposto nas regiões da cabeça, tronco, cintura e mão, de maneira semelhante à metodologia sugerida nos trabalhos de Melton (2005) e Sachiko et al. (2011) e adaptada em trabalho prévio do autor (Martim, 2016) nas medições nas soldagens SMAW e GTAW. A Fig. 3.2 mostra a configuração desses pontos de medição, identificados pelo losango de cor vermelha, para os processos de soldagem a arco (Fig. 3.2 - a) e por resistência AC (Fig. 3.2 - b) e MFDC (Fig. 3.2 - c).

Por se tratar de processos com níveis de diferentes de parâmetros operacionais e consequentes diferenças quanto a luminosidade, calor, fumos e outros riscos provenientes dos processos, respeitou-se as posições de soldagem adotadas convenientemente pelo soldador em razão do conforto ao realizar os processos. Destaca-se, portanto, que as diferenças observadas nas regiões distintas do corpo do soldador, quanto a exposição a campos eletromagnéticos, constituem um resultado a ser avaliado nesse trabalho. O soldador que realizou o teste possui 1,73 m de altura, que corresponde ao valor médio de um indivíduo brasileiro do sexo masculino com idade entre 25 e 29 anos, segundo os dados do IBGE de 2008 a 2009 (IBGE, 2015).

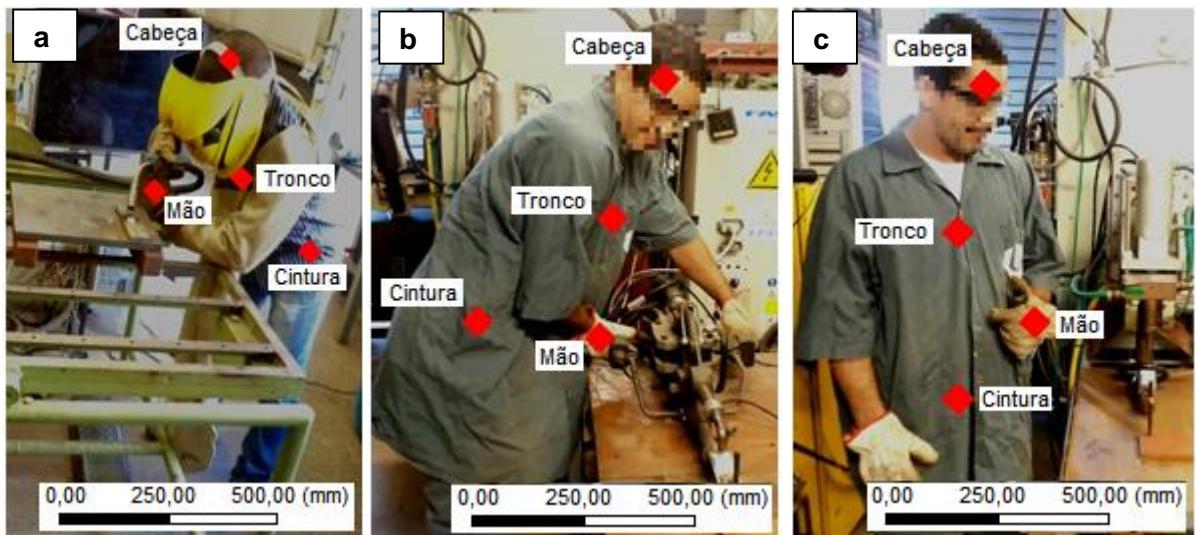


Figura 3.2 - Seleção dos pontos de medição no trabalhador para os processos de soldagem a arco (a) e por resistência nos modos AC (b) e MFDC (c)

No caso da soldagem por resistência, cabe ressaltar que para a execução de soldas com equipamento de corrente alternada (AC) é preciso que o soldador esteja segurando as alças laterais do equipamento e no caso da soldagem por corrente continua (MFDC) o acionamento das pinças é feito por um botão conectado a um fio, cuja extensão, permite que este processo seja feito a certa distância do equipamento. Neste caso, para que avaliação dos campos eletromagnéticos gerados nestes processos fosse coerente, a realização das soldagens na versão MFDC foi feita com o soldador próximo ao equipamento em posição semelhante àquela necessária para soldagem em modo AC.

Em todos os processos estudados, as medições de campo eletromagnético para todos os processos estudados neste trabalho foram realizadas em rms (*root mean square*) com o medidor de campo eletromagnético ambiental mostrado na Fig. 3.3, modelo TAMB-3D, cujo fundo de escala e precisão são, respectivamente, 5 mT e $\pm 2\%$ da leitura ou $\pm 1\%$ do fundo de escala nesse trabalho foi utilizada a precisão de 2% da leitura).



Figura 3.3 - Visão geral do medidor de campo eletromagnético TAMB-3D (Globalmag, 2015)

Segundo Globalmag (2015), o medidor de campo eletromagnético ambiental modelo TAMB-3D é um instrumento robusto, cuja principal aplicação é avaliar a valor pontual de campos eletromagnéticos de baixa frequência em ambientes industriais e comerciais. Este instrumento possui uma sonda magnética de 3 eixos capaz de medir a valor do campo eletromagnético em qualquer posição. Este medidor também foi projetado para medir simultaneamente a valor do campo eletromagnético continuo (DC) e alternado (AC) true rms. O medidor possui funções de auto zero e medida de campo máximo. Permite visualizar os valores do campo em cada eixo (x, y e z), bem como a resultante do campo em um ponto do espaço.

A medida de campo eletromagnético inicia-se automaticamente ao acionar a chave liga/desliga. Antes das medições feitas em cada processo de soldagem foi efetuado o ajuste de zero colocando a blindagem de campo eletromagnético terrestre sobre a sonda, como exemplificado na Fig. 3.4, de modo a minimizar possíveis perturbações residuais de campos eletromagnéticos externos (fontes de soldagem, lâmpadas e outros elementos do ambiente que não são de interesse nesse estudo). Ainda assim, cabe destacar que as medições foram feitas colocando a sonda do medidor em contato com as regiões de interesse (cabeça, cintura, tronco e mão), de modo a obter valores fieis de campos eletromagnéticos. Adicionalmente, em cada processo de medição foram realizadas cinco leituras com o intuito de produzir resultados estatisticamente confiáveis.



Figura 3.4 - Ajuste de zero. (Globalmag, 2015)

3.2. Medição de campo eletromagnético para a soldagem SMAW

A execução das soldagens SMAW só foi possível com a utilização de equipamentos e acessórios fundamentais para este processo, como fonte de soldagem, porta eletrodo, mesa para fixação das placas de teste e sistema de aquisição de dados. A seguir, são descritas as características principais da fonte de soldagem e do sistema de aquisição utilizados.

3.2.1. Fonte de soldagem para o processo Eletrodo Revestido

Para realização dos testes de soldagem Eletrodo Revestido utilizou-se uma fonte de soldagem eletrônica multiprocesso do fabricante IMC (Fig. 3.5). Essa mesma fonte de soldagem foi também utilizada para o processo TIG nas versões corrente contínua (CC) e alternada (AC). Para ambos os processos, a característica estática utilizada é do tipo corrente constante.



Figura 3.5 - Fonte utilizada para soldagem SMAW e GTAW

3.2.2. Sistema de aquisição

Em todos os processos de soldagem a arco foi utilizado o mesmo sistema de aquisição dos sinais elétricos, corrente e tensão de soldagem. A aquisição foi feita a uma taxa de amostragem de 5 kHz utilizando uma placa *National Instruments* modelo NI USB-6009 e um programa desenvolvido em linguagem *LabView®*. Este programa captura os dados durante a soldagem e os apresenta em forma de gráficos ao término da aquisição.

Para aquisição do sinal da corrente de soldagem um sensor *Hall*, como transdutor de sinal, da marca LEM *Transducers* modelo LT 500-T com faixa de medição de 0 a 500 A. Para o monitoramento da tensão foi utilizado um divisor de tensão (DTS), com uma faixa de medição de 0 a 60 V. Por fim, o tratamento dos dados adquiridos foi feito no software *OriginPro* 8.0 que permite abrir, manipular, sincronizar e tratar os dados gravados pelo programa de aquisição.

Além destes componentes, os insumos utilizados para o referido processo de soldagem são basicamente materiais de base (aço ao carbono ABNT 1020) e eletrodos consumíveis celulósico, rutílico e básico, cujas informações acerca da composição química e propriedades nominais são apresentadas a seguir.

3.2.3. Material de base

Para a realização dos ensaios com o processo Eletrodo Revestido foram utilizadas placas de aço ao carbono ABNT 1020 com dimensões de 200 mm x 50,2 mm x 12,6 mm, cuja composição e propriedades mecânicas estão descritas na Tab. 3.2.

Tabela 3.2 - Composição química e propriedades mecânicas nominais do aço ABNT 1020 (Danelon et al. 2020)

Aço Carbono 1020				
Composição química %				
C: 0,18 - 0,23	Mn: 0,30 – 0,60	Si: -	P (máx): 0,04	S (máx): 0,05
Propriedades mecânicas				
Densidade (g/cm ³)	Calor específico (J/g°C)	Condutividade térmica (W/cm°C)	Temperatura de fusão (°C)	Soldabilidade
7,8	0,63	0,47	1520	Boa

3.2.4. Eletrodos Consumíveis

Os testes de soldagem foram feitos com os eletrodos celulósico E6010, rutílico E6013 e básico E7018 com diâmetro de 3,2 mm. Ressalta-se que, de acordo com Fortes (2005), é recomendada uma corrente máxima de 140 A para a soldagem com Eletrodo Revestido E6010 com o diâmetro especificado. No entanto, foram mantidas as faixas de corrente baixa de 100 e alta de 150 A para todas as soldagens SMAW e GTAW como forma de uniformizar os parâmetros operacionais e por abranger a faixa de corrente estipulada para a maioria dos eletrodos empregados. As respectivas composições químicas e propriedades mecânicas nominais desses eletrodos são mostradas na Tab. 3.3.

Tabela 3.3 - Composição química e propriedades mecânicas nominais dos eletrodos revestidos (Fortes e Vaz 2005)

Eletrodo celulósico E6010		
Composição química %		
C – 0,09	Mn – 0,30	Si – 0,10
Propriedades mecânicas		
L.E. (MPa)	L.R. (MPa)	Alongamento (%)
331	414	22

Eletrodo rutílico E6013		
Composição química %		
C – 0,20	Mn – 1,20	Si – 1,00
Propriedades mecânicas		
L.E. (MPa)	L.R. (MPa)	Alongamento (%)
331	414	17
Eletrodo básico E7018		
Composição química %		
C – 0,15	Mn – 1,60	Si – 0,75
Propriedades mecânicas		
L.E. (MPa)	L.R. (MPa)	Alongamento (%)
399	482	22

3.2.5. Planejamento experimental

Os experimentos para soldagem Eletrodo Revestido consistiram na realização de soldas com os três tipos de eletrodos consumíveis (celulósico, rutílico e básico), em dois níveis de corrente, baixo (100 A) e alto (150 A), e em dois níveis de altura de arco (baixo e alto), sendo o nível baixo de aproximadamente 2 mm e o alto de aproximadamente 4 mm. A combinação destas variáveis resultou em 12 grupos de experimentos com base em um planejamento fatorial completo, onde em cada um deles foi medido o campo eletromagnético em na mão (1), cabeça (2), tronco (3) e cintura (4) do soldador, resultando em um total de 48 medições, conforme mostra a Tab. 3.4.

Tabela 3.4- Planejamento experimental para a soldagem Eletrodo Revestido

Ensaio	Nível de corrente	Altura do arco	Eletrodo	Ponto de medição			
				(1)	(2)	(3)	(4)
1	Baixa	Baixa	Celulósico	(1)	(2)	(3)	(4)
2	Baixa	Alta	Celulósico	(1)	(2)	(3)	(4)
3	Alta	Baixa	Celulósico	(1)	(2)	(3)	(4)
4	Alta	Alta	Celulósico	(1)	(2)	(3)	(4)
5	Baixa	Baixa	Rutílico	(1)	(2)	(3)	(4)
6	Baixa	Alta	Rutílico	(1)	(2)	(3)	(4)
7	Alta	Baixa	Rutílico	(1)	(2)	(3)	(4)

8	Alta	Alta	Rutílico	(1)	(2)	(3)	(4)
9	Baixa	Baixa	Básico	(1)	(2)	(3)	(4)
10	Baixa	Alta	Básico	(1)	(2)	(3)	(4)
11	Alta	Baixa	Básico	(1)	(2)	(3)	(4)
12	Alta	Alta	Básico	(1)	(2)	(3)	(4)

3.3. Medição de campo eletromagnético para a soldagem GTAW

Na soldagem TIG alguns dos parâmetros experimentais utilizados foram extraídos do trabalho de Reis et al. (2011). Quanto aos equipamentos, foram empregados os mesmos do processo anterior, havendo apenas a inclusão dos cilindros de gases necessários ao processo e a substituição do porta-eletrodo pela tocha de soldagem TIGWP 18, refrigerada a água e com capacidade nominal de trabalho de 350 A. Os testes ocorreram sem adição de material. Logo, os insumos utilizados neste processo incluem o material de base, os gases de proteção e o eletrodo não consumível.

3.3.1. Material de base

Os ensaios foram realizados com a utilização de três materiais de base diferentes: aço carbono ABNT 1020, cujas características já foram apresentadas, aço inoxidável austenítico AISI 304 com dimensões 200 mm x 38 mm x 6,3 mm e alumínio AA5052 de dimensões 200 mm x 50,8 mm x 6,1 mm. As composições e propriedades destes dois últimos são apresentadas nas Tab. 3.5 e Tab. 3.6, respectivamente. A escolha desses três materiais se dá em virtude da vasta gama de aplicação dessas ligas na indústria de fabricação mecânica. Elegeu-se avaliar a influência do material de base na soldagem GTAW por considerar esse um processo de qualidade, facilmente executado pelo soldador.

Tabela 3.5 - Composição química e propriedades mecânicas nominais do aço inoxidável austenítico AISI 304 (Melo et al. 2007)

Aço Inoxidável Austenítico AISI 304				
Composição química %				
C – 0,03	Mn – 1,94	Si – 0,37	Cr – 18,30	Ni – 8,51
Propriedades mecânicas				

Densidade (g/cm ³)	Calor específico (J/g°C)	Condutividade térmica (W/cm°C)	Temperatura de fusão (°C)	Soldabilidade
8,0	0,29	0,033	1398	Boa

Tabela 3.6 - Composição química e propriedades mecânicas nominais do alumínio AA5052 (Capelari e Mazzaferro, 2009)

Alumínio AA5052					
Composição química %					
Al – 96,5	Mn – 0,21	Si – 0,25	Mg – 2,22	Cr – 0,32	Fe – 0,50
Propriedades mecânicas					
L.E. (MPa)	L.R. (MPa)	Alongamento (%)		Soldabilidade	
142,4	235,2	24,2		Boa	

3.3.2. *Eletrodos não consumíveis*

Todos os testes foram feitos com eletrodo não consumível de tungstênio torinado (2%) com 2,4 mm de diâmetro, por ser um eletrodo comumente utilizado em soldagens GTAW nas condições operacionais especificadas.

3.3.3. *Gás de proteção*

Para as soldagens TIG foram utilizados o argônio puro (Ar) e uma mistura gasosa Ar+25%He como gases de proteção a uma vazão de 15 l/min ajustada com uso de um bibímetro na saída do bocal da tocha.

3.3.4. *Planejamento experimental*

Os testes de soldagem GTAW foram feitos com a utilização dos três materiais de base supracitados (aço carbono ABNT 1020, aço inoxidável austenítico AISI 304 e alumínio AA5052) em duas faixas de corrente (100 e 150 A), em dois níveis de distância eletrodo-peça (DEP) (2 e 4 mm), que está diretamente relacionada com o comprimento do arco. Foram empregados dois tipos de proteção gasosa (Argônio puro e uma mistura gasosa Ar+25%He). Nestes ensaios o modo de corrente também foi avaliado, sendo a versão com corrente contínua (DC) utilizada nas soldagens com aço carbono ABNT 1020 e aço inoxidável austenítico e a versão corrente alternada (AC) utilizada apenas nos testes com alumínio, em

função da necessidade de limpeza catódica que este material possui (Azevedo et al. 2003). Os pontos de medição são os mesmos avaliados no processo anterior. O planejamento fatorial completo resultou em um total de 24 grupos de experimentos e 96 medições, assim como mostrado na Tab. 3.7.

Tabela 3.7 - Planejamento experimental para a soldagem GTAW

Ensaio	Material	Corrente		Distância eletrodo-peça	Gás	Ponto de medição			
		Modo	Nível			(1)	(2)	(3)	(4)
1	Aço C	DC	Baixo	Baixo	Ar	(1)	(2)	(3)	(4)
2	Aço C	DC	Baixo	Alto	Ar	(1)	(2)	(3)	(4)
3	Aço C	DC	Alto	Baixo	Ar	(1)	(2)	(3)	(4)
4	Aço C	DC	Alto	Alto	Ar	(1)	(2)	(3)	(4)
5	Aço C	DC	Baixo	Baixo	Ar+25%He	(1)	(2)	(3)	(4)
6	Aço C	DC	Baixo	Alto	Ar+25%He	(1)	(2)	(3)	(4)
7	Aço C	DC	Alto	Baixo	Ar+25%He	(1)	(2)	(3)	(4)
8	Aço C	DC	Alto	Alto	Ar+25%He	(1)	(2)	(3)	(4)
9	Aço Inox	DC	Baixo	Baixo	Ar	(1)	(2)	(3)	(4)
10	Aço Inox	DC	Baixo	Alto	Ar	(1)	(2)	(3)	(4)
11	Aço Inox	DC	Alto	Baixo	Ar	(1)	(2)	(3)	(4)
12	Aço Inox	DC	Alto	Alto	Ar	(1)	(2)	(3)	(4)
13	Aço Inox	DC	Baixo	Baixo	Ar+25%He	(1)	(2)	(3)	(4)
14	Aço Inox	DC	Baixo	Alto	Ar+25%He	(1)	(2)	(3)	(4)
15	Aço Inox	DC	Alto	Baixo	Ar+25%He	(1)	(2)	(3)	(4)
16	Aço Inox	DC	Alto	Alto	Ar+25%He	(1)	(2)	(3)	(4)
17	Alumínio	AC	Baixo	Baixo	Ar	(1)	(2)	(3)	(4)
18	Alumínio	AC	Baixo	Alto	Ar	(1)	(2)	(3)	(4)
19	Alumínio	AC	Alto	Baixo	Ar	(1)	(2)	(3)	(4)
20	Alumínio	AC	Alto	Alto	Ar	(1)	(2)	(3)	(4)
21	Alumínio	AC	Baixo	Baixo	Ar+25%He	(1)	(2)	(3)	(4)
22	Alumínio	AC	Baixo	Alto	Ar+25%He	(1)	(2)	(3)	(4)
23	Alumínio	AC	Alto	Baixo	Ar+25%He	(1)	(2)	(3)	(4)
24	Alumínio	AC	Alto	Alto	Ar+25%He	(1)	(2)	(3)	(4)

3.4. Medição de campo eletromagnético para soldagem GMAW

No processo MIG/MAG forma avaliados os modos de transferência metálica curto-círcuito convencional, curto-círcuito controlado, gótico e pulsado. Para esta finalidade foram utilizados alguns dos parâmetros experimentais do trabalho de Costa (2011). Nestes experimentos foi requerida a utilização de outra fonte de soldagem com sistema de alimentação e de uma tocha específica para soldagem GMAW. A descrição das características principais destes equipamentos, bem como dos insumos utilizados necessários para realização dos ensaios é apresentada a seguir. A mesa para fixação das placas de teste e o sistema de aquisição foi o mesmo utilizado nos demais processos de soldagem a arco.

3.4.1. Fonte de soldagem e sistema de alimentação para o processo GMAW

Para a realização das soldas com o processo GMAW utilizou-se uma fonte eletrônica inversora, multiprocessos, modelo *Power Wave 450/STT* (Fig. 3.7) e um alimentador de arame *Power Feed 10M* da empresa *Lincoln Electric*. Esta fonte possui uma faixa de corrente que varia de 5 a 570 A e tensão de trabalho de 10 a 43 V com fator de trabalho de 60% e corrente máxima de 450 A e tensão máxima de 38 V, com fator de trabalho de 100% (LINCOLN, 2015). O painel de controle da fonte disponibiliza os programas a serem utilizados de acordo com o tipo e diâmetro do arame-eletrodo, processo e gás de proteção. Embora esta fonte seja comumente utilizada para o processo STT, que no presente estudo foi empregado para obtenção do modo de transferência metálica curto-círcuito controlado, a mesma fonte pode ser usada para os processos nos demais modos de transferência, realizando mudança nas conexões do cabo terra e selecionando o programa desejado em acordo com os parâmetros experimentais.



Figura 3.6 - Fonte de energia *Power Wave 450/STT* e alimentador de arame *Power Feed 10M* da empresa *Lincoln Elettric*, utilizada para soldagem GMAW.

3.4.2. Tocha para soldagem GMAW

Todas as soldagens GMAW foram executadas manualmente com tocha fabricada pela empresa TBi, refrigerada a água.

3.4.3. Material de base

As placas de teste utilizadas em todas as soldagens deste processo foram iguais àquelas usadas nos testes com Eletrodo Revestido, feitas de aço carbono ABNT 1020 e de dimensões 200 mm x 50,2 mm x 12,6 mm.

3.4.4. Gás de proteção

Neste ensaio foram utilizadas quatro proteções gasosas diferentes, todas a uma mesma vazão de 15l/min. O processo com curto-círcuito convencional e curto-círcuito controlado foi feito com CO₂ puro e mistura gasosa Ar+25%CO₂, o processo goticular ou spray com Ar+8%CO₂ e o processo pulsado com Ar+8%CO₂ e Ar+2%O₂.

3.4.5. Metal de adição

Como metal de adição foi utilizado o arame-eletrodo AWS ER70S-6 com 1,2 mm de diâmetro, o qual tem sua composição química e propriedades mecânicas, segundo o fabricante, apresentadas na Tab. 3.8.

Tabela 3.8 - Composição química e propriedades mecânicas do arame-eletrodo AWS ER70S-6 (Pereira e Gonçalves, 2017)

Arame-eletrodo AWS ER70S-6				
Composição química %				
C: 0,10	Si: 0,98	Mn: 1,48	P: 0,012	S: 0,011
Propriedades mecânicas				
L.E. (MPa)		L.R. (MPa)	Alongamento (%)	
525		580	29	

3.4.6. Planejamento Experimental

Como neste processo foram avaliados os quatro modos de transferência metálica, foi conveniente fazer um planejamento experimental para cada modo avaliado, uma vez que as variáveis analisadas podem ser modificadas com a mudança nos processos. No modo curto-círcuito convencional os testes foram feitos em dois níveis de tensão (18 e 20 V), em dois níveis de velocidade de alimentação (aproximadamente 2,5 e 4 m/min) e com a utilização de dois diferentes gases de proteção (CO_2 e Ar+25% CO_2), resultando em 8 grupos de ensaios e um total 32 medições, uma vez utilizados os mesmos pontos do corpo humano mencionados nos processos anteriores, conforme mostra a Tab. 3.9.

Tabela 3.9 - Planejamento experimental para a soldagem GMAW curto-círcuito convencional.

Ensaio	Nível de tensão (V)	Velocidade de Alimentação (m/min)	Gás	Ponto de medição			
				(1)	(2)	(3)	(4)
1	18,0	2,5	Ar+25% CO_2	(1)	(2)	(3)	(4)
2	18,0	4,0	Ar+25% CO_2	(1)	(2)	(3)	(4)
3	20,0	2,5	Ar+25% CO_2	(1)	(2)	(3)	(4)
4	20,0	4,0	Ar+25% CO_2	(1)	(2)	(3)	(4)
5	18,0	2,5	CO_2	(1)	(2)	(3)	(4)
6	18,0	4,0	CO_2	(1)	(2)	(3)	(4)
7	20,0	2,5	CO_2	(1)	(2)	(3)	(4)

8	20,0	4,0	CO ₂	(1)	(2)	(3)	(4)
---	------	-----	-----------------	-----	-----	-----	-----

No modo curto-círcito controlado não há como determinar o valor da tensão como parâmetro inicial de trabalho. Logo, esses ensaios foram feitos nos dois níveis de velocidade de alimentação e com os dois tipos gases de proteção empregados nos ensaios com curto-círcito convencional. Foram um total de 4 grupos de ensaios e 16 medições assim como é apresentada na Tab. 3.10.

Tabela 3.10 - Planejamento experimental para a soldagem GMAW curto-círcito controlado.

Ensaio	Velocidade de Alimentação (m/min)	Gás	Ponto de medição			
			(1)	(2)	(3)	(4)
1	2,5	Ar+25%CO ₂	(1)	(2)	(3)	(4)
2	4,0	Ar+25%CO ₂	(1)	(2)	(3)	(4)
3	2,5	CO ₂	(1)	(2)	(3)	(4)
4	4,0	CO ₂	(1)	(2)	(3)	(4)

Para o ensaio com modo de transferência gótica foram regulados dois níveis de tensão (35 e 40 V), em dois níveis de velocidade de alimentação (6 e 7 m/min). Em todos os ensaios foi utilizado o mesmo gás de proteção Ar+8%CO₂. Neste caso, portanto, foram feitas 16 medições em 4 grupos de experimentos (Tab. 3.11).

Tabela 3.11 - Planejamento experimental para a soldagem GMAW gótica.

Ensaio	Nível de tensão (V)	Velocidade de Alimentação (m/min)	Ponto de medição			
			(1)	(2)	(3)	(4)
1	35,0	6,0	(1)	(2)	(3)	(4)
2	35,0	7,0	(1)	(2)	(3)	(4)
3	40,0	6,0	(1)	(2)	(3)	(4)
4	40,0	7,0	(1)	(2)	(3)	(4)

O último grupo de experimentos, referente ao modo de transferência pulsado, foi realizado em dois níveis de velocidade de alimentação (aproximadamente 2,5 e 4 m/min) com dois gases de proteção (Ar+8%CO₂ e Ar+2%O₂), resultando em 4 grupos de experimentos e 16 medições (Tab. 3.12). Neste caso não é possível determinar os valores de tensão como condição inicial do experimento.

Tabela 3.12 - Planejamento experimental para a soldagem GMAW pulsado.

Ensaio	Velocidade de Alimentação (m/min)	Gás	Ponto de medição			
			(1)	(2)	(3)	(4)
1	2,5	Ar+8%CO ₂	(1)	(2)	(3)	(4)
2	4,0	Ar+8%CO ₂	(1)	(2)	(3)	(4)
3	2,5	Ar+2%O ₂	(1)	(2)	(3)	(4)
4	4,0	Ar+2%O ₂	(1)	(2)	(3)	(4)

3.5. Medição de campo eletromagnético para soldagem RSW

A medição do campo eletromagnético gerado no processo de soldagem RSW foi feita utilizando as duas versões do processo, corrente contínua (MFDC) e corrente alternada (AC), sendo necessária a utilização de dois equipamentos distintos para realização das soldagens nestas versões. As características desses equipamentos e dos insumos utilizados nos procedimentos são descritas a seguir.

3.5.1. *Equipamentos*

O equipamento de soldagem (AC) é composto por um transformador (Soltronic HT75, 2 MF, 440 V, 75 kVA, 170 A no circuito primário), um controlador (Fase soldatura com potencial nominal de 54 kVA) e uma pinça de soldagem pneumática (pressões entre 730 e 2740 N) refrigerada a água (Fig. 3.9). O equipamento para soldagem (MFDC) é composto de um transformador (Bosch PSG 3100), um controlador (Bosch PSI6100.100L) e uma pinça de soldagem pneumática (pressões entre 660 e 3700 N) refrigerada a água (Fig. 3.10).

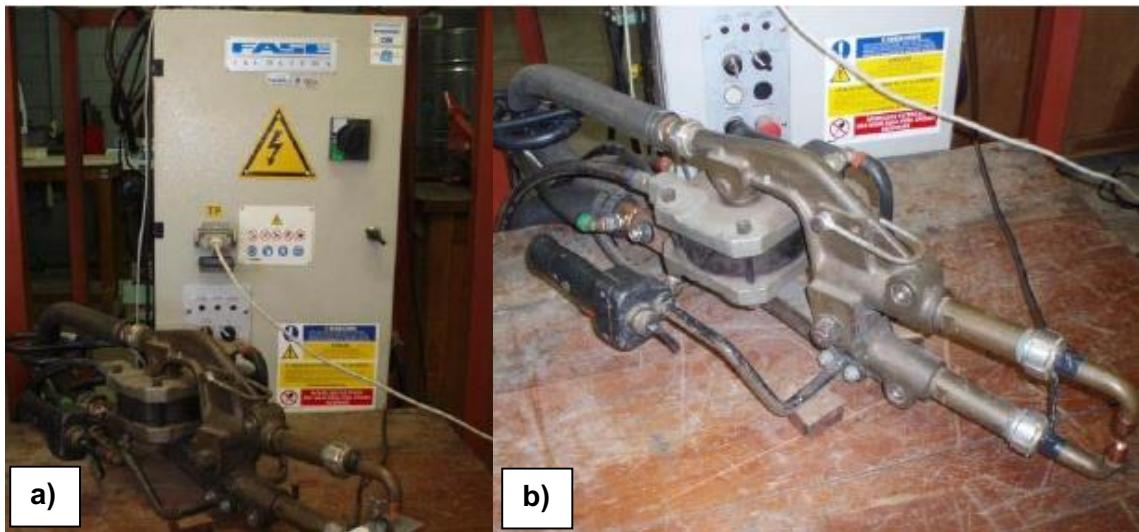


Figura 3.7 - Controlador (a) e pinça de soldagem pneumática (b) do equipamento de soldagem por corrente alternada (AC).

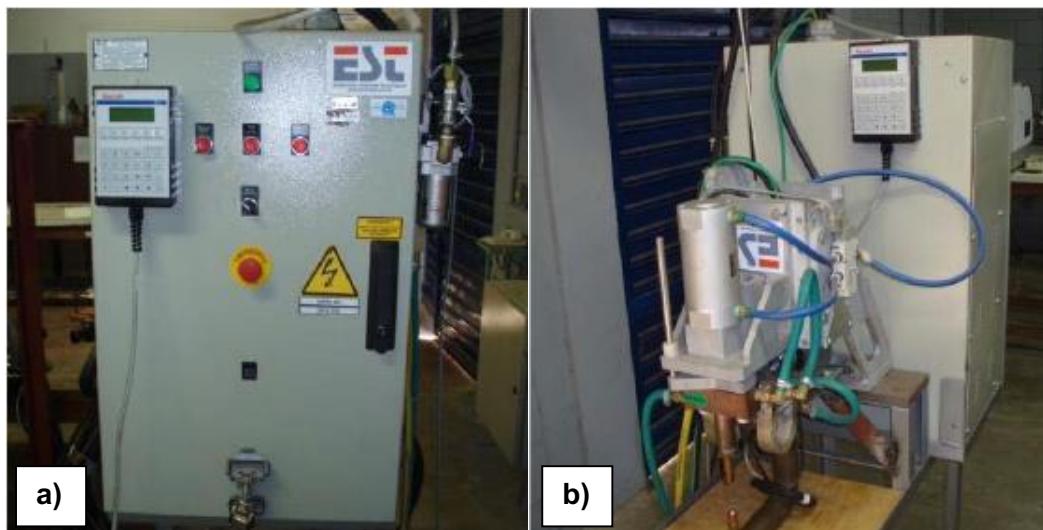


Figura 3.8 - controlador (a) e pinça de soldagem pneumática (b) do equipamento de soldagem por média frequência corrente contínua (MFDC)

3.5.2. Medição de sinais elétricos

Nestes ensaios as medidas de sinais elétricos, tensão e corrente de soldagem, foram feitas com medidores portáteis. Para a tensão foi usado um voltímetro *true rms* e para corrente de soldagem um analisador *Miyachi MM-315 A* com bobina toroidal (Fig. 3.11). Estes equipamentos são capazes de realizar medições tanto para o modo AC quanto MFDC.

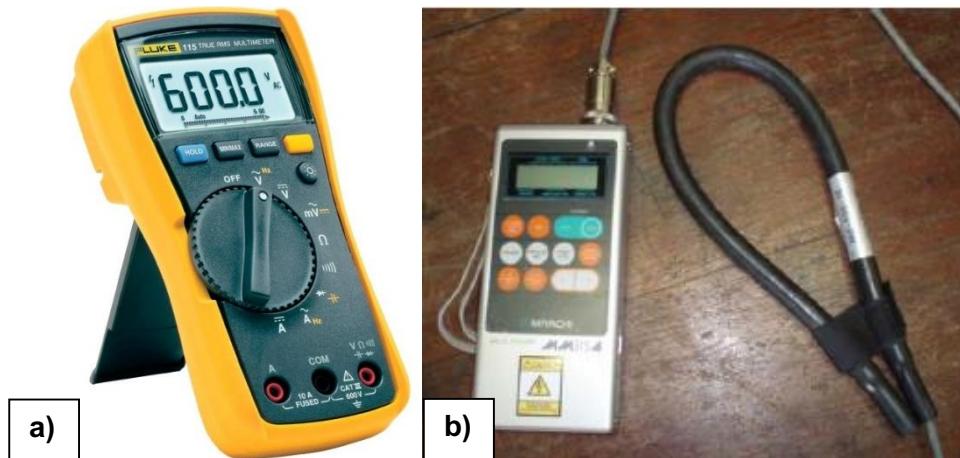


Figura 3.9 - Equipamentos usados para as medições de tensão (a) e corrente (b) nos processos de soldagem por resistência.

3.5.3. Materiais utilizados

Os ensaios de soldagem por resistência foram realizados com aços de alta resistência Dual-Phase 600, cuja composição química e propriedades nominais são apresentadas na Tab. 3.13 (Ramazani et al. 2016), não revestidos e revestidos por galvanização. A utilização desse tipo de aço se dá em função da aplicabilidade comum em trabalhos da literatura, como por exemplo o estudo realizado por Rosa (2013), segundo o qual no processo de galvanização, o revestimento resultante pode conter até 90% de zinco e 10% de ferro em sua composição. As placas foram cortadas na guilhotina nas dimensões 120 mm x 40 mm x 1,2 mm. As rebarbas foram aparadas e antes da realização dos testes as chapas foram limpas com auxílio de um pano seco.

Tabela 3.13 - Composição química e propriedades nominais do aço Dual-Phase 600 (Ramazani et al. 2016; Silveira, 2015)

Aço Dual-Phase 600				
Composição química %				
C – 0,14	Si – 0,48	Mn – 1,49	P – 0,009	S < 0,001
Propriedades mecânicas				
L.E. (MPa)	L.R. (MPa)	Alongamento (%)	Soldabilidade	
360	650	26	Boa	

3.5.4. Planejamento experimental

Os parâmetros operacionais para realização dos processos de soldagem por resistência a ponto foram extraídos do trabalho de Rosa (2013). O planejamento experimental para as soldagens com resistência a ponto é mostrado na Tab. 3.14. Todas as soldagens foram feitas com duração de 0,5 segundos numa frequência de 60 Hz. Os testes foram feitos nas duas versões do processo (AC e MFDC) em duas faixas de corrente (3 kA e 6 kA) com dois tipos de materiais (aço Dual-Phase 600 sem galvanização e galvanizado), extraíndo um total de 8 grupos de experimentos e 32 medições nas mesmas regiões avaliados nos processos de soldagem a arco.

Tabela 3.14 - Planejamento experimental para a soldagem por resistência a ponto.

Ensaio	Versão do processo	Nível de corrente (kA)	Material	Ponto de medição			
				(1)	(2)	(3)	(4)
1	AC	3,0	Sem galvanização	(1)	(2)	(3)	(4)
2	AC	6,0	Sem galvanização	(1)	(2)	(3)	(4)
3	AC	3,0	Galvanizado	(1)	(2)	(3)	(4)
4	AC	6,0	Galvanizado	(1)	(2)	(3)	(4)
5	MFDC	3,0	Sem galvanização	(1)	(2)	(3)	(4)
6	MFDC	6,0	Sem galvanização	(1)	(2)	(3)	(4)
7	MFDC	3,0	Galvanizado	(1)	(2)	(3)	(4)
8	MFDC	6,0	Galvanizado	(1)	(2)	(3)	(4)

3.6. Avaliação de campos eletromagnéticos por simulação computacional

3.6.1. Construção do modelo computacional

Para fins de avaliação da interação entre os campos eletromagnéticos e o ser humano, os modelos computacionais são definidos como modelos de dosimetria por expressarem a relação entre o ambiente de exposição e a quantidade de corrente induzida por campos eletromagnéticos (WHO, 2007). Esses modelos seguem os mesmos propósitos da avaliação experimental no que se refere a identificação dos cenários de exposição, da quantificação dos campos eletromagnéticos e dos possíveis efeitos biológicos.

Modelos de campos eletromagnéticos foram utilizados até mesmo para elaboração das primeiras diretivas da ICNIRP e pelo IEEE. Tais modelos eram bastante simplificados. A ICNIRP calculou as densidades de corrente induzidas por campos eletromagnéticos através de um modelo de laço (*loop*) diretamente da Lei de Faraday para representar o corpo humano, enquanto o IEEE utilizou modelos de indução elípticos (representativas das regiões da cabeça e tronco) para associar o campo elétrico *in situ* com o campo eletromagnético externo. Esses modelos foram rapidamente ultrapassados por outros modelos realísticos heterogêneos de melhor resolução, implementados em virtude do aumento da capacidade computacional e a eficiente implantação dos métodos numéricos (Silva, 2009).

Além disso, Silva (2009) ressalta que as soluções analíticas estão limitadas a um número restrito de geometrias simplificadas e que para excluir a necessidade de compatibilizar a complexidade do corpo humano com as soluções analíticas disponíveis, a dosimetria computacional foi desenvolvida, influenciada pelo progresso da capacidade computacional e pela disponibilidade de imagens médicas de diversos segmentos do corpo humano que permitiram a diferenciação de tecidos e órgãos. No entanto, cabe lembrar que a utilização de modelos complexos deve estar aliada a real necessidade do estudo, uma vez que demandam refinadas técnicas computacionais.

Os modelos computacionais para avaliação de campos eletromagnéticos envolvem, na grande maioria dos casos, os métodos de diferenças finitas e elementos finitos, sendo que o método de elementos finitos mais simples e que demanda um menor custo computacional, sendo até mesmo utilizado no desenvolvimento de pacotes computacionais em centros de pesquisa de eletromagnetismo. O método de diferenças finitas é mais realístico e se aproxima mais de modelos anatômicos complexos do corpo humano, no entanto, pelo fato de requerer maiores recursos computacionais, esse modelo só deve ser utilizado em situações em que se deseja investigações mais detalhadas das interações de campos eletromagnéticos com o organismo humano.

3.6.2. *Modelo magnetostatic*

Em função dos objetivos proposto nesse estudo e em consonância com a metodologia experimental para avaliação de campos eletromagnéticos emitidos nos processos de soldagem a arco e por resistência a ponto, o modelo computacional foi no desenvolvido no software comercial ANSYS® *Workbench* no pacote específico, denominado *Magnetostatic*, para problemas que envolvam eletromagnetismo. O programa contempla os fenômenos eletromagnéticos solucionados através das equações de Maxwell e das Leis de Ampère, Lei

de Gauss Magnética, Lei de Faraday e Lei de Gauss Elétrica. O conjunto de equações que compõe esse pacote computacional é melhor detalhado no anexo A deste documento.

Os conceitos supracitados são também utilizados pelos institutos IEEE e ICNIRP na formulação de diretris destinadas a limitação da exposição de trabalhadores a campos eletromagnéticos. Pelo fato desses institutos produzirem documentos de referência internacional, os valores estanques recomendados pela ICNIRP são utilizadas como parâmetros comparativos entre os valores de campos eletromagnéticos obtidos nesse estudo e aqueles estabelecidos por essas diretris. Dessa forma, a utilização do pacote *magnetostatic* do ANSYS® se torna adequada ao cumprimento dos objetivos propostos nesse trabalho.

O software utiliza o método de elementos finitos que, no caso desse trabalho, melhor atende aos objetivos propostos e por demandar o menor custo computacional, em virtude da simplicidade dos modelos. O pacote computacional contém um menu (Fig. 3.12) com todas as etapas necessárias à solução do problema e envolvem a construção de um banco de dados contendo os materiais que serão utilizados no modelo e suas propriedades magnéticas (*Engineering Data*), a elaboração de uma geometria (*Geometry*), a geração de malhas de elementos finitos para o modelo geométrico proposto (*Model*), cuja metodologia pode variar em função do nível de complexidade do problema, a definição de parâmetros físicos do modelo (*Setup*) e a solução e apresentação dos resultados de interesse (*Solution* e *Results*).

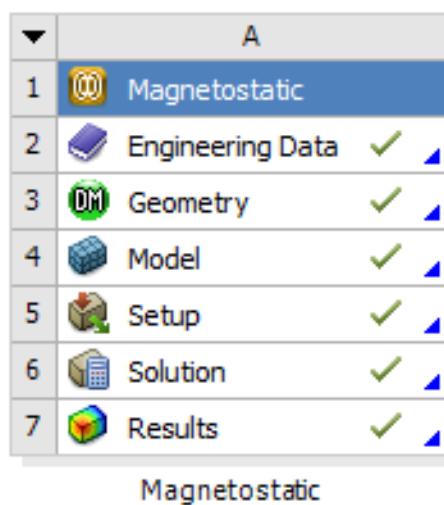


Figura 3.10 - Menu do programa *magnetostatic* do software ANSYS® *Workbench*

O ponto de partida para a obtenção dos resultados numéricos, foi a elaboração do modelo que melhor representasse as condições experimentais desenvolvidas no trabalho. Para tanto foram construídos modelos simplificados, envolvendo menor quantidade de

materiais, elementos e propriedades, mas passando por todas as etapas descritas no menu com o objetivo de entender os possíveis erros e os mecanismos envolvidos na obtenção dos resultados e, dessa forma, construir modelos mais próximos das condições experimentais.

Como pode ser observado na Fig. 3.13 os elementos foram adicionados gradativamente de modo a entender a interferência de cada um deles na solução geral do problema. Na Fig. 3.13 - a, é mostrado um modelo inicial contendo apenas uma vareta de diâmetro semelhante aos eletrodos empregados nos processos de soldagem, de modo a simular o eletrodo por onde passa a corrente elétrica e a chapa de aço com as dimensões utilizadas nos experimentos posicionada de modo a obter uma altura de arco próxima àquela estabelecida em alguns procedimentos experimentais.

Para o correto funcionamento do modelo, é necessário que os elementos estejam delimitados por um sólido geométrico definido para que seja estabelecido o fluxo magnético. Essa necessidade representa a primeira condição contorno do modelo. A segunda condição contorno exigida para o modelo é a determinação de um elemento por onde seja transportada a corrente elétrica capaz de gerar campo eletromagnético. No caso específico da simulação para processos de soldagem a arco, a corrente foi estabelecida através dos eletrodos, bem como ocorre no processo. A corrente que atravessa os cabos de soldagem não foi representada nessa modelagem, uma vez que o foco do trabalho está nos campos eletromagnéticos gerados na região do arco elétrico, por ser essa região mais próxima ao soldador em processos manuais.

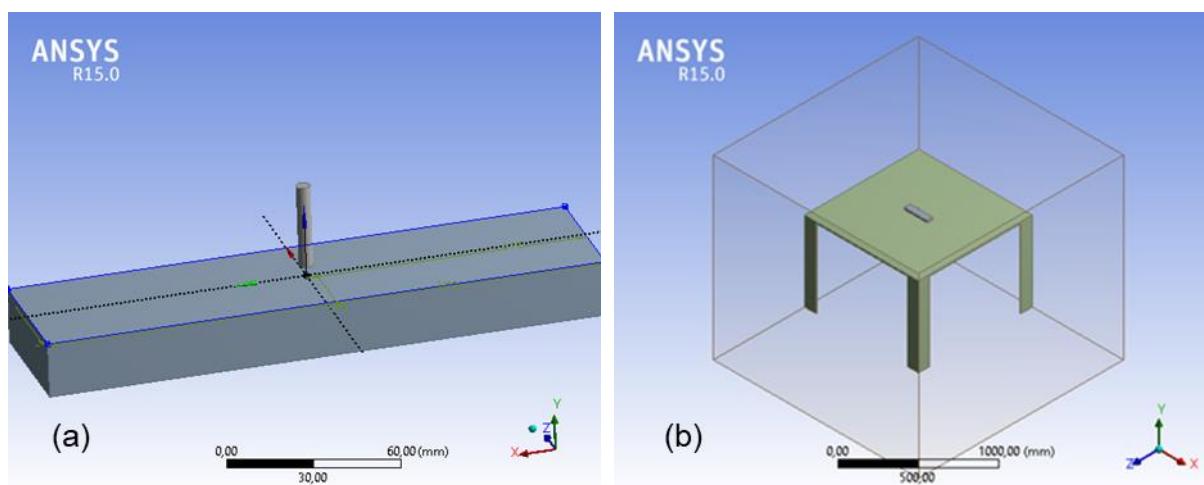
Dessa forma, na Fig. 3.13 - b, é ilustrada essa limitação na forma de uma caixa preenchida por ar, podendo ser esse preenchimento feito por outros elementos dependendo do tipo das características do processo de soldagem estudado. Nesse modelo foi adicionada a mesa para testes em dimensões similares àquela usada nos experimentos. Por fim, o último elemento introduzido ao modelo foi o soldador (Fig. 3.13 - c), confeccionado pela composição de sólidos geométricos definidos, mas com dimensões semelhantes às do corpo humano inspirados no estudo de Canova et al. (2010).

Cabe ressaltar que a passagem de um modelo para o outro foi realizada após a execução de testes preliminares em cada modelo, fazendo passar pelo eletrodo uma corrente elétrica de modo semelhante ao que ocorre no processo de soldagem, com o objetivo de garantir que o modelo anterior estava isento de erros e, dessa maneira, possibilitar a introdução dos novos elementos e a identificação dos possíveis erros oriundos da nova geometria ou das condições de contorno. O modelo mostrado na Fig. 3.13 - c é, portanto, o modelo proposto para a realização das simulações envolvendo a geração de campo eletromagnético nos processos de soldagem a arco.

No caso da soldagem por resistência foi realizada uma adaptação ao modelo proposto para soldagem a arco com a introdução de elementos geométricos definidos confeccionados do mesmo modo do restante do modelo. Esses novos elementos introduzidos têm por finalidade representar uma máquina de soldar por resistência a pontos, com características aproximadamente realísticas. Além disso, foram reproduzidas as condições experimentais de posicionamento do soldador em frente a máquina de soldagem por resistência (Fig. 3.13 - d), bem como sugere o trabalho de Canova et al. (2010).

Conforme pode ser observado no modelo proposto para simulações computacionais, há uma aproximação entre os elementos adicionados ao modelo e os equipamentos e acessórios necessários à execução dos processos de soldagem. No que diz respeito ao foco de medição de campos eletromagnéticos, esse estudo, centrou-se em regiões próximas ao arco elétrico e ao corpo do soldador.

Partindo desse ponto, as condições de contorno necessárias aos modelos propostos em coerência com as equações de estimativa de densidade de campo eletromagnético referem-se à determinação da faixa de corrente transportada pelo eletrodo, da geometria dos eletrodos e chapas de teste, da distância entre o eletrodo e a peça (ou a altura de arco, no caso da soldagem com Eletrodo Revestido) e da permeabilidade magnética dos elementos que compõem o modelo. O diâmetro dos eletrodos e a dimensão das chapas de testes foram as mesmas utilizadas durante os experimentos. A faixa de corrente estipulada para cada teste de simulação é a mesma empregada durante os experimentos, tanto para correntes contínuas, quanto alternadas, como é o caso da soldagem TIG em ligas de alumínio. O mesmo se aplica à distância entre o eletrodo e a peça ou a altura de arco correspondente.



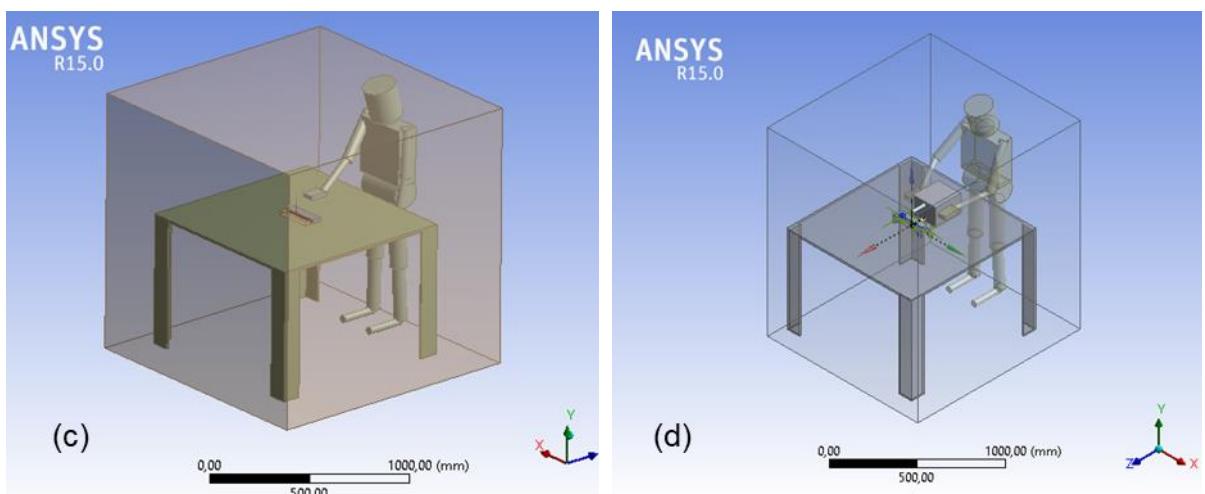


Figura 3.11 – Evolução dos modelos computacionais: a – Modelo fio condutor; b – Modelo ambiente de soldagem; c - Modelo para soldagem a arco; d – Modelo para soldagem por resistência

3.6.3. Estimativa de propriedades magnéticas

A dificuldade na determinação dos parâmetros necessários à simulação computacional, centrou-se na estimativa da permeabilidade magnética para alguns componentes do modelo, em virtude da inexistência desses dados na literatura. Sendo assim, algumas considerações precisaram ser realizadas de modo que o modelo se aproximasse das condições experimentais. Para todos os processos de soldagem foi considerado que a mesa para soldagem é feita de aço estrutural comercial com permeabilidade magnética teórica (μ) de 1000 (Leite, 2014) e para o corpo humano permeabilidade magnética de 1 (mesma que a do ar), pois segundo Silva (2009) é importante considerar que não existe perturbação do campo eletromagnético externo pelo corpo humano, uma vez que as linhas de fluxo penetram sem attenuação de modo semelhante ao que ocorre no ar.

No caso do processo Eletrodo Revestido, os testes foram feitos em chapas de aço carbono ABNT 1020, cujo valor de μ corresponde a 906,6 (Mozetic, 2008). Não foram encontrados na literatura o valor da permeabilidade magnética para os aços constituintes da alma dos eletrodos revestidos, sendo necessária a criação de uma metodologia para estimativa desse parâmetro.

Levando em consideração a composição química dos aços desses eletrodos, segundo (Pinho, 2009), cerca de 98 a 99% dela é composta por ferro (Fe) ($\mu = 8000$), a menor porcentagem refere-se a elementos como silício (Si), manganês (Mn) e carbono (C), cujos valores de permeabilidade magnética são insignificantes, quando comparados ao do ferro. Nesse sentido, considera-se que as variações no teor de ferro podem afetar os valores de

permeabilidade magnética e, por essa razão, para esses aços, os valores de μ foram definidos em função do percentual de ferro em sua composição, utilizando como referência o valor de permeabilidade magnética de um aço (aço carbono ABNT 1020), cujos valores de permeabilidade magnética e percentual de ferro já são estabelecidos pela literatura.

Desse modo, utiliza-se os valores de permeabilidade magnética e composição do aço de referência e determina-se o valor de permeabilidade magnética do aço componente do eletrodo a partir da relação proporcional entre o percentual de ferro e o valor da permeabilidade magnética desse aço de referência. Para exemplificar e deixar claro essa linha de raciocínio, toma-se primeiramente os valores percentuais de ferro na composição da alma dos eletrodos (Fortes, 2005) contidos na Tab. 3.15.

Para determinação da permeabilidade magnética relativa da alma de um eletrodo E6010, por exemplo, que possui 99,32% de ferro em sua composição, deve estabelecer uma relação proporcional comparativa entre esse percentual e o percentual de ferro contido no aço de referência (aço carbono ABNT 1020 com percentual de ferro de entre 98 e 99% em sua composição e valor de μ igual a 906,6) com o valor da permeabilidade magnética relativa desse aço de referência. Dessa forma, obtém-se o valor desejado de μ do aço componente da alma do eletrodo. Seguindo o raciocínio proposto, os valores de permeabilidade magnética relativa das almas dos eletrodos empregados nesse trabalho são mostrados também na Tab. 3.15 juntamente com os percentuais de ferro presentes na composição desses eletrodos.

Para estimar esse parâmetro nos revestimentos dos eletrodos foram também estudadas suas composições químicas em função dos elementos capazes de causar modificações significativas na permeabilidade magnética do meio. De acordo com Fortes (2005), há na composição dos eletrodos celulósico, básico e rutílico, vários elementos adicionados em maior percentual que o ferro. No entanto ao investigar a permeabilidade magnética desses elementos, nota-se que seu valor é desprezível quando comparados ao do ferro. Pouco maior que 1 no caso dos elementos paramagnéticos e pouco menor que 1, no caso dos diamagnéticos. Logo, espera-se que utilizar o percentual de ferro como referência é a medida mais razoável para estimar as diferenças entre as permeabilidades magnéticas de revestimentos.

No caso específico dos revestimentos, também não há na literatura um valor para ser utilizado como referência. Sabe-se, no entanto, que o revestimento é decomposto durante o processo de soldagem modificando a atmosfera local. Desse modo, é calculada a média ponderada entre os percentuais de pó de ferro presentes no revestimento e sua permeabilidade magnética conhecida e o percentual restante de ar, cujo o valor de permeabilidade magnética se aproxima dos valores dos demais componentes do revestimento ($\mu = 1$). Assim, para um revestimento celulósico, por exemplo, que apresenta entre 0 e 10%

de ferro (Fortes, 2005), considera-se que a atmosfera criada durante a soldagem apresenta permeabilidade magnética aproximadamente igual a média ponderada entre o 10% de pó de ferro ($\mu = 8000$) e 90% de ar ($\mu = 1$). Segundo esta metodologia, determina-se os valores de permeabilidade magnética para os eletrodos e seus revestimentos (Tab. 3.15)

Tabela 3.15 – Estimativa da permeabilidade magnética da alma e do revestimento de eletrodos

Eletrodo	% Fe da alma	μ da alma	% Fe do revestimento	μ do revestimento/atmosfera
E 6010	99,32	909,35	10	8,01
E 6013	99,35	909,62	40	32,01
E 7018	98,13	898,45	25	20,01

Para as simulações da soldagem TIG foi preciso determinar os valores de permeabilidade magnética do eletrodo de tungstênio, dos materiais de base e dos gases de proteção. O eletrodo de tungstênio possui permeabilidade magnética relativa máxima igual a 12. No caso dos metais de base, foi preciso estimar o valor de μ , seguindo o mesmo critério utilizado para a alma dos eletrodos na soldagem com Eletrodo Revestido, também em virtude da ausência de dados na literatura. Assim o valor da permeabilidade magnética do aço inoxidável austenítico AISI 304 e do alumínio AA5052 são, respectivamente, 660,77 e 4,58.

No caso dos gases de proteção, Ashcroft e Mermin (1976) afirmam que os gases nobres são diamagnéticos, o que significa que os valores de permeabilidade magnética são muito próximos a 1, valor referente a permeabilidade magnética do ar. O mesmo acontece para os gases carbônico e oxigênio que, embora sejam respectivamente, diamagnético e paramagnético, também apresentam valores de μ próximos a 1. Sendo assim, foi considerada a permeabilidade relativa desses gases como o único valor para atmosfera local para o caso das soldagens TIG e MIG/MAG.

Além desses valores, foram registrados os valores de condutividade térmica desses gases como dados de entrada para as simulações (Sears et al. 1991; Tatagiba et al. 2012). No caso das misturas gasosas, foram feitas médias ponderadas de acordo com a porcentagem de cada componente na mistura. Na Tab. 3.16 são mostrados os valores de permeabilidade magnética e condutividade térmica dos gases de proteção utilizados nesse estudo.

Tabela 3.16 - Permeabilidade magnética e condutividade térmica dos gases de proteção

Gás	μ	Condutividade Térmica (mW/m.K)
Argônio (Ar)	0,999	16,4
Hélio (He)	0,999	142,6
CO ₂	0,999	14,7
O ₂	1,000	24,2

Acerca do processo MIG/MAG, ainda foi estimada a permeabilidade magnética para o arame eletrodo AWS ER70S-6, utilizando o mesmo critério das almas dos eletrodos revestidos, obtendo um valor de μ igual a 897, visto que seu percentual de ferro é aproximadamente 98% (Soeiro Junior et al. 2015). Segundo o mesmo raciocínio, foram obtidos os valores de μ para as chapas de aço dual phase galvanizado e sem galvanização, empregadas nos processos RSW, visto que embora as chapas galvanizadas possuem aproximadamente 90% de Zinco e 10% de Ferro compondo o seu revestimento (Rosa, 2013), o valor de μ para o zinco é aproximadamente 1, o que não interfere significativamente na permeabilidade magnética do meio.

Dessa forma, considerando o percentual de Ferro na composição das chapas de teste utilizadas no processo RSW, considerou-se o teor de 97,8% de Ferro para chapas sem galvanização (Ramazani et al. 2016; Silveira, 2015), obtendo-se o valor de μ igual a 895,4. No caso das chapas galvanizadas, o menor teor de ferro no seu revestimento reflete no baixo valor de μ estimado para esse tipo de chapa de teste ($\mu = 91,5$).

Por fim, mudanças no posicionamento do soldador foram realizadas em cada simulação de modo a aproximar o modelo das condições reais de soldagem observadas durante os experimentos e os valores pontuais de densidade de campo eletromagnético foram extraídos como resultado de uma média de cinco registros nas regiões especificadas (mão, tronco, cabeça e cintura), de modo análogo ao que foi realizado experimentalmente. Os testes realizados e, portanto, o emprego de cada uma dessas condições de contorno no ambiente virtual seguiu o mesmo planejamento experimental proposto para cada processo de soldagem afim de permitir uma comparação coerente entre os resultados experimentais e numéricos.

3.6.4. Convergência do modelo

De acordo com Silva et al. (2016) o método dos elementos finitos propõe a discretização da geometria em um determinado número de elementos de formas simples, resultando em uma malha com uma quantidade, ou densidade, de elementos por unidade de área. Esses elementos são definidos a partir da geometria em pontos, ou nós, a partir dos quais são gerados os elementos.

A malha de elementos pode representar uma geometria com maior ou menor precisão. Um aumento do número de nós e de elementos resultaria em uma representação mais precisa da forma ou curvatura da geometria e, portanto, em resultados mais próximos da realidade. Porém esse aumento no número de elementos eleva a quantidade de equações a serem conduzidas computacionalmente e o tempo de simulação e, por essa razão, é necessário que seja feito um estudo da real necessidade de modelos tão refinados em função dos resultados esperados.

Sob essa questão foram realizados testes de convergência do modelo a partir de um critério comum referente a medição de campo eletromagnético em um ponto específico localizado na mão do soldador oriundo de um teste correspondente ao primeiro experimento realizado: soldagem com eletrodo revestido (Soldagem com eletrodo celulósico, alta corrente e baixa altura de arco). Assim foram feitos alguns testes partindo de malhas grosseiras com poucos elementos e as refinando gradativamente afim de observar mudanças nos resultados e o tempo necessário à simulação.

Como critério de avaliação da qualidade da malha, serão extraídos os valores da média e desvio padrão, obtido do método *element quality* do próprio ANSYS®. Este método é um parâmetro de qualidade de malha, cujo princípio é a razão entre o volume e o comprimento de uma aresta do elemento, obtendo-se, dessa maneira, um valor entre 0 e 1, sendo este último referente a um quadrado ou cubo perfeito e o valor zero referente a um elemento de menor qualidade, representado por volumes negativos ou iguais a zero (Souza Junior, 2011). Gil (2015) acrescenta que quanto mais refinada estiver a malha, maior será o valor da média e menor o desvio padrão, sendo estimados os valores ótimos acima de 0,80 para média e abaixo de 0,09 para o desvio padrão, critérios utilizados como referência nesse trabalho.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste tópico são apresentados os resultados obtidos para todos os processos de soldagem estudados: os valores da tensão e da corrente adquiridos pelo sistema de aquisição, são revelados como forma inicial de verificar o correto andamento dos testes experimentais. Uma vez verificada a correta execução dos experimentos, o segmento desse capítulo consiste da análise dos resultados de campos eletromagnéticos obtidos por via experimental e por simulação computacional dentro do planejamento de testes estipulado com intuito de avaliar a proximidade entre esses resultados.

O conjunto de resultados adquiridos serviu de base para determinar da influência das variáveis estudadas em cada processo através da análise de variância (ANOVA) feita com o nível de significância de 95%. Isto significa que as variáveis consideradas significantes são aquelas cujo valor de p é igual ou menor que 5% (0,05). Os valores de campo eletromagnético obtidos foram posteriormente comparados com os limites de referência trazidos nas diretrizes mais atuais da ICNIRP afim de avaliar a exposição de soldadores aos campos eletromagnéticos.

No anexo B é apresentado um exemplo detalhado representando os valores médios das leituras de campos eletromagnéticos e a incerteza de medição correspondente a um ensaio de cada um dos processos de soldagem descritos, como forma de mostrar o procedimento de análise estatística realizado. Em virtude do elevado número de medições e ensaios realizados em cada um dos processos de soldagem mencionados, os resultados referentes aos valores de campos eletromagnéticos são apresentados nesse tópico apenas como uma média das cinco leituras realizadas experimentalmente e numericamente.

4.1. Convergência do modelo computacional

Antes de iniciar a discussão dos resultados referente a cada processo de soldagem, é preciso mostrar os resultados correspondentes ao teste de convergência de modelo, visto que os resultados mostrados a partir deste ponto serão experimentais e numéricos. Sendo assim, os dados extraídos desses testes estão dispostos na Tab. 4.1 onde se observa os dados da malha e os valores de campo eletromagnético extraídos na medição especificada no item 3.6.4 de onde se observa que a medida em que a malha se torna mais refinada aumente-se o número de elementos e de nós e do valor da média acompanhada da diminuição no desvio padrão.

É necessário ressaltar que modelos mais refinados exigem também um maior custo computacional, o que inviabiliza utilizar malhas mais refinadas, visto que muitos testes precisam ser realizados em concordâncias com o número de experimentos. Dessa forma, considerando um valor de medição específico, nota-se que não há mudanças apreciáveis a partir da malha 7, cujos valores de média e desvio padrão já são satisfatórios, considerando o critério recomendado por Gil (2015). Na Fig. 4.1 são reforçados os dados apresentados na Tab. 4.1 ao mostrar a curva praticamente estável quanto aos resultados a partir da referida malha.

Tabela 4.1- Dados estatísticos das malhas aplicadas ao refinamento do modelo computacional

Malha	N. de elementos	N. de nós	Média	Desvio padrão	Campo eletromagnético (mT)	Tempo de simulação (s)
1	12235	20825	0,587	0,019	0,112	20
2	15110	24208	0,695	0,019	0,129	22
4	28624	50699	0,723	0,015	0,136	20
3	44797	73963	0,769	0,015	0,144	36
5	44853	74043	0,776	0,014	0,187	47
6	73092	120700	0,798	0,012	0,199	89
7	153574	251946	0,805	0,012	0,202	137
8	243033	398071	0,806	0,011	0,202	214
9	432037	700645	0,808	0,011	0,203	556
10	2885337	4617665	0,829	0,009	0,203	4572

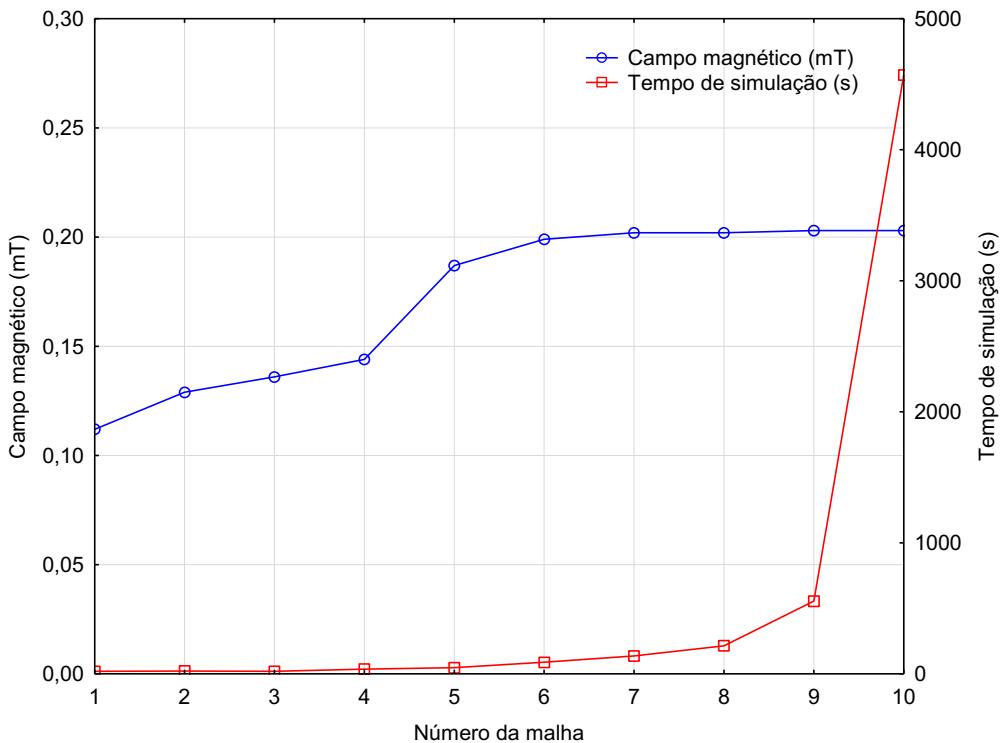


Figura 4.1 - Avaliação gráfica da convergência do modelo de simulação computacional

Assim, embora a malha número 7 já apresente resultados convergentes e com dados estatísticos considerados ótimos (Gil, 2015), a malha de número 8 foi escolhida para dar segmento com as simulações computacionais, por apresentar bons resultados estatísticos e já está inserida dentro de um intervalo de estabilidade da curva de convergência. Além disso, essa malha apresenta maior quantidade de elementos e tempo de simulação ainda é razoável quando comparado com a malha de número 7. Sendo assim, a sequência deste trabalho se dá na apresentação dos resultados obtidos por via experimental e por simulação computacional afim de averiguar a proximidade entre eles e realçar os dados obtidos nesse estudo.

4.2. Avaliação de campos eletromagnéticos para o processo SMAW

Para facilitar a compreensão e as análises dos resultados, os experimentos foram codificados de acordo com os parâmetros utilizados. O código é construído iniciando com a letra inicial maiúscula referente ao tipo de processo de soldagem (E para soldagem Eletrodo Revestido) e o número de ensaio, seguido do nível de corrente, depois pelo nível de altura de arco e por fim, pelo tipo de eletrodo empregado. No código a letra maiúscula indica a inicial do parâmetro experimental utilizado (Ex. Corrente, código C) e ao lado de cada letra maiúscula

o número representa o nível utilizado para aquele parâmetro ou o tipo, para o caso do parâmetro eletrodo. Assim, o primeiro experimento feito com nível baixo de corrente e de comprimento de arco utilizando-se eletrodo celulósico seria codificado de E1C1A1E1, conforme os códigos apresentados na Tab. 4.2.

Tabela 4.2- Codificações dos parâmetros experimentais para soldagem SMAW

Corrente – Código (C)	
Nível baixo (100 A) – Código (1)	Nível alto (150 A) – Código (2)
Comprimento do Arco – Código (A)	
Nível baixo (2 mm) – Código (1)	Nível alto (4 mm) – Código (2)
Eletrodos – Código (E)	
Celulósico – Código (1)	Rutílico (2)
	Básico (3)

O primeiro resultado destes ensaios diz respeito à aquisição dos dados elétricos, a qual revela o comportamento da tensão e da corrente durante os experimentos e confirma a faixa de corrente proposta na metodologia de 100 e 150 A para o nível alto e baixo, respectivamente, como mostra a Tab. 4.3 que traz os valores médios e eficazes mensurados para a tensão e corrente. Como pode ser observado pelos dados da Tab. 4.3, há grande uniformidade para a corrente de soldagem, fato esse justificado pelo emprego da característica estática da fonte do tipo corrente constante, ao passo que a tensão flutua conforme o comprimento do arco, diretamente relacionada com a habilidade do soldador.

Tabela 4.3 - Medidas de sinais elétricos para a soldagem SMAW

Ensaio (Código)	Corrente (A)		Tensão (V)	
	Média	RMS	Média	RMS
E1C1A1E1	97	97	25,0	25,6
E2C1A2E1	91	91	36,3	36,6
E2C2A1E1	149	149	30,0	31,1
E4C2A2E1	146	146	40,4	40,6
E5C1A1E2	101	103	19,0	19,5
E6C1A2E2	100	102	18,4	19,0
E7C2A1E2	149	149	22,8	23,0
E8C2A2E2	146	146	39,2	39,4
E9C1A1E3	96	98	22,1	22,6
E10C1A2E3	98	100	22,1	23,0

E11C2A1E3	149	149	26,3	27,0
E12C2A2E3	148	148	29,8	30,0

A respeito aos valores de corrente e tensão, somente no Ensaio E2C1A2E1 obteve-se uma menor corrente de soldagem, extrapolando uma faixa de tolerância de ± 5 A, que seria desejável. Entretanto, ainda se considera aceitável uma variação de 10 A, uma vez que será realizada a análise de variância (ANOVA) para avaliar todos os resultados provenientes dos processos de soldagem estudados. No caso da soldagem com Eletrodo Revestido serão avaliados a tensão, por se tratar de uma consequência do processo (fonte do tipo corrente constante), os valores de campo eletromagnético obtidos por experimentos (E) e por simulação (S).

Quanto aos valores de tensão, observa-se que a soldagem com eletrodo celulósico E6010 requer maior tensão, seguido do eletrodo básico E7018 e do eletrodo rutílico E6013. Esses dados refletem a estabilidade do arco que é menor na soldagem com eletrodo E6010 e maior na soldagem com o eletrodo E6013. A presença de rutila (TiO_2) no revestimento desse eletrodo proporciona maior estabilidade e consequentemente se torna mais fácil a soldagem manual, facilitando o controle de altura do arco, no caso de processos manuais (Leonelo Filho, 2005; Neves et al. 2013).

Verifica-se ainda que a tensão de soldagem é maior quando se emprega o maior nível de corrente e maior altura de arco, o que pode ser explicado em função da característica estática do arco. Quando a corrente de soldagem for maior que 50 A e o comprimento do arco maior que 1 mm (como é o caso desse trabalho), o aumento no valor da corrente e no comprimento do arco tende a aumentar o valor de tensão em função da ionização do arco, que ocorre em elevadas temperaturas. Arcos de maior comprimento trocam maior quantidade de calor com meio externo e por essa razão, requerem maiores níveis de tensão para que haja calor necessário à ionização de gases e manutenção do arco elétrico.

Dessa forma, uma vez que os resultados de tensão são coerentes com os registros da literatura, é possível afirmar que o processo foi conduzido corretamente e, portanto, é possível dar continuidade com as análises de campos eletromagnéticos obtidos nesses ensaios. No que se refere aos dados de simulação computacional, a análise de sinais elétricos não é cabível, visto que são parâmetros de entrada no modelo e não sofrem variações.

Na Tab. 4.4 são mostrados os níveis de significância (valor de p) das variáveis analisadas em função dos resultados esperados. Observa-se que no processo Eletrodo Revestido todas as variáveis analisadas foram significativas, tanto do ponto de vista experimental quanto numérico ($p \leq 0,05$) e, portanto, influenciam nos valores de campo eletromagnético observados.

Tabela 4.4 - Níveis de significância para análise dos resultados do processo SMAW

Variável	Nível de significância		
	Tensão	Campo eletromagnético (E)	Campo eletromagnético (S)
Média	0,00	0,00	0,00
Corrente	0,02	0,00	0,00
Altura do arco	0,04	0,00	0,03
Revestimento	0,06	0,02	0,02
Ponto de Medição	-	0,00	0,00

Os valores de campo eletromagnético obtidos nos testes experimentais e numéricos para a soldagem com Eletrodo Revestido são mostrados na Tab. 4.5, onde se percebe grande proximidade entre os resultados oriundos de ambas as metodologias e ainda que são mais coerentes com os valores registrados por Melton (2005), talvez pela semelhança entre as medições experimentais. Todavia, a realização de comparações mais específicas não é cabível, visto a ausência de informações operacionais no referido trabalho da literatura. Os valores registrados por Skotte e Hjollund (1997), durante o processo Eletrodo Revestido em corrente contínua são bem inferiores aos alcançados nesse trabalho.

Tabela 4.5 – Medidas de campo eletromagnético para a soldagem SMAW

Ensaios (Código)	Campo eletromagnético (E) (mT)				Campo eletromagnético (S) (mT)			
	(1)	(2)	(3)	(4)	(1)	(2)	(3)	(4)
E1C1A1E1	0,214	0,068	0,090	0,114	0,207	0,062	0,089	0,111
E2C1A2E1	0,168	0,065	0,085	0,107	0,162	0,065	0,083	0,097
E2C2A1E1	0,258	0,070	0,124	0,187	0,250	0,066	0,125	0,182
E4C2A2E1	0,241	0,065	0,097	0,144	0,244	0,069	0,097	0,146
E5C1A1E2	0,222	0,066	0,090	0,130	0,220	0,063	0,091	0,134
E6C1A2E2	0,195	0,064	0,087	0,124	0,209	0,069	0,083	0,126
E7C2A1E2	0,380	0,080	0,102	0,158	0,385	0,082	0,104	0,150
E8C2A2E2	0,300	0,070	0,102	0,150	0,314	0,063	0,108	0,154
E9C1A1E3	0,197	0,078	0,104	0,117	0,195	0,079	0,097	0,113
E10C1A2E3	0,183	0,073	0,087	0,109	0,192	0,077	0,085	0,115
E11C2A1E3	0,295	0,100	0,153	0,168	0,292	0,097	0,146	0,162
E12C2A2E3	0,268	0,087	0,143	0,163	0,288	0,082	0,145	0,173

Legenda: (1) Mão. (2) Cabeça, (3) Tronco e (4) Cintura

Esses resultados são melhor observados graficamente como é mostrado na Fig. 4.2, onde nota-se uma tendência referente a influência da corrente de soldagem na intensidade de campo eletromagnético. O resultado concorda com o enunciado da Lei de Biot-Savart, ao mostrar que a corrente de soldagem e a intensidade de campo eletromagnético são grandezas diretamente proporcionais, além de se mostrar coerente com os estudos de Melton (2005), Bolte e Pruppers (2006) e Ali (2012), onde também foi identificado que o uso de correntes mais elevadas conduz a geração de campos eletromagnéticos mais intensos.

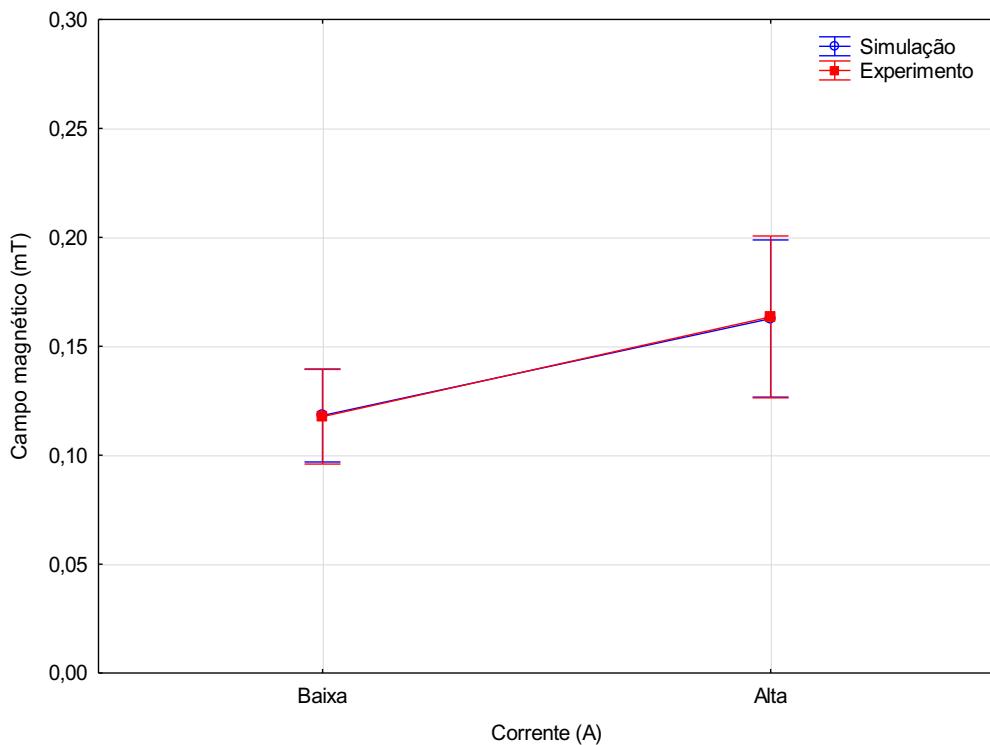


Figura 4.2 - Influência da corrente no valor de campo eletromagnético para o processo SMAW

Quanto ao comprimento do arco, a análise da lei de Biot-Savart mostra que o valor da densidade de campo eletromagnético (B) varia diretamente com o comprimento do arco e inversamente com o quadrado da distância do centro do arco até a extremidade do campo eletromagnético medido. Os resultados obtidos evidenciam essa teoria ao demonstrar que arcos mais curtos, com menor distância radial e mais próximos do eletrodo, revelam uma tendência em gerar maiores valores de densidade de campo eletromagnético (Fig. 4.3). Esse resultado sugere que a distância do centro do arco a extremidade do campo eletromagnético predomina com relação à distância longitudinal do arco quanto à influência no valor do campo eletromagnético, bem como supõe os trabalhos de Mair (2005) e Neris (2015).

A proximidade entre os resultados numéricos e experimentais reforçam essa discussão e contribuem com as teorias supostas por esses autores, uma vez que ao considerar um

processo manual com elevada instabilidade, os resultados puramente experimentais poderiam ser duvidosos, em função da dificuldade de controlar a altura do arco durante a soldagem, o que não se verifica durante as simulações computacionais.

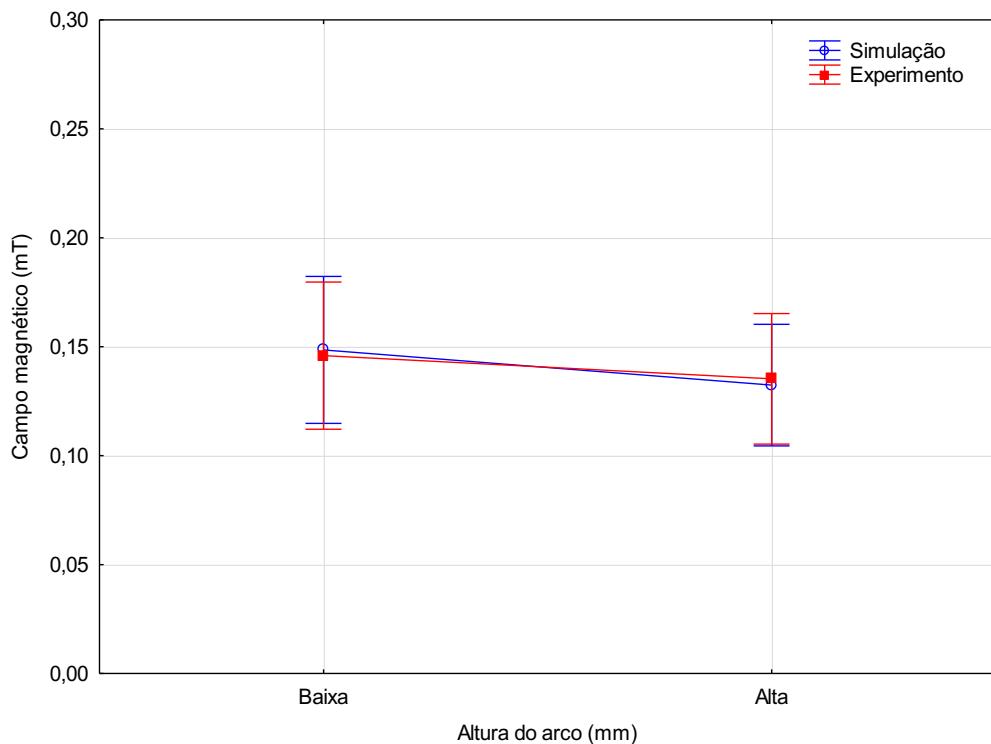


Figura 4.3 - Influência da altura do arco no valor de campo eletromagnético para o processo SMAW

Para melhor ilustrar essa justificativa, na Fig. 4.4 é apresentada uma comparação entre o campo eletromagnético gerado por dois arcos de comprimentos diferentes. Ao aproximar o medidor do campo eletromagnético a uma mesma distância (distância essa muito próxima ao arco elétrico, de aproximadamente 5 cm) de arcos de menor e maior comprimento é possível verificar que durante a soldagem com arcos de menor comprimento e menor distância radial um maior número de linhas de campo eletromagnético passará pelo medidor. No caso de soldagens com arcos de maior comprimento e maior distância radial, um menor número de linhas de campo passará pelo medidor. Sendo assim, é possível presumir que em soldagens onde se utiliza menor comprimento de arco, são observados valores maiores de densidade de campo eletromagnético, reforçando as suposições expostas nos trabalhos de Mair (2005) e Neris (2015).

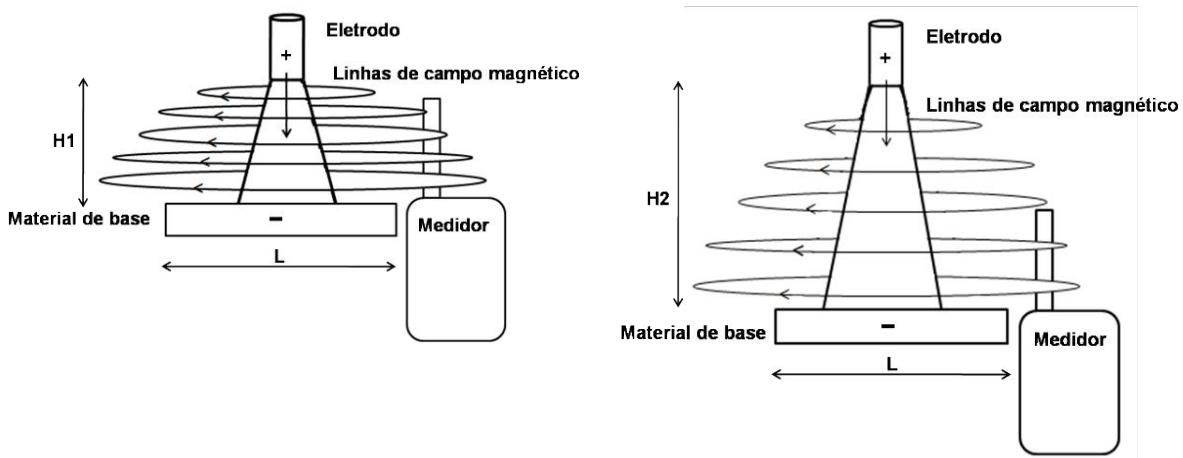


Figura 4.4 - Representação da densidade de campo eletromagnético em função da altura do arco de soldagem ($H_1 < H_2$)

No que se refere ao revestimento, os resultados são tendenciosos em mostrar que o campo eletromagnético oriundo da soldagem com o eletrodo celulósico é menor do que aquele gerado pelas soldagens com eletrodos rutílico e básico, nos quais não se observa diferenças apreciáveis (Fig. 4.5). Em virtude da ausência de dados na literatura que justifique tal comportamento, acredita-se que os menores valores de campo eletromagnético registrados na soldagem com eletrodo celulósico, ocorra em função da oscilação praticamente inexistente da corrente na soldagem com eletrodo celulósico, indicando uma transferência metálica sem curtos-circuitos. Desse modo é possível assumir que nesse caso o arco elétrico estaria maior, o que levaria a um menor campo eletromagnético, conforme explicado na Fig. 4.4. No entanto, para confirmar tal suposição seria necessário realizar filmagens em altas velocidades, mas que não são objetivos do presente estudo.

Sendo assim, considerando que durante a soldagem com Eletrodo Revestido há decomposição do revestimento que modifica a atmosfera local e que esse fato constitui uma condição de contorno durante a simulação computacional, o menor valor de campo eletromagnético registrado na soldagem com eletrodo celulósico pode ser atribuído aos elementos que compõem o seu revestimento.

Dentre os três tipos de revestimento considerados, o celulósico apresenta menor teor de pó ferro em sua composição, elemento este com valor de permeabilidade magnética relativa elevada e capaz de modificar a permeabilidade magnética da atmosfera local. Acredita-se, portanto, que por esta razão a permeabilidade magnética do meio estaria menor durante a soldagem com eletrodo celulósico e por isso foram registrados os menores valores de campo eletromagnético. Esta última suposição é mais apreciável na justificativa dos resultados encontrados para influência do revestimento na intensidade de campo eletromagnético e as considerações para a estimativa de propriedades dos revestimentos são

satisfatórias por não haver diferenças plausíveis entre os resultados experimentais e numéricos.

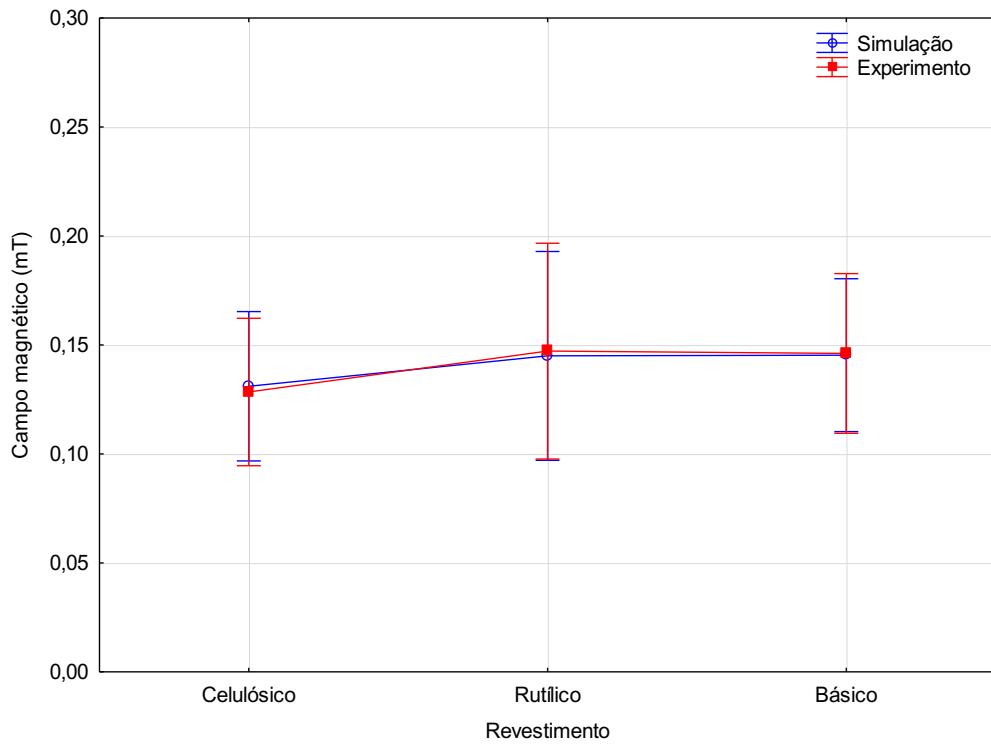


Figura 4.5 - Influência do revestimento do eletrodo no valor de campo eletromagnético para o processo eletrodo revestido.

Na Fig. 4.6 é apresentada a influência do ponto de medição no valor do campo eletromagnético. Pelo mesmo fato de que o campo eletromagnético aumenta inversamente com o quadrado da distância, quanto mais próximo do campo eletromagnético estiver o ponto de medição mais intenso este campo será. Logo, como pode ser observado na Fig. 4.6, o maior valor registrado foi na mão do soldador, semelhante ao que se observa nos resultados de Melton (2005) e Sachiko et al. (2011), pelo fato dele está segurando o porta-eletrodo, sendo este o ponto mais próximo ao campo eletromagnético gerado no processo, seguido da cintura, troco e cabeça, onde se encontra o menor valor de campo eletromagnético.

As diferenças observadas para as demais regiões do corpo, são elucidadas pela teoria de Dasdag et al. (2002) ao explicarem que o campo eletromagnético possuirá intensidades distintas em correspondência com as diferenças entre as distâncias entre a fonte de emissão de campo eletromagnético (o arco elétrico para esse estudo) e ponto de medição. No processo Eletrodo Revestido, o soldador tende a se afastar mais do arco elétrico, em função dos respingos gerados, o que causa menor valor de campo eletromagnético no tronco e na cabeça

e maior valor na cintura e na mão. A semelhança entre os resultados é um reflexo da reprodução da posição do soldador observada durante os experimentos no ambiente virtual.

A análise conjunta da Fig. 4.6 e da Tab. 4.5 permite avaliar também a exposição do soldador ao comparar os valores de campo eletromagnético obtidos no processo de soldagem SMAW com os limites estabelecidos pela diretiva do ICNIRP de 2009. Nesta análise foi verificado que o maior valor de campo eletromagnético registrado foi de 0,385 mT na mão do soldador durante a simulação e 0,380 mT para o mesmo ensaio em condição experimental, considerando a soldagem com corrente de 150 A, com comprimento de arco de 2 mm utilizando eletrodo rutílico (ensaio E7C2A1E2).

Os maiores valores observados nesse ensaio refletem as condições explicadas anteriormente, uma vez que reúne parâmetros experimentais que conduzem a maior densidade de campo eletromagnético. Adicionalmente, nenhum dos valores registrados por ambos os métodos ultrapassa o limite de exposição, que segundo esta diretiva é de 2000 mT para a cabeça e tronco e 8000 mT para os membros. No entanto, os valores encontrados entre 0,1 e 0,5 mT podem levar a mudanças no metabolismo do cálcio e possíveis supressão na produção de melatonina, de acordo com Desidério (2017).

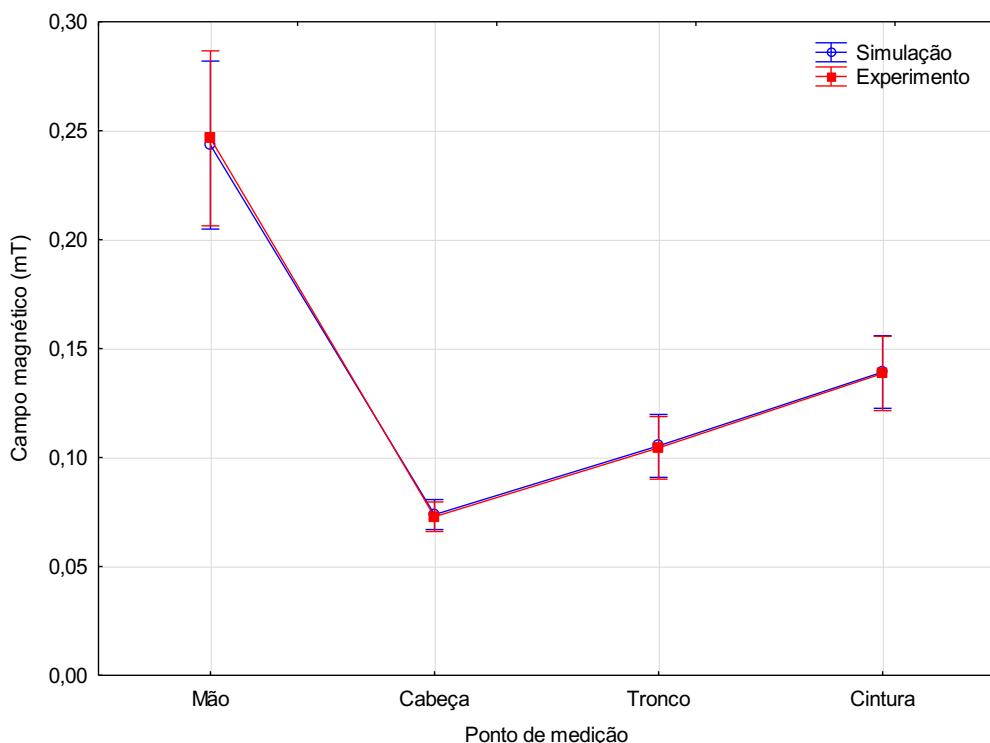


Figura 4.6 - Influência do ponto de medição no valor do campo eletromagnético para o processo Eletrodo Revestido.

Por fim, os resultados obtidos por simulação computacional não demonstram diferenças significativas quanto a distribuição de campo eletromagnético no ambiente de soldagem (Fig. 4.7). As principais diferenças são verificadas ao longo do eletrodo revestido, como pode ser observada na ampliação ilustrada na Fig. 4.7. Esse comportamento pode ser explicado pelo fato desse elemento transportar a corrente de soldagem e está conectado ao arco elétrico, realçando a discussão em que o ponto onde se registra maior campo eletromagnético ser a mão do soldador em virtude da necessidade de segurar o porta-eletrodo durante todo o processo e ser esse o ponto mais próximo da fonte de emissão de campo eletromagnético considerada nesse estudo (o arco elétrico).

Embora as diferenças mais apreciáveis se encontrem ao longo do eletrodo, essa não é uma região de interesse para esse estudo, cujo foco se dá ao monitoramento no corpo do soldador, onde há grande dificuldade em reproduzir as diferenças dos valores de campos eletromagnéticos em função das escalas de cores correspondentes. Nesse sentido, opta-se pela utilização de apenas uma imagem como exemplo para demonstrar a distribuição de campo eletromagnético para um mesmo processo de soldagem.

Destaca-se ainda que a má observação das diferenças de distribuição de campo eletromagnético ao longo do eletrodo deve-se ao fato de que seu diâmetro é muito inferior as dimensões dos demais componentes do modelo, o que reduz drasticamente a qualidade da imagem no processo de ampliação para visualização do eletrodo.

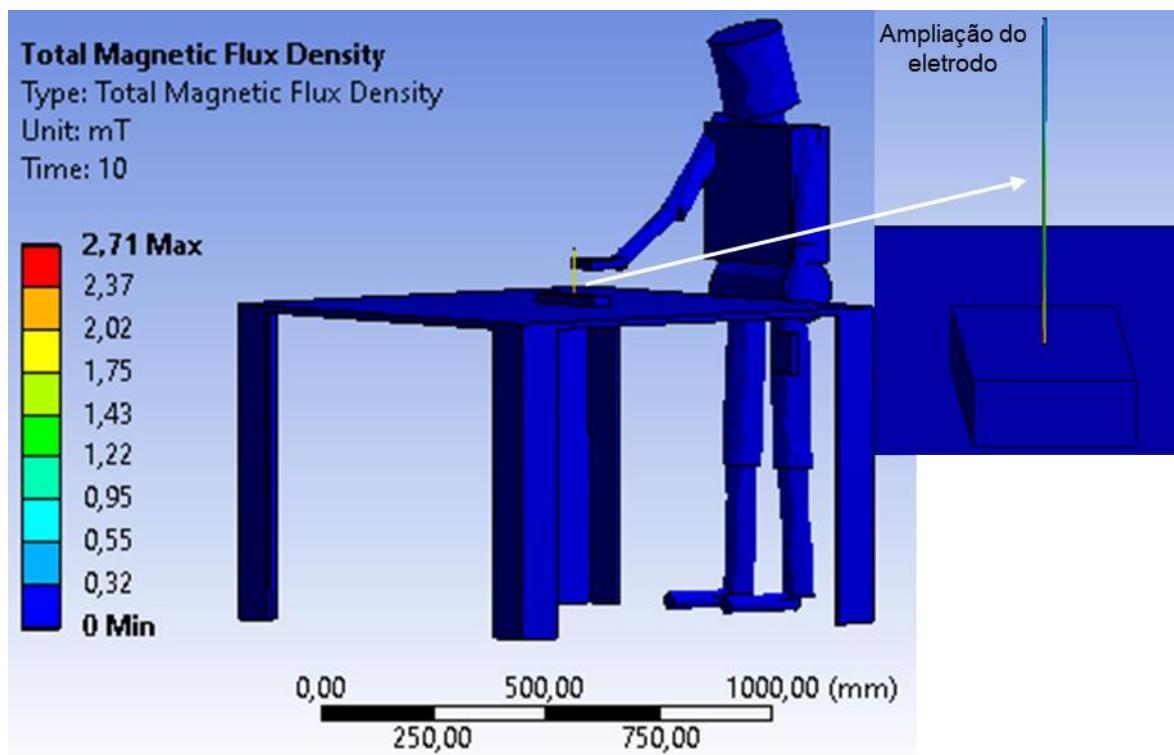


Figura 4.7 – Distribuição de campo eletromagnético para o processo SMAW

4.3. Avaliação de campos eletromagnéticos para o processo GTAW

No processo TIG (GTAW) os experimentos também foram codificados de acordo com os parâmetros utilizados. O código é construído iniciando com a letra inicial maiúscula do processo (T para soldagem TIG) e ao número de ensaio, seguido do tipo e material correspondente, depois pelo tipo e nível de corrente, em seguida pelo nível da distância eletrodo peça e por fim, pelo tipo de gás de proteção empregado. No código a letra maiúscula indica a inicial do parâmetro experimental utilizado (Ex. Corrente, código C) e ao lado de cada letra maiúscula há um número correspondente ao nível ou tipo do parâmetro, conforme é apresentado na Tab. 4.6.

Bem como explorado no processo SMAW, os valores dos sinais elétricos adquiridos, mostrados na Tab. 4.7, constituem os primeiros resultados do processo GTAW. Observa-se que todos os valores medidos se encontram dentro da faixa estabelecida no envelope experimental desse trabalho de 100 e 150 A com tolerância de ± 5 A. A maior diferença entre os valores de corrente média e *rms* ocorre nas soldagens em corrente alternada, conforme esperado em função do formato de onda característico para essa versão do processo.

Tabela 4.6 - Codificações dos parâmetros experimentais para soldagem GTAW

Material - Código (M)		
Aço carbono 1020 – Código (1)	Aço inoxidável austenítico AISI304 – Código (2)	Alumínio AA5052 – Código (3)
Corrente – Código (C)		
Corrente Continua (DC) – Código (1)	Corrente Alternada (AC) – Código (2)	
Nível baixo (100 A) – Código (1)	Nível alto (150 A) – Código (2)	
Distância Eletrodo - Peça – Código (D)		
Nível baixo (2 mm) – Código (1)	Nível alto (4 mm) – Código (2)	
Gás de Proteção – Código (G)		
Ar – Código (1)	Ar + 25% He (2)	

Os dados da Tab. 4.7 revelam que nas soldagens com aço carbono 1020 e aço inoxidável austenítico AISI 304, os valores de tensão são bastante próximos, o que reflete a grande semelhança na soldagem com esses materiais em modo corrente contínua, no que se refere à estabilidade do processo, bem como esperado para um processo TIG de alta qualidade (Peixoto, 2012). Os menores valores de tensão registrados na soldagem com alumínio podem ser atribuídos ao fato de que esse material possui baixo ponto de fusão e de vaporização, havendo durante a soldagem maior quantidade de metal vaporizado, o que

facilita a ionização do arco e, consequentemente reduz o valor da tensão. Uma comparação entre as soldagens com esses materiais não é cabível, em função da diferença entre os modos de corrente empregados (Mondenesi et al. 2012).

Tabela 4.7 - Medidas de sinais elétricos para a soldagem GTAW

Ensaio (Código)	Corrente (A)		Tensão (V)	
	Média	RMS	Média	RMS
T1M1C11D1G1	100	101	10,7	10,7
T2M1C11D2G1	99	99	12,8	12,8
T3M1C12D1G1	150	150	11,8	11,8
T4M1C12D2G1	150	150	13,2	13,2
T5M1C11D1G2	99	100	11,9	11,9
T6M1C11D2G2	99	99	12,6	12,6
T7M1C12D1G2	150	150	11,0	11,0
T8M1C12D2G2	150	150	12,7	12,7
T9M2C11D1G1	100	100	11,2	11,2
T10M2C11D2G1	99	99	12,9	12,9
T11M2C12D1G1	150	150	11,1	11,1
T12M2C12D2G1	150	150	12,7	12,7
T13M2C11D1G2	99	99	11,3	11,5
T14M2C11D2G2	99	99	12,0	12,1
T15M2C12D1G2	150	150	10,8	10,8
T16M2C12D2G2	149	149	13,1	13,1
T17M3C21D1G1	86	104	6,0	9,9
T18M3C21D2G1	85	102	9,8	14
T19M3C22D1G1	128	153	6,8	10,5
T20M3C22D2G1	127	153	10,0	14,3
T21M3C21D1G2	86	103	7,0	11,2
T22M3C21D2G2	86	103	7,8	11,6
T23M3C22D1G2	128	154	7,2	11,3
T24M3C22D2G2	127	153	9,2	13,4

A tensão revela-se maior em soldagens com maiores valores de corrente e distância eletrodo-peça (e consequentemente altura do arco) pelas mesmas razões apresentadas no processo anterior. Quanto ao gás de proteção, a análise de variância ANOVA demonstrou que

essa variável não é significativa no comportamento da tensão (Tab. 4.8), visto que apresenta um valor de p maior que 0,05. Este resultado se dá provavelmente pelo fato de que o comportamento global do arco em soldagem depende de outros fatores como as condições de dissipação de energia do arco para o ambiente e as características da região de queda catódica do arco elétrico.

Sendo assim, em vista da conformidade dos resultados de tensão com os dados registrados na literatura comum, as demais avaliações referentes aos resultados de campo eletromagnético podem ser realizadas para a soldagem GTAW. A Tab. 4.8 traz também os níveis de significância (p) relativos à influência das variáveis operacionais do processo na intensidade de campo eletromagnético oriundos de experimentos e de simulação computacional.

Tabela 4.8 – Níveis de significância para análise dos resultados do Processo GTAW

Variável	Nível de significância		
	Tensão	Campo eletromagnético (E)	Campo eletromagnético (S)
Média	0,00	0,00	0,00
Corrente	0,25	0,00	0,00
Distância eletrodo-peça	0,00	0,00	0,00
Gás de proteção	0,35	0,00	0,05
Material/Polaridade	0,00	0,00	0,00
Ponto de medição	-	0,00	0,00

Como demonstra a Tab. 4.8, todas as variáveis analisadas para a soldagem GTAW são significativas na geração de campos eletromagnéticos ($p \leq 0,05$). Os resultados obtidos são mostrados na Tab. 4.9, cuja observação permite afirmar que os valores encontrados são superiores àqueles mostrados no estudo de Bowman et al. (1988) e mais próximos aos resultados de Stuchly e Lecuyer (1989). No entanto, pela ausência de dados experimentais em ambos os trabalhos, torna-se impossível realizar uma comparação adequada.

Tabela 4.9 – Medidas de campo eletromagnético para a soldagem GTAW

Ensaio (Código)	Campo eletromagnético (E) (mT)				Campo eletromagnético (S) (mT)			
	(1)	(2)	(3)	(4)	(1)	(2)	(3)	(4)
T1M1C11D1G1	0,170	0,063	0,153	0,065	0,176	0,071	0,156	0,072
T2M1C11D2G1	0,156	0,058	0,139	0,041	0,151	0,50	0,126	0,043
T3M1C12D1G1	0,319	0,090	0,302	0,061	0,313	0,078	0,301	0,064
T4M1C12D2G1	0,268	0,075	0,219	0,046	0,264	0,075	0,225	0,038
T5M1C11D1G2	0,241	0,063	0,214	0,058	0,235	0,066	0,209	0,052
T6M1C11D2G2	0,231	0,058	0,168	0,034	0,226	0,050	0,175	0,026
T7M1C12D1G2	0,370	0,082	0,275	0,068	0,352	0,078	0,274	0,078
T8M1C12D2G2	0,285	0,078	0,251	0,048	0,263	0,073	0,255	0,037
T9M2C11D1G1	0,212	0,051	0,180	0,039	0,209	0,052	0,183	0,026
T10M2C11D2G1	0,156	0,068	0,139	0,031	0,151	0,073	0,126	0,033
T11M2C12D1G1	0,268	0,070	0,226	0,065	0,274	0,078	0,235	0,053
T12M2C12D2G1	0,246	0,092	0,204	0,036	0,256	0,067	0,208	0,037
T13M2C11D1G2	0,248	0,043	0,212	0,036	0,235	0,052	0,208	0,032
T14M2C11D2G2	0,195	0,065	0,222	0,039	0,226	0,062	0,200	0,042
T15M2C12D1G2	0,307	0,073	0,273	0,058	0,313	0,078	0,274	0,053
T16M2C12D2G2	0,273	0,075	0,239	0,061	0,263	0,075	0,226	0,063
T17M3C21D1G1	0,124	0,051	0,097	0,031	0,121	0,049	0,091	0,030
T18M3C21D2G1	0,109	0,046	0,073	0,026	0,100	0,050	0,075	0,025
T19M3C22D1G1	0,175	0,070	0,141	0,046	0,181	0,072	0,136	0,045
T20M3C22D2G1	0,156	0,068	0,139	0,038	0,151	0,065	0,131	0,038
T21M3C21D1G2	0,129	0,051	0,117	0,031	0,121	0,060	0,115	0,030
T22M3C21D2G2	0,114	0,043	0,073	0,024	0,102	0,050	0,075	0,025
T23M3C22D1G2	0,165	0,070	0,153	0,046	0,167	0,069	0,151	0,045
T24M3C22D2G2	0,148	0,063	0,136	0,041	0,151	0,064	0,132	0,038

Legenda: (1) Mão. (2) Cabeça, (3) Tronco e (4) Cintura

De modo semelhante ao que se observa no processo de soldagem Eletrodo Revestido, no processo TIG também foi verificada a mesma tendência quanto à intensidade de campo eletromagnético em função da utilização de elevados valores de corrente (Fig. 4.8), como proposto nos estudos de Melton (2005) e Ali (2012). O mesmo comportamento pode ser

verificado com o emprego de menores distâncias entre o eletrodo e a peça (consequentemente menor altura de arco) (Fig. 4.9), evidenciando que os resultados alcançados para esse processo também são concordantes com as teorias de Mair (2005) e Neris (2015). As razões que justificam esse comportamento são as mesmas apresentadas para o processo anterior. Ambos os resultados já eram esperados para o processo GTAW em virtude da similaridade na abordagem experimental. Nota-se também para esse processo que há grande proximidade entre os resultados experimentais e numéricos.

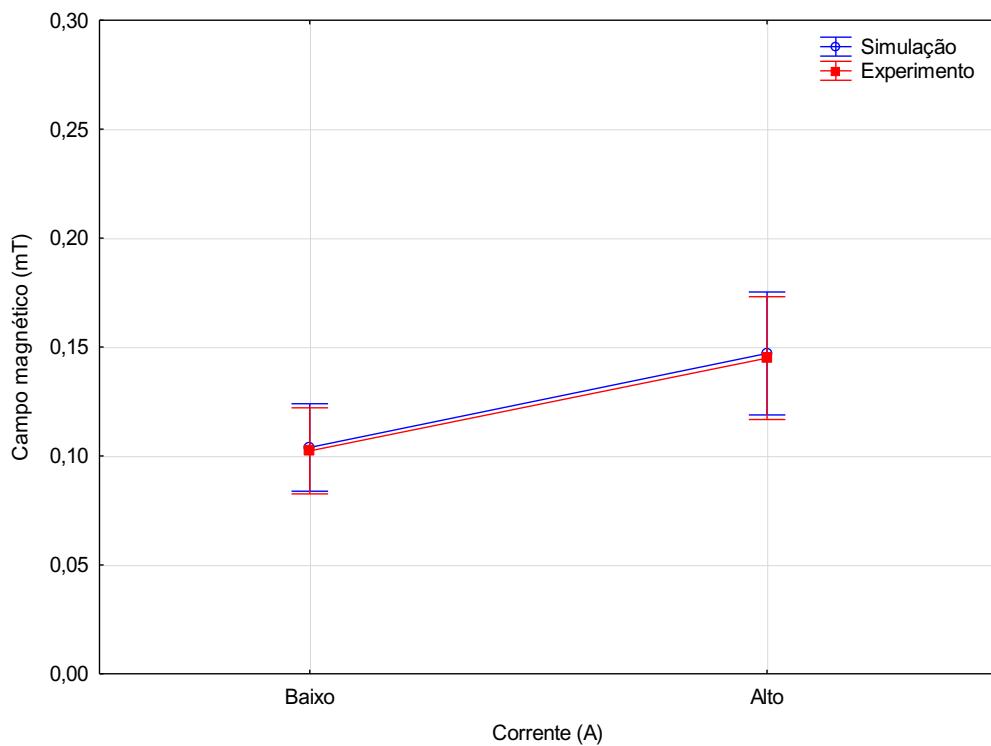


Figura 4.8 - Influência da corrente no valor de campo eletromagnético para a soldagem GTAW

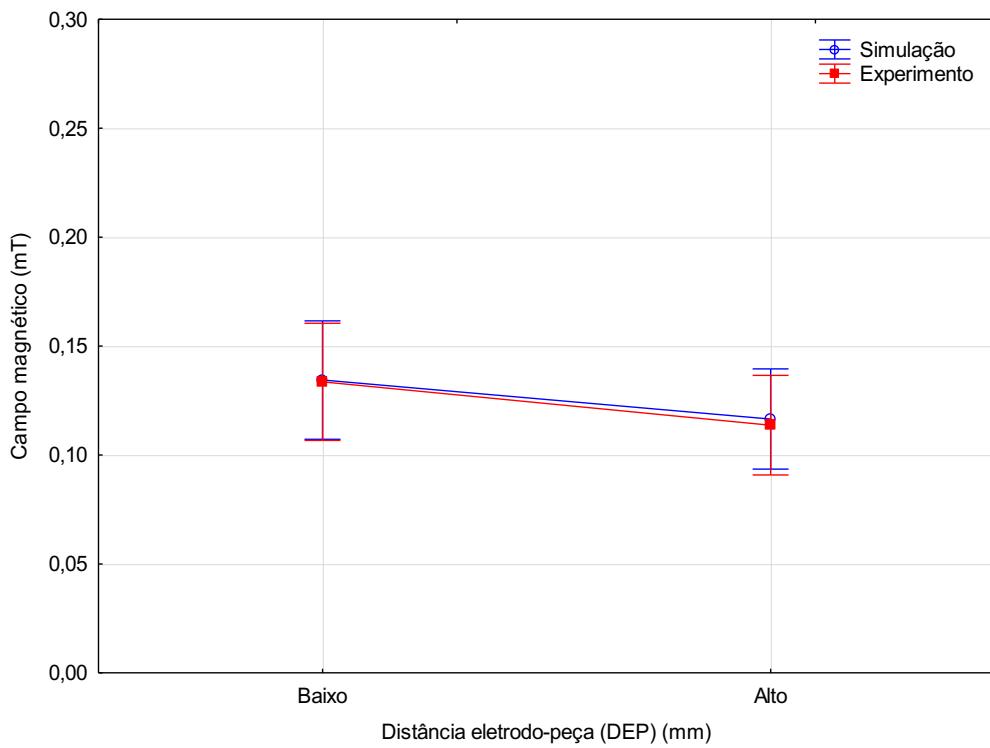


Figura 4.9 - Influência da DEP no valor de campo eletromagnético para a soldagem GTAW

A proteção gasosa exerce papel importante no valor do campo eletromagnético. Os resultados obtidos por ambas as metodologias tendem a mostrar que o campo eletromagnético é maior com a utilização da mistura gasosa Ar+25%He do que com Ar puro (Fig. 4.10). Este resultado pode ser explicado pela condutividade térmica dos gases, uma vez que suas permeabilidades magnéticas relativas são muito próximas a do ar (aproximadamente 1), não sendo capaz de alterar significativamente a permeabilidade magnética do meio. A proximidade entre os resultados vista na Fig. 4.10 reforça tal afirmação, visto que a condutividade térmica é a única propriedade solicitada pelo programa que apresenta diferença apreciável para a simulação computacional.

A condutividade térmica do He é muito superior à do Ar e esta mistura gasosa de Ar e He aumenta o aporte térmico no arco e a condutividade térmica do mesmo, exclusivamente para o caso de adições de He (Hertel et al. 2017). É possível presumir que a maior condutividade térmica aumente a tendência do arco de perder calor radialmente, visto que, de acordo com Mondenesi et al. (2012), estudos comparando o arco elétrico na soldagem TIG de misturas de argônio e hélio parecem indicar que, em atmosfera rica em hélio, os gradientes radiais de temperatura são reduzidos. Essa condição pode favorecer um formato mais estreito do arco elétrico originado numa soldagem com proteção de Ar+25%He. Em contrapartida, gases de menor condutividade térmica possuem arcos com uma zona externa mais larga.

Essa consideração auxilia no entendimento da tendência observada na Fig. 4.10, ressaltando que o campo eletromagnético diminui com o quadrado da distância radial do centro do arco até a extremidade do campo eletromagnético gerado ao redor do arco (Lei de Biot-Savart), é possível justificar que a soldagem com proteção gasosa de Ar puro conduz a campos eletromagnéticos de menor valor, devido ao seu formato de arco ser mais largo do que aquele formado na soldagem com Ar+25%He.

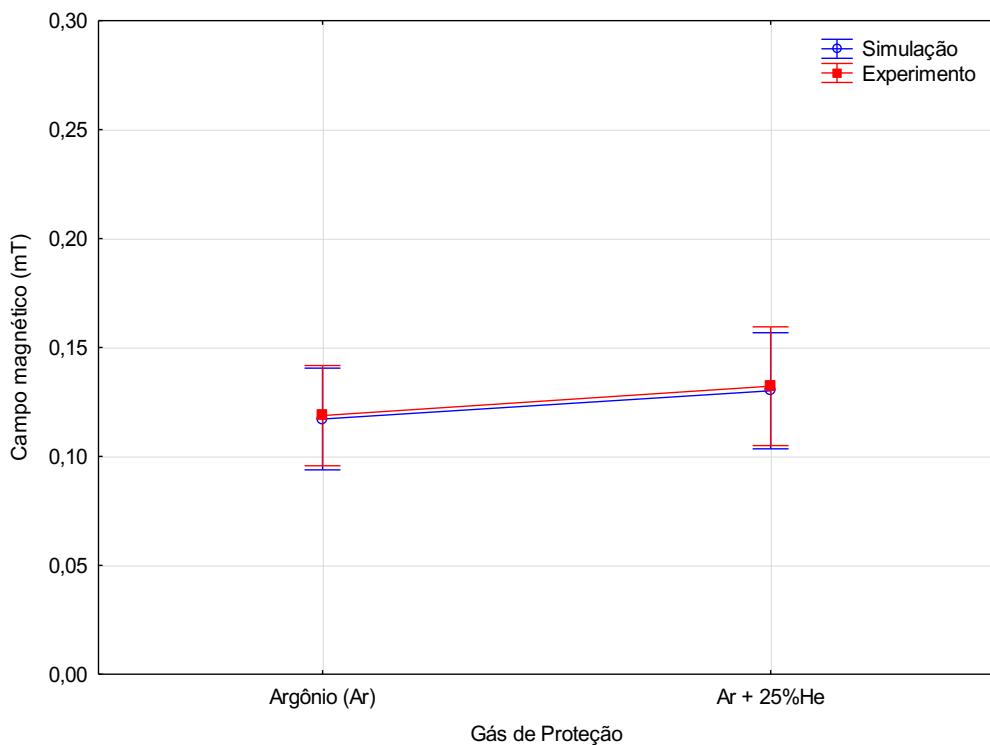


Figura 4.10 - Influência do gás de proteção no valor de campo eletromagnético no processo GTAW

Quanto ao tipo de material de base, na Fig. 4.11 é revelada uma tendência em que, pelos dois métodos de análise, o maior campo eletromagnético foi registrado para a soldagem do aço carbono, seguido do aço inoxidável austenítico e, por fim, do alumínio. Levando em consideração que o vapor metálico gerado durante a soldagem com esses materiais influencie na permeabilidade magnética do meio (μ) que, em sua maior parte, é constituída de ar e que tal modificação na permeabilidade seja proporcional aos respectivos valores de permeabilidade magnética relativa desses materiais, é possível afirmar que os resultados apresentados sejam coerentes e justificáveis a partir dessa suposição, visto que estão de acordo com os valores decrescentes de μ para os materiais apresentados, uma vez que o valor de campo eletromagnético é diretamente proporcional ao valor de μ (Lei de Biot-Savart).

Na Fig. 4.11 também são mostradas informações a respeito da polaridade da corrente empregada nos processos TIG, uma vez que a soldagem em alumínio ocorreu com corrente alternada em virtude da necessidade de limpeza catódica desse material. Embora Melton (2005) afirme que o campo eletromagnético deve ser maior em soldagem com corrente alternada, no presente trabalho, como já foi exposto, o modo de corrente estava associado a outras variáveis, o que torna impossível avaliar o efeito isolado da polaridade da corrente no referido processo de soldagem.

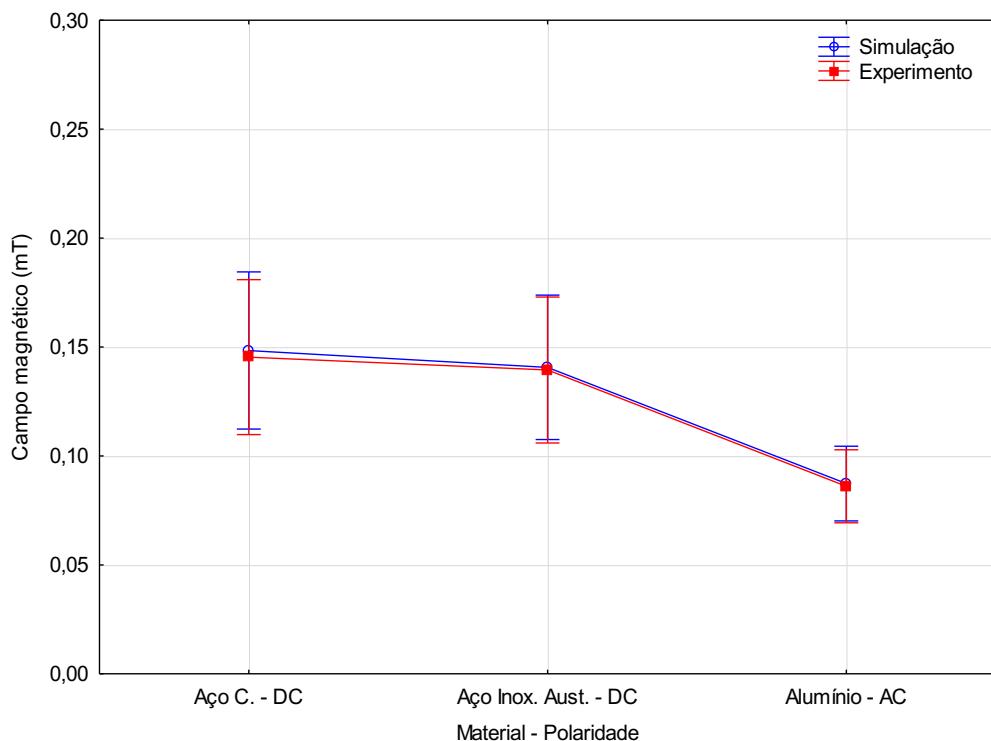


Figura 4.11 - Influência do material de base no valor de campo eletromagnético no processo GTAW

Assim como no processo Eletrodo Revestido, a mão do soldador foi o ponto de medição onde o campo eletromagnético foi maior, pelo fato do soldador segurar a tocha de soldagem durante o processo e, portanto, ser o ponto de maior proximidade ao arco elétrico. Este resultado também está de acordo com os trabalhos de Bowman et al. (1988) e Stuchly e Lecuyer (1989). Nos demais pontos de medição os resultados foram diferentes dos encontrados no processo anterior, em virtude da heterogeneidade de distribuição de campo eletromagnético em função da posição do soldador defendida por Dasdag et al. (2002).

Na soldagem TIG após a mão, os maiores valores de campo eletromagnético foram encontrados no tronco, seguido da cabeça e por fim na cintura. Esta diferença com relação ao processo anterior pode ser atribuída ao fato do soldador mudar de posição de um processo

para outro. Percebe-se que na soldagem TIG o soldador inclinou-se em direção a tocha de soldagem, aproximando o tronco e a cabeça e consequentemente afastando a cintura. A reprodução de tal posição no modelo computacional reflete aproximação entre os resultados observados na Fig. 4.12.

A comparação dos valores de campo eletromagnético medidos com os valores de referência da ICNIRP deve ser feita em dois momentos. O primeiro refere-se aqueles valores obtidos no modo de corrente contínua que devem ser comparados com os níveis ICNIRP de 2009 por se tratar de campos estáticos. O segundo diz respeito ao campo eletromagnético mensurado nas soldagens com corrente alternada, devendo ser comparada com limites estabelecidos da diretiva ICNIRP de 2010, referente a campos eletromagnéticos variantes no tempo. De acordo com esta última diretiva, para os processos TIG AC feitos neste trabalho, cuja faixa de frequência foi de 40 Hz (determinada a partir dos resultados de sinais elétricos adquiridos), o valor de referência é de 1 mT.

A análise geral dos valores contidos na Tab. 4.9 revela que os valores obtidos variam de 0,024 mT na cintura a 0,352 mT na mão do soldador e que em nenhum processo de soldagem TIG, seja ele AC ou DC, os valores de referência foram ultrapassados. No entanto, para Desidério (2017), a faixa de valores encontradas, sobretudo para a mão do soldador, representa a possibilidade de risco na produção de melatonina e no metabolismo do cálcio.

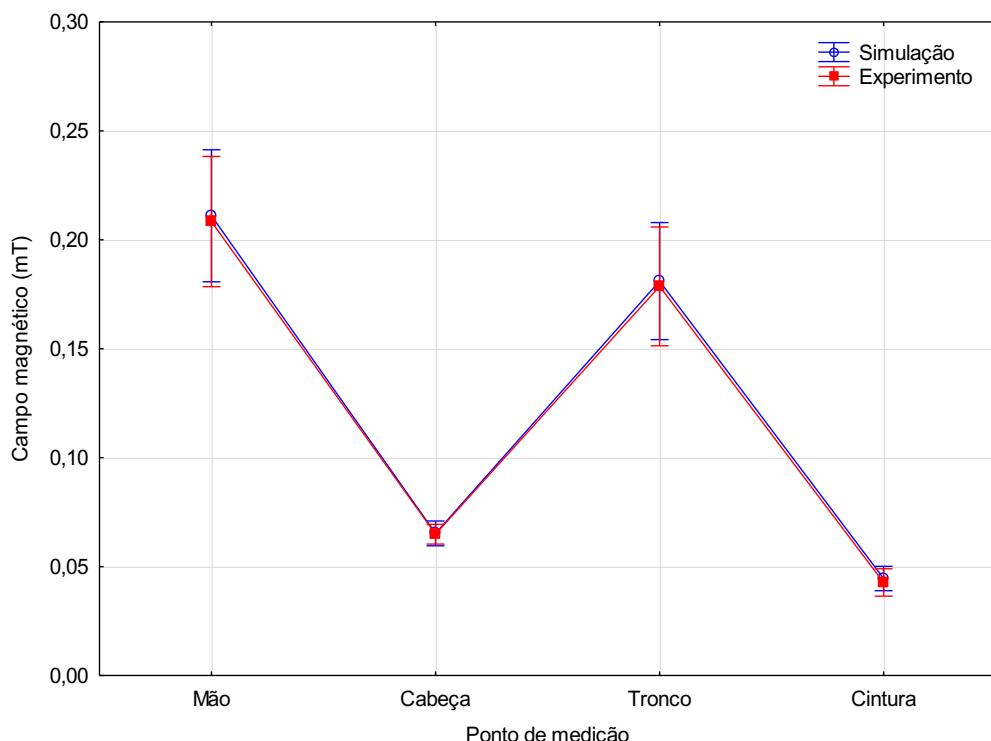


Figura 4.12 - Influência do ponto de medição no valor de campo eletromagnético no processo GTAW

Quanto a distribuição de campo eletromagnético no ambiente de soldagem GTAW, na Fig. 4.13 é revelado que não há diferenças notáveis, exceto quando se considera a região do eletrodo, onde o campo eletromagnético é mais intenso na região mais próxima ao arco elétrico e decresce em regiões mais afastadas, de modo muito semelhante ao que ocorre na soldagem com Eletrodo Revestido. Dentre as simulações realizadas não foram identificadas particularidades no que diz respeito a distribuição de campo eletromagnético que justificasse a análise de mais imagens. Pela mesma razão, a ampliação do eletrodo de tungstênio reproduzido no ambiente de simulação, também se torna desnecessária em virtude das mesmas dificuldades observadas na avaliação numérica do processo SMAW.

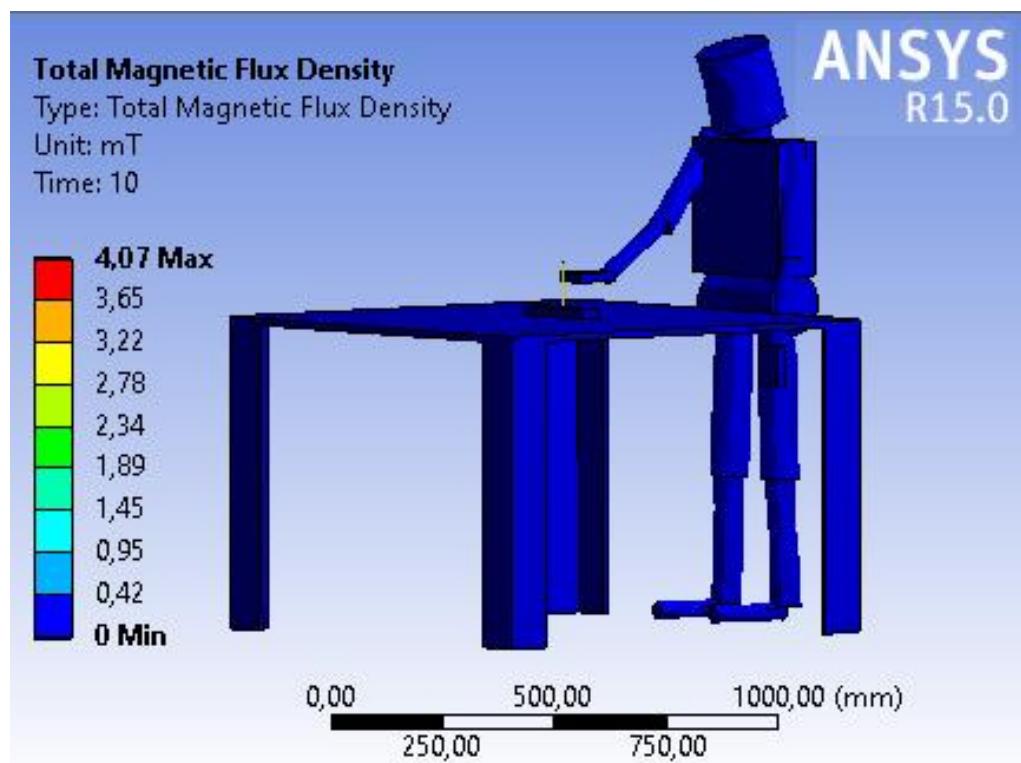


Figura 4.13 – Distribuição de campo eletromagnético para o processo GTAW

4.4. Avaliação de campos eletromagnéticos para o processo GMAW

A codificação para melhor compreensão dos processos GMAW é constituída inicialmente de duas letras maiúsculas indicando o processo (M para MIG/MAG - GMAW) e o modo de transferência metálica, respectivamente e em seguida de um número equivalente ao ensaio. Na sequência, são apresentadas as demais informações do processo, conforme descrito na Tab. 4.10. Nesta tabela são descritas as demais codificações das variáveis empregadas nos processos. Após cada letra maiúscula representativa da variável

correspondente, há um número indicativo no nível empregado ou tipo, conforme o parâmetro mencionado.

Os resultados obtidos para o processo GMAW são apresentados em função da transferência metálica. De acordo com a versão do processo, são avaliadas diferentes variáveis operacionais. Para os modos curto-círcuito convencional são avaliadas a tensão, velocidade de alimentação e gás de proteção. Na soldagem em curto-círcuito controlado e pulsado são analisados a tensão e o gás de proteção e no processo em modo goticular são verificadas a tensão e a velocidade de alimentação.

Tabela 4.10 - Codificações dos parâmetros experimentais para soldagem GMAW

GMAW em curto-círcuito convencional - Código (MC)	
Tensão – Código (U)	
Nível baixo (18 V) – Código (1)	Nível alto (20 V) – Código (2)
Velocidade de Alimentação – Código (V)	
Nível baixo (2,5 m/min) – Código (1)	Nível alto (4,0 m/min) – Código (2)
Gás de Proteção – Código (G)	
Ar+25%CO ₂ (1)	CO ₂ (2)
GMAW em curto-círcuito controlado - Código (MO)	
Velocidade de Alimentação – Código (V)	
Nível baixo (2,5 m/min) – Código (1)	Nível alto (4,0 m/min) – Código (2)
Gás de Proteção – Código (G)	
Ar+25%CO ₂ (1)	CO ₂ (2)
GMAW Goticular - Código (MG)	
Tensão – Código (U)	
Nível baixo (35 V) – Código (1)	Nível alto (40 V) – Código (2)
Velocidade de Alimentação – Código (V)	
Nível baixo (6,0 m/min) – Código (1)	Nível alto (7,0 m/min) – Código (2)
GMAW Pulsado - Código (MP)	
Velocidade de Alimentação – Código (V)	
Nível baixo (2,5 m/min) – Código (1)	Nível alto (4,0 m/min) – Código (2)
Gás de Proteção – Código (G)	
Ar+8%CO ₂ – Código (1)	Ar+2%O ₂ – Código (2)

A diferença entre parâmetros operacionais investigados na soldagem GMAW ocorre em função das particularidades de cada processo. Na Tab. 4.11 os resultados de sinais elétricos adquiridos nesses processos são mostrados em concordância com o planejamento experimental proposto.

Tabela 4.11 - Medidas de sinais elétricos para a soldagem GMAW

Ensaio (Código)	Corrente (A)		Tensão (V)	
	Média	RMS	Média	RMS
Modo curto-círcuito convencional				
MC1U1V1G1	100	105	18,0	18,9
MC2U1V2G1	146	158	18,0	19,2
MC3U2V1G1	105	109	20,2	20,7
MC4U2V2G1	148	158	20,1	21,0
MC5U1V1G2	98	109	17,8	19,6
MC6U1V2G2	153	174	17,9	20,2
MC7U2V1G2	104	114	19,9	21,4
MC8U2V2G2	154	165	20,0	22,0
Modo curto-círcuito controlado				
MO1V1G1	98	115	15,8	17,0
MO2V2G1	147	163	16,2	17,8
MO3V1G2	105	134	18,4	20,3
MO4V2G2	151	180	18,9	21,1
Modo Goticular				
MG1U1V1	278	280	29,8	29,8
MG2U1V2	275	275	35,3	35,3
MG3U2V1	280	280	35,2	35,2
MG4U2V2	287	287	39,7	39,7
Modo Pulsado				
MP1V1G1	99	147	19,2	20,6
MP2V2G1	148	198	22,5	24,3
MP3V1G2	102	150	18,3	19,8
MP4V2G2	154	205	21,6	23,4

Diferentemente dos processos anteriores (SMAW e GTAW), na soldagem GMAW a corrente é a variável de saída, logo os valores desse sinal elétrico constituem um primeiro

resultado a ser inicialmente discutido como forma de averiguar a correta execução do processo. A análise de variância acerca desse primeiro resultado é apresentada na Tab. 4.12, onde se observa que, em todos os modos de transferência metálica, a velocidade de alimentação é única variável estatisticamente significativa no que diz respeito a variação nos valores de corrente elétrica, segundo os critérios adotados ($p \leq 0,05$). De modo geral percebe-se que nos processos de soldagem GMAW a corrente de soldagem aumenta quando são empregadas maiores velocidades de alimentação. De acordo com as equações mostradas por Scotti e Monteiro (2012), a velocidade de alimentação tem influência direta na corrente de soldagem. Quanto maior é esta velocidade maior é a corrente de soldagem, desde que sejam mantidas constantes as demais variáveis do processo.

A tensão demonstra influência nos valores de corrente quando o processo é executado em modo curto-círcuito convencional. Verifica-se a partir da análise dos dados da Tab. 4.11 que o aumento na tensão de soldagem reflete em maiores valores de corrente. Segundo Souza (2010), o aumento nos valores de tensão para uma mesma velocidade de alimentação, resulta num aumento de corrente para uma fonte do tipo tensão constante, uma vez que o aumento do comprimento do arco (maior tensão) implica em uma redução do comprimento do eletrodo (distância bico de contato à peça é constante) e consequente aumento da corrente para manter a taxa de fusão do arame.

Quanto ao gás de proteção, essa variável revela-se estatisticamente significativa para a corrente de soldagem nos processos em modos curto-círcuito convencional e controlado. A análise da Tab. 4.11 permite verificar que o valor de corrente aumenta nos testes em que são empregados CO₂ puro, o que, de fato, é esperado em correspondência com os dados registrados na literatura, como exemplo, Resende et al. (2009).

Essa breve análise inicial dos resultados de sinais elétricos, respaldada em dados encontrados na literatura técnica e científica, permite afirmar que os processos de soldagem GMAW em suas distintas versões foram conduzidos corretamente. Sendo assim, é possível proceder com as análises de campos eletromagnéticos obtidos nesses processos por via experimental e por simulação computacional.

Na Tab. 4.12 são apresentados também os valores referentes ao nível de significância das variáveis experimentais de cada modalidade do processo GMAW no que diz respeito às suas contribuições nos valores de campo eletromagnético. Os resultados da análise de variância (ANOVA), feita a um nível de significância de 95% ($p \leq 0,05$), revelam que apenas a velocidade de alimentação (exceto para o processo em modo goticular) e o ponto de medição demonstram ser estatisticamente significativas para observação dos valores de campos eletromagnéticos obtidos tanto por via experimental quanto numérica.

Tabela 4.12 – Níveis de significância para análise dos resultados do Processo GMAW

Variável	Nível de significância		
	Corrente	Campo eletromagnético (E)	Campo eletromagnético (S)
Modo curto-círcuito convencional			
Média	0,00	0,00	0,00
Tensão	0,00	0,07	0,09
Velocidade de alimentação	0,00	0,01	0,02
Gás de proteção	0,04	0,08	0,12
Ponto de medição	-	0,00	0,00
Modo curto-círcuito controlado			
Média	0,00	0,00	0,00
Velocidade de alimentação	0,00	0,02	0,02
Gás de proteção	0,00	0,37	0,17
Ponto de medição	-	0,00	0,00
Modo goticular			
Média	0,00	0,00	0,00
Tensão	0,32	0,07	0,15
Velocidade de alimentação	0,00	0,27	0,25
Ponto de medição	-	0,00	0,00
Modo pulsado			
Média	0,00	0,00	0,00
Velocidade de alimentação	0,00	0,00	0,00
Gás de proteção	0,74	0,89	0,94
Ponto de medição	-	0,00	0,00

Os resultados de medição de campo eletromagnético por ambas as metodologias são dispostos na Tab. 4.13, cuja a investigação subsidiada pela análise gráfica observada nas Figs. 4.13 a 4.16, tendem a revelar que os maiores valores de campo eletromagnético são alcançados para os maiores valores de velocidade de alimentação. Bem como já explanado, os maiores valores de velocidade de alimentação refletem em correntes de soldagem mais elevadas, desde que mantidas as demais variáveis constantes. Desse modo, o campo eletromagnético é mais intenso em virtude do aumento na corrente de soldagem (Lei de Biot-Savart), bem como já observado nos processos anteriores, convergindo com os trabalhos de Melton (2005) e Ali (2012).

Tabela 4.13 – Medidas de campo eletromagnético para a soldagem MIG/MAG

Ensaio (Código)	Campo eletromagnético (E) (mT)				Campo eletromagnético (S) (mT)			
	(1)	(2)	(3)	(4)	(1)	(2)	(3)	(4)
Modo curto-circuito convencional								
MC1U1V1G1	0,378	0,034	0,063	0,053	0,385	0,036	0,069	0,059
MC2U1V2G1	0,505	0,039	0,102	0,095	0,509	0,036	0,106	0,100
MC3U2V1G1	0,395	0,036	0,070	0,051	0,388	0,044	0,066	0,059
MC4U2V2G1	0,549	0,046	0,095	0,087	0,545	0,051	0,096	0,089
MC5U1V1G2	0,254	0,031	0,061	0,051	0,232	0,030	0,067	0,045
MC6U1V2G2	0,307	0,034	0,082	0,063	0,322	0,036	0,085	0,072
MC7U2V1G2	0,409	0,043	0,073	0,058	0,399	0,047	0,071	0,053
MC8U2V2G2	0,461	0,048	0,114	0,070	0,472	0,045	0,124	0,067
Modo curto-circuito controlado								
MO1V1G1	0,331	0,048	0,058	0,063	0,323	0,040	0,056	0,061
MO2V2G1	0,551	0,087	0,080	0,087	0,519	0,082	0,077	0,079
MO3V1G2	0,436	0,065	0,068	0,070	0,427	0,067	0,072	0,077
MO4V2G2	0,544	0,112	0,070	0,104	0,572	0,127	0,064	0,102
Modo goticular								
MG1U1V1	0,668	0,114	0,119	0,112	0,655	0,111	0,113	0,111
MG2U1V2	0,756	0,163	0,151	0,146	0,712	0,169	0,135	0,135
MG3U2V1	0,680	0,170	0,165	0,153	0,655	0,164	0,164	0,152
MG4U2V2	0,773	0,158	0,143	0,119	0,711	0,163	0,132	0,115
Modo pulsado								
MP1V1G1	0,322	0,112	0,090	0,095	0,325	0,119	0,085	0,084
MP2V2G1	0,436	0,148	0,136	0,134	0,455	0,159	0,137	0,137
MP3V1G2	0,326	0,124	0,090	0,112	0,333	0,123	0,088	0,105
MP4V2G2	0,475	0,143	0,107	0,119	0,480	0,144	0,096	0,120

Legenda: (1) Mão. (2) Cabeça, (3) Tronco e (4) Cintura

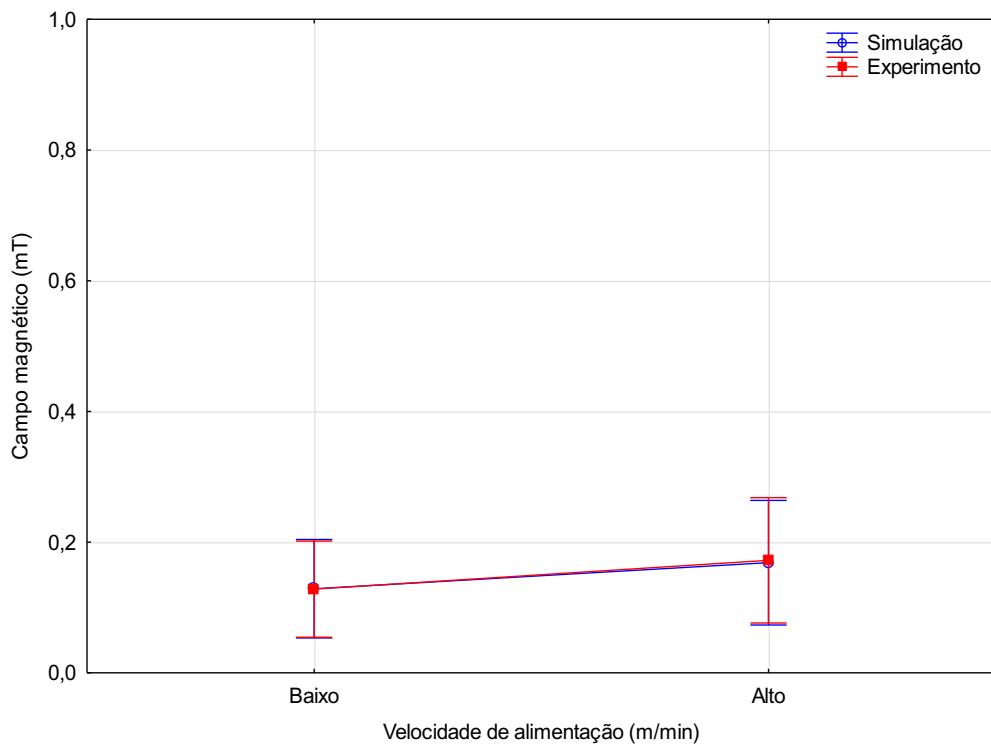


Figura 4.14 - Influência da velocidade de alimentação no valor de campo eletromagnético no processo MIG/MAG em modo curto-circuito convencional

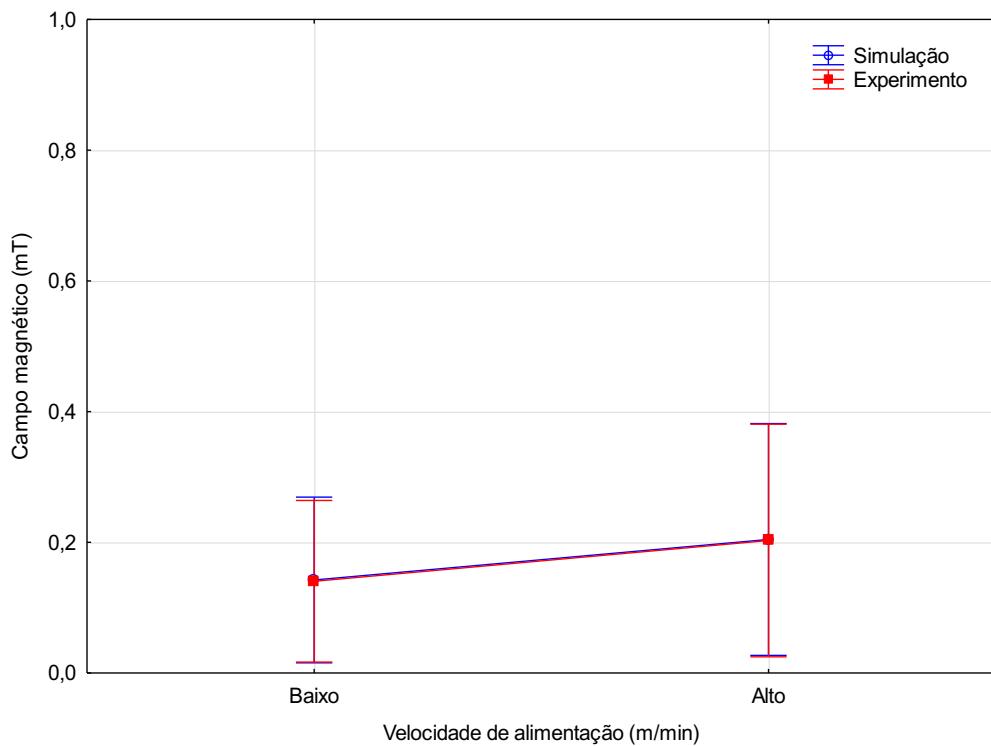


Figura 4.15 - Influência da velocidade de alimentação no valor de campo eletromagnético no processo MIG/MAG em modo curto-circuito controlado

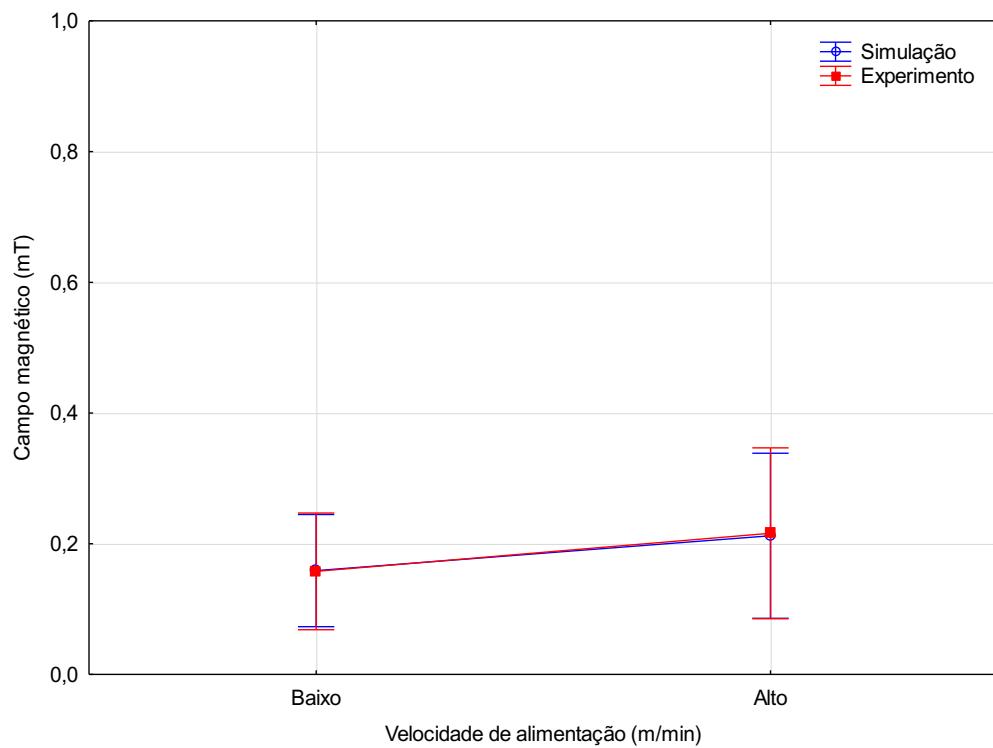


Figura 4.16 - Influência da velocidade de alimentação no valor de campo eletromagnético no processo MIG/MAG em modo pulsado

Ressalta-se que na simulação computacional, os valores de corrente são dados de entrada, logo a etapa experimental necessariamente antecipou a etapa computacional para obtenção dos valores de corrente de soldagem oriundos dos valores de velocidade de alimentação, fato este que pode ter contribuído com a proximidade entre ambos os resultados. Cabe lembrar também que o ideal seria manter todos os gráficos com a mesma escala em todos os processos, mas isto não se torna possível em virtude das expressivas diferenças entre os níveis de intensidade de campo eletromagnético alcançados nos diferentes processos.

A tensão, verificada para os modos curto-círcuito convencional e gothic, não se mostrou significativa, no entanto os níveis de significância não são tão distantes dos padrões estabelecidos pela a análise de variância ($p \leq 0,05$). Sendo assim, procedendo com a análise dessa variável percebe-se que os maiores valores de tensão acompanham campos eletromagnéticos mais intensos como mostram as Figs. 4.17 e 4.18, respectivamente, para os processos em modo curto-círcuito convencional e controlado.

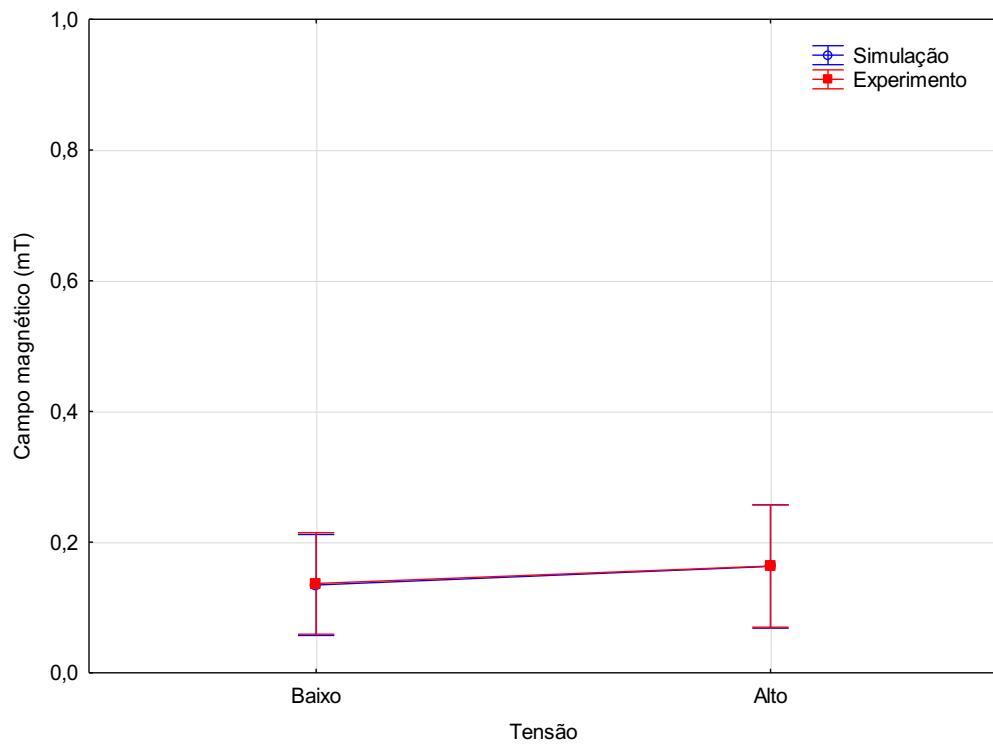


Figura 4.17 - Influência da tensão no valor de campo eletromagnético no processo MIG/MAG em modo curto-circuito convencional

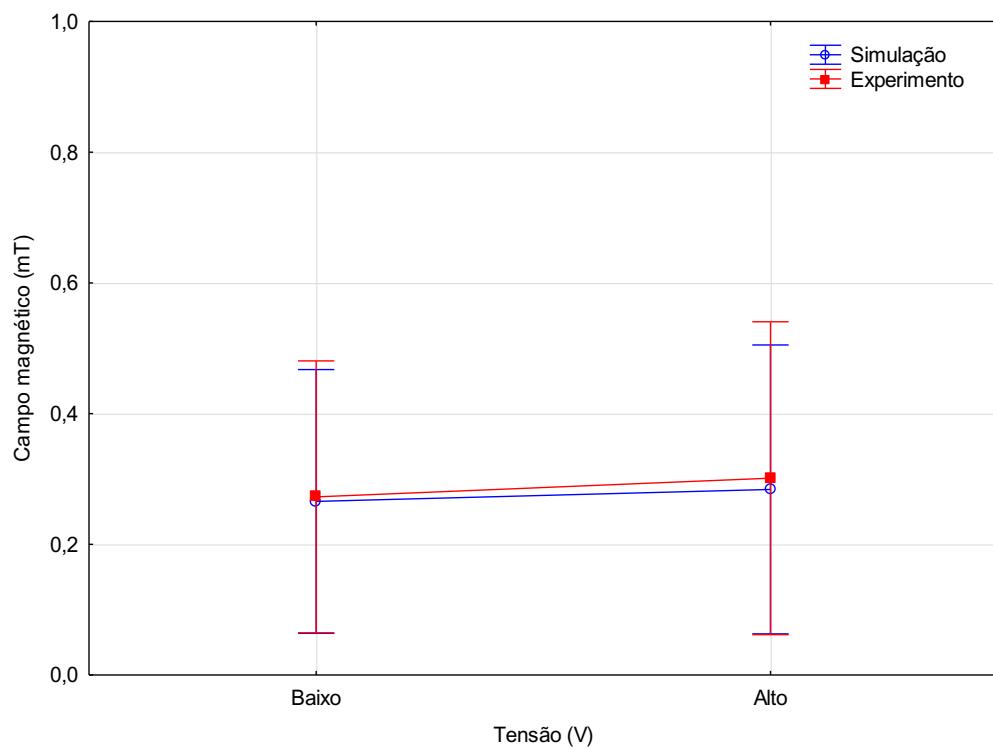


Figura 4.18 - Influência da tensão no valor de campo eletromagnético no processo MIG/MAG em modo goticular

Inicialmente esse resultado contraria a discussão acerca da Fig. 4.4 uma vez que os maiores valores de tensão correspondem a arcos de maior comprimento, onde se observa campos eletromagnéticos menos intensos. No entanto, assim como já foi exposto, para uma mesma velocidade de alimentação, o aumento dos valores de tensão implicam no aumento da corrente de soldagem para que seja mantida constante a taxa de fusão do arame. Em consequência disso, o aumento na intensidade de campo eletromagnético torna-se explicável pelos mesmos mecanismos já apresentados (Lei de Biot-Savart), ressaltando, conforme relatado por Melton (2005), Bolte e Pruppers (2006) e Ali (2012), que a corrente de soldagem é um fator primordial na intensidade de geração de campos eletromagnéticos.

Estatisticamente, o fato do valor do nível de significância ser menos expressivo para influência da tensão na intensidade de campos eletromagnéticos quando comparado à velocidade de alimentação (e consequentemente a corrente de soldagem) adicionado a proximidade entre os resultados experimentais e numéricos, reforçam essa discussão, em função da similaridade entre os dados iniciais e a resposta durante os testes de soldagem.

Quanto ao gás de proteção, a análise de variância demonstrou que em nenhum dos processos essa variável é estatisticamente significativa. Porém, diferentemente das soldagens em modo curto-círcuito controlado e pulsado, no modo curto-círcuito convencional os valores de significância não são tão distantes dos padrões estabelecidos para a ANOVA. Assim, bem como feito para a tensão, prosseguindo com a análise da influência do gás de proteção na intensidade de campo eletromagnético para a referida modalidade do processo GMAW, nota-se que há uma tendência de diminuição na intensidade de campo eletromagnético com a utilização de CO₂ puro (Fig. 4.19).

Esse resultado pode ser explicado de modo semelhante ao que foi observado na soldagem GTAW. A permeabilidade magnética do Ar e do CO₂ são praticamente idênticas (Tab. 3.13), mas há uma pequena diferença entre os valores de condutividade térmica desses gases (Tab. 3.16). Embora essa diferença não seja tão significativa quanto aquela observada entre os gases Ar e He, o maior valor da condutividade térmica Ar do em relação ao CO₂, pode também ter influenciado no formato mais constrito do arco elétrico, o que reflete em maiores valores de campos eletromagnéticos, assim como já explanado anteriormente. Ressalta-se mais uma vez que a alimentação fidedigna dos valores das propriedades térmicas e magnéticas desses gases durante a simulação computacional refletem a proximidade entre os resultados observados por ambos os métodos de análise propostos neste trabalho.

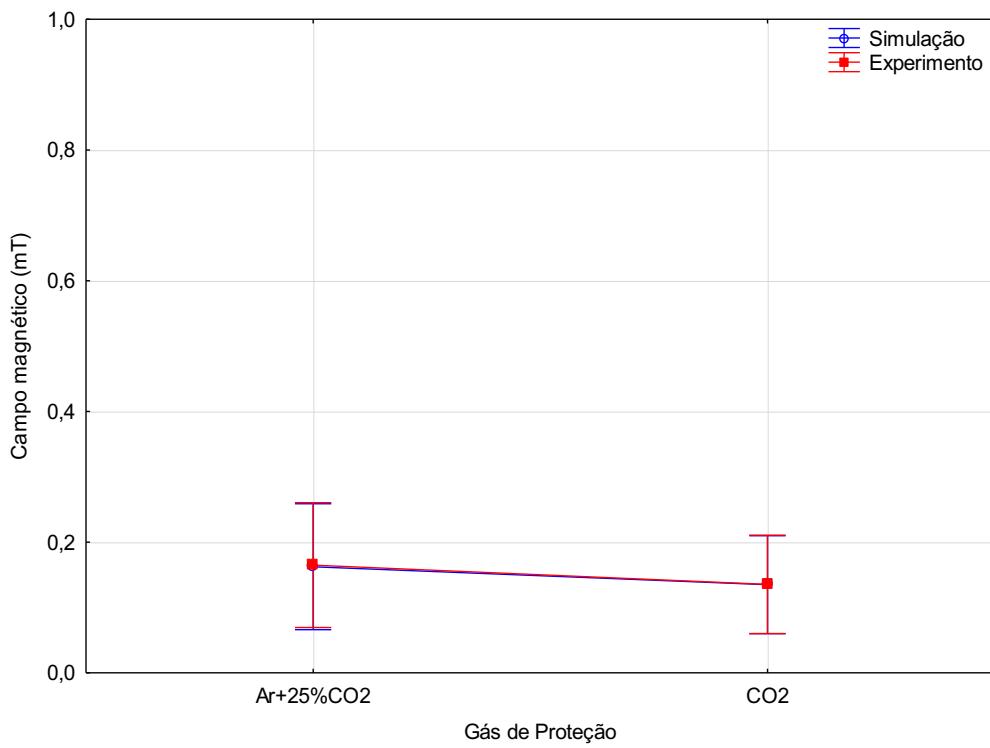


Figura 4.19 - Influência do gás de proteção no valor de campo eletromagnético no processo MIG/MAG em modo curto-circuito convencional

O ponto de medição é a única variável estatisticamente significativa em todos os processos observados, segundo as condições estabelecidas para análise. Em todos eles a mão do soldador foi a região onde se registrou os valores mais intensos de campo eletromagnético pelo fato da proximidade com o arco elétrico em virtude da necessidade de segurar a tocha durante toda a execução, bem como observado nos trabalhos de Melton (2005) e Garrido (2013) que também estudaram o processo MIG/MAG em condições experimentalmente semelhantes.

As diferenças quanto a distribuição de campo eletromagnético nas demais regiões do corpo, também são verificadas nas diferentes versões do processo MIG/MAG. Para o processo em modo curto-circuito convencional foi verificado o maior valor de campo eletromagnético por via experimental na mão do soldador (0,549 mT) em seguida tronco, cabeça e cintura (Fig. 4.20).

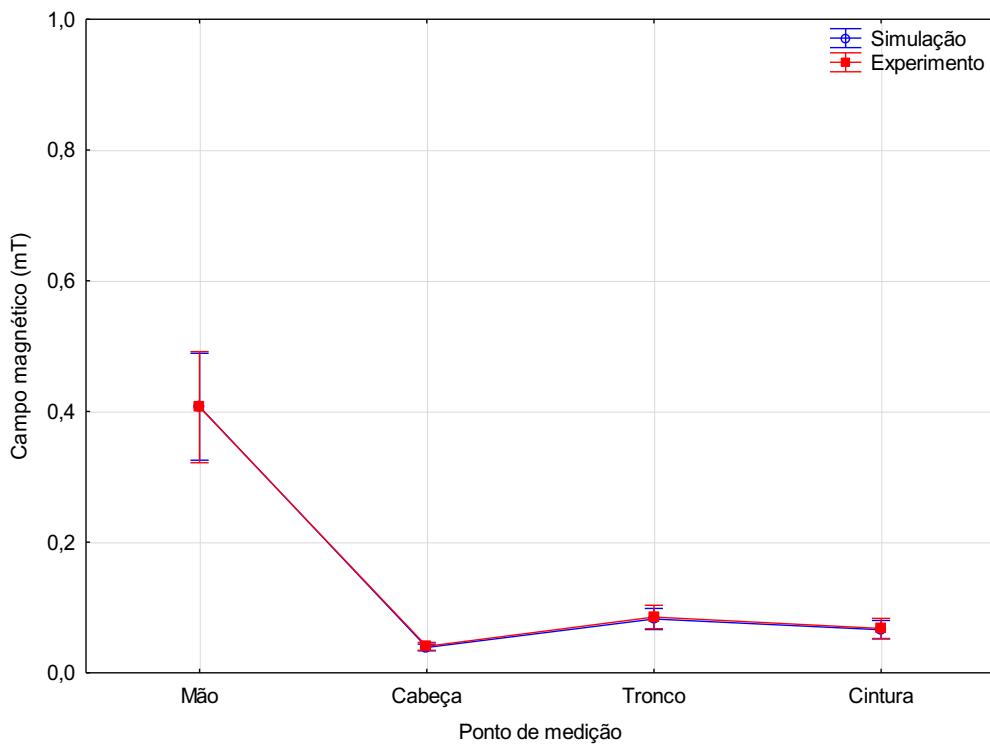


Figura 4.20 - Influência do ponto de medição no valor de campo eletromagnético no processo MIG/MAG em modo curto-circuito convencional

Para o processo em modo curto-círcito controlado, depois da mão do soldador onde se registra o maior valor de campo eletromagnético por via computacional (0,572 mT), a cabeça, a cintura e tronco são, em ordem decrescente, as regiões de maior intensidade de campo eletromagnético, assim como mostra a Fig. 4.21. O mesmo comportamento se observa para a soldagem MIG/MAG em modo pulsado (Fig. 4.22), sendo que neste processo o maior valor medido na mão do soldador é de 0,480 mT também obtido por via computacional.

No modo de soldagem MIG/MAG goticular após o valor de 0,773 medido na mão do soldador por meio de experimentos, encontram-se em ordem decrescente de intensidade de campo eletromagnético as regiões da cabeça, tronco e cintura, conforme mostra a Fig. 4.23. Nesse processo nota-se que o campo eletromagnético é mais intenso, fato este que pode ser atribuído aos maiores níveis de corrente de soldagem obtidos (Tab. 4.11), visto que a corrente de soldagem é um fator preponderante no aumento de intensidade de campo eletromagnético, assim como é relatado por Melton (2005) e Ali (2012).

A análise conjunta dos resultados de campos eletromagnéticos encontrados para o processo MIG/MAG revelam que os valores obtidos nesse estudo são superiores aos encontrados por Skotte e Hjollund (1997), mas bastante semelhantes aos identificados por Melton (2005) e Garrido (2013), provavelmente em função da similaridade entre os métodos de medição. Destaca-se, porém, a impossibilidade de comparação entre esses resultados em

virtude das diferenças quanto ao planejamento experimental no que se refere ao detalhamento das variáveis operacionais avaliadas.

Ainda assim, quanto a exposição do trabalhador, ao comparar os resultados obtidos com a diretiva ICNIRP de 2009, percebe-se que em nenhum dos pontos medidos foi ultrapassado os valores de referência de 2000 mT para a cabeça e tronco e 8000 mT para os membros. No entanto, nota-se que em alguns casos os valores encontrados são superiores a 0,5 mT, onde podem ser observadas, segundo Desidério (2017), mudanças na latência de respostas em testes complexos de raciocínio, sensações visuais oscilatórias, excitabilidade do sistema nervoso central e efeitos irreversíveis como fibrilações cardíacas, além dos efeitos anteriormente relatados para a faixa de valores compreendida entre 0,1 e 0,5 mT.

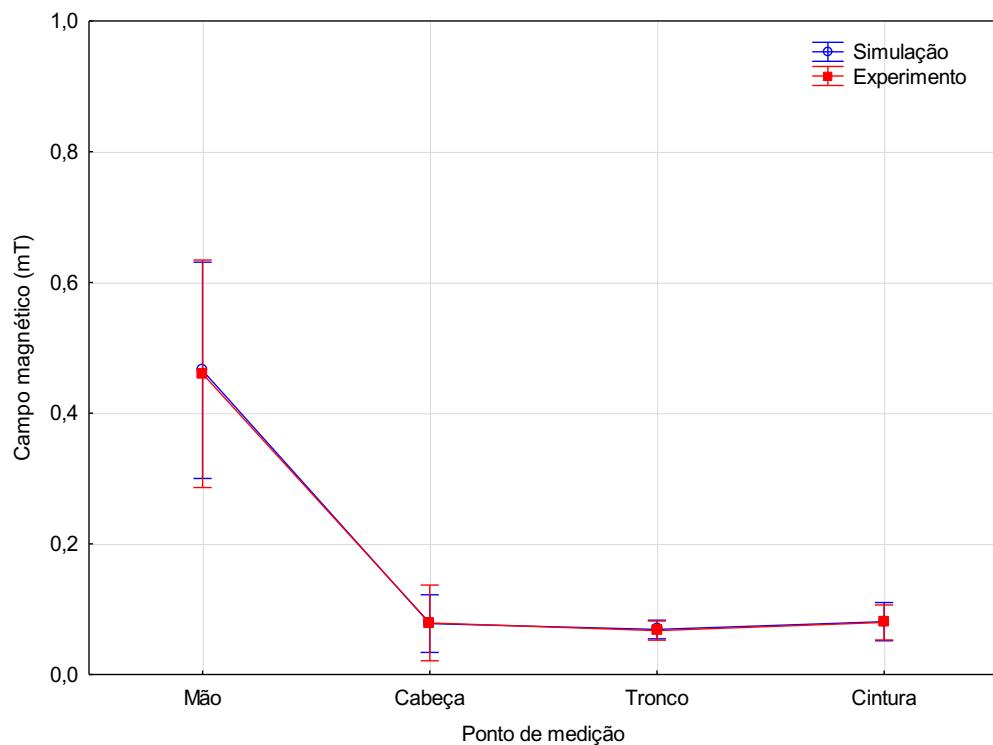


Figura 4.21 - Influência do ponto de medição no valor de campo eletromagnético no processo MIG/MAG em modo curto-circuito controlado

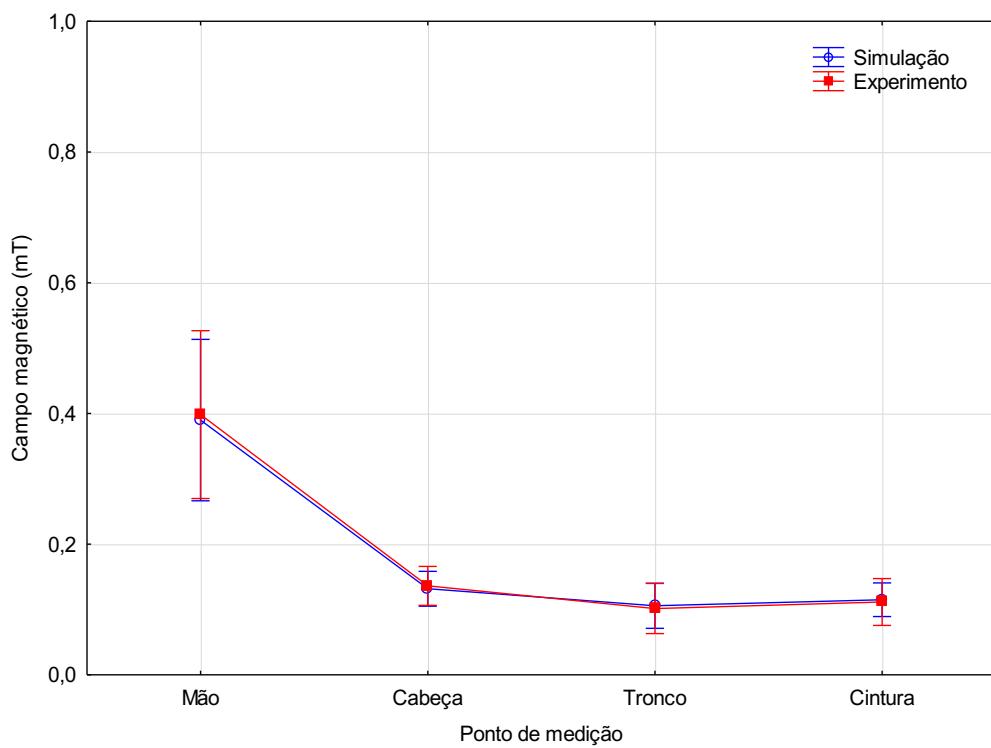


Figura 4.22 - Influência do ponto de medição no valor de campo eletromagnético no processo MIG/MAG em modo pulsado

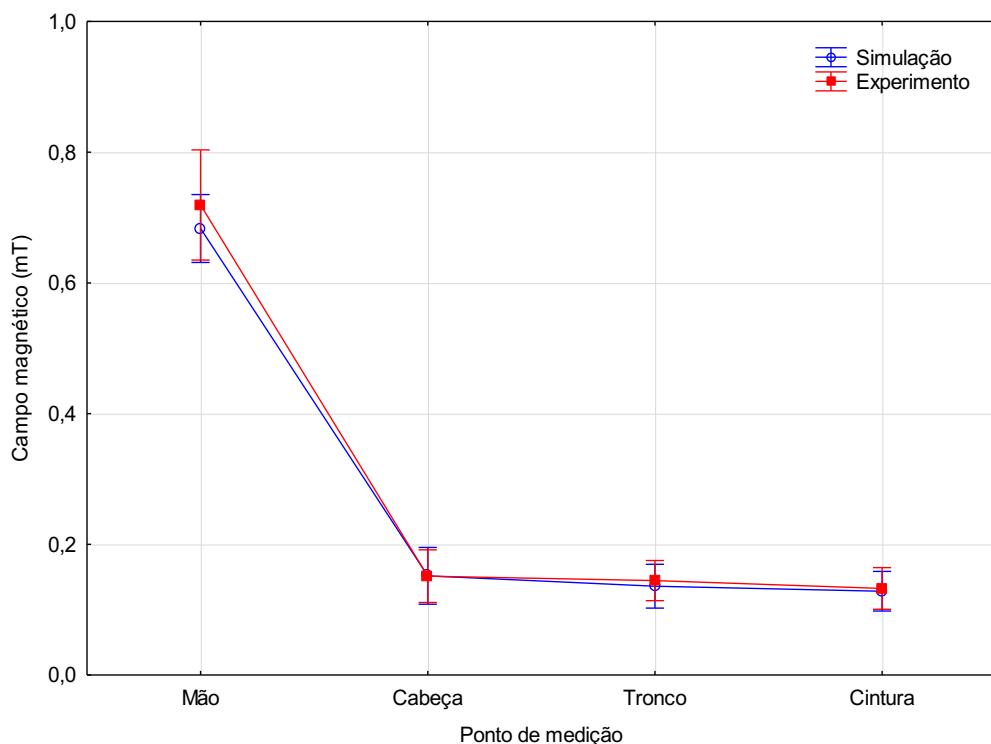


Figura 4.23 - Influência do ponto de medição no valor de campo eletromagnético no processo MIG/MAG em modo goticular

Excetuando-se a unanimidade com relação a mão do soldador revelar o campo eletromagnético de maior intensidade por razões já expostas, as diferenças observadas com relação as demais regiões do corpo nos processos distintos podem ser atribuídas ao fato da mudança de posição realizada pelo soldador na tentativa de aliar o conforto e a preservação da ergonomia adequada durante a soldagem sem comprometer a qualidade do processo. Assim, ele pode afastar ou aproximar determinada parte do corpo em função do maior calor gerado ou da quantidade de respingos, ou da intensidade de radiação luminosa que pode variar de um processo para outro. Ressalta-se mais uma vez que a similaridade atingida entre os resultados experimentais e computacionais é oriunda da adequada reprodução dessas mudanças de posições observadas durante os experimentos durante as simulações.

Comparando os modos de transferência metálica, percebe-se que a intensidade de campo eletromagnético é maior no modo goticular, depois no modo curto-circuito controlado, seguido do convencional e, por fim, modo pulsado (Fig. 4.24). A diferença mais expressiva é notória para o modo goticular, provavelmente em virtude dos maiores níveis de corrente atingidos durante tal processo, visto que na literatura técnica e científica não se atribui nenhuma relação da geração de campo eletromagnético com o modo de transferência metálica.

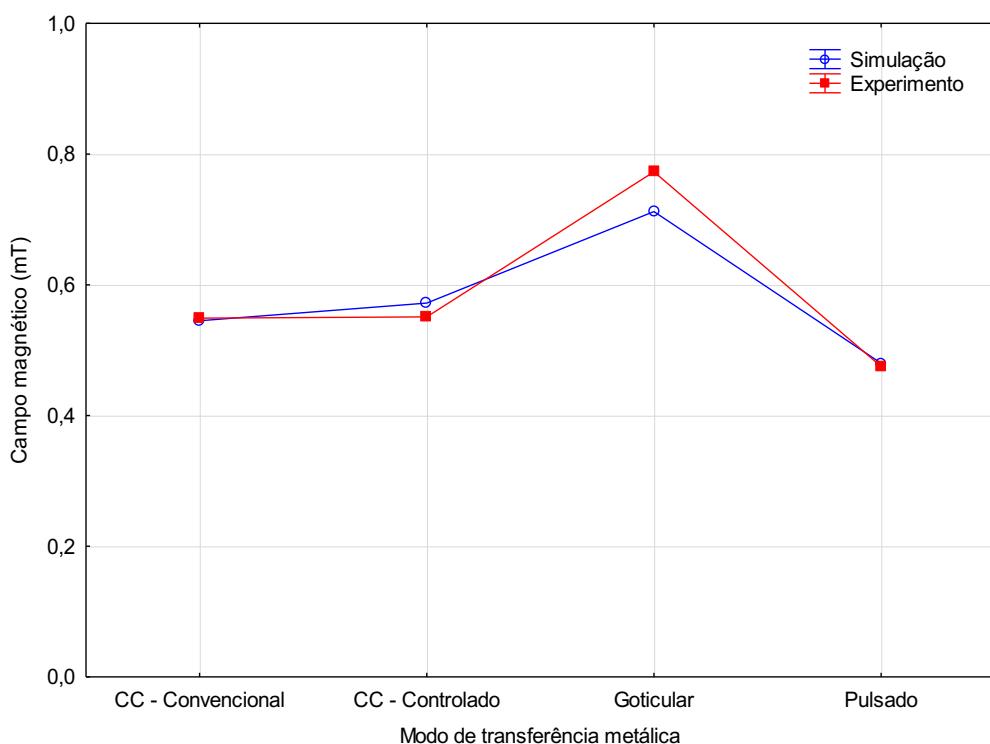


Figura 4.24 – Comparativo dos modos de transferência metálica do processo MIG/MAG quanto a intensidade de campo eletromagnético

De modo específico aos processos em curto-circuito convencional e controlado, Desideri e Maschio (2012) comentam que o tempo necessário para elevar o valor da corrente no modo curto-circuito convencional em relação ao controlado é menor e isso ocasiona redução no valor de campo eletromagnético. No entanto não são encontrados mais registros na literatura que reforcem tal suposição.

Quanto à distribuição de campo eletromagnético, os resultados de simulação computacional são semelhantes aqueles observados nos processos anteriores, onde as principais diferenças são notórias na região do arame eletrodo, como pode ser observado na Fig. 4.25, como exemplo de um dos resultados computacionais oriundos do processo GMAW. A ausência de diferenças apreciáveis entre os testes de simulação computacional quanto a distribuição de campo eletromagnético, justifica o uso de apenas uma imagem como sendo representativa para todo o processo.

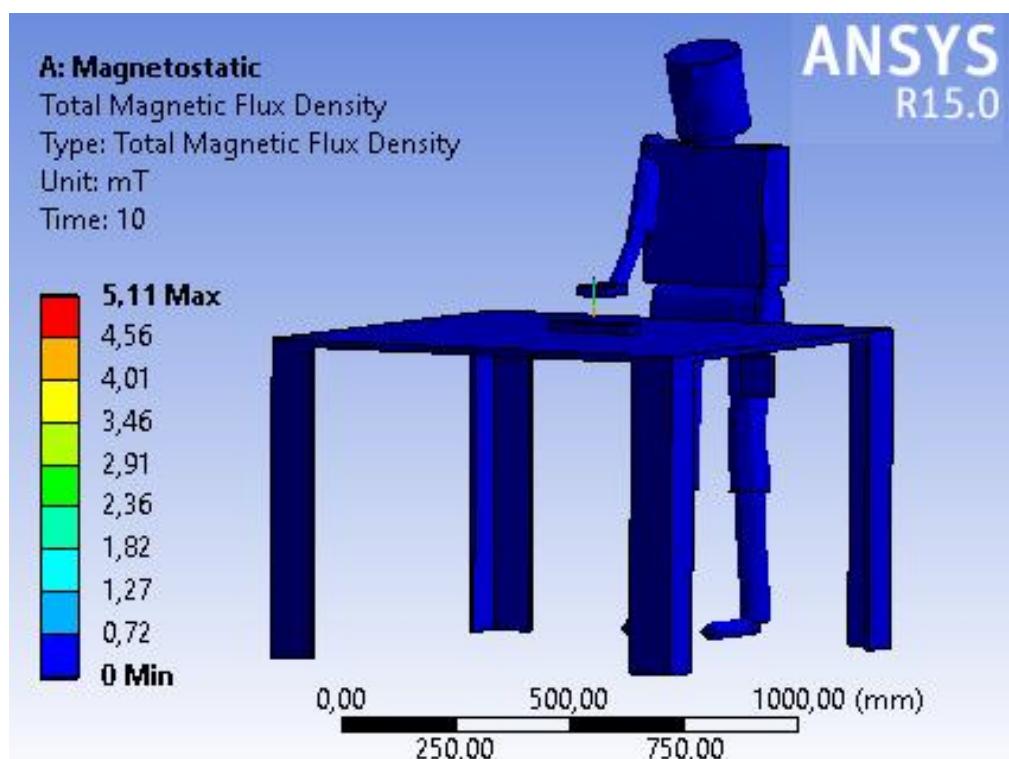


Figura 4.25 – Distribuição de campo eletromagnético para o processo MIG/MAG

4.5. Avaliação de campos eletromagnéticos para o processo de soldagem RSW

A codificação dos processos de soldagem por resistência foi feita de maneira semelhante aos demais processos. A codificação é constituída inicialmente de duas letras maiúsculas indicando o processo (R para soldagem por resistência) e a modalidade (A para

o processo AC e D para o processo MFDC) seguida de um número equivalente ao ensaio. Na sequência, são apresentadas as demais informações do processo, conforme descrito na Tab. 4.14. Após cada letra maiúscula representativa da variável correspondente, há um número indicativo no nível empregado ou tipo, conforme o parâmetro mencionado.

Tabela 4.14 - Codificações dos parâmetros experimentais para soldagem RSW

Soldagem por resistência – Código (R)	
Versão AC – Código (A)	Versão MFDC – Código (D)
Corrente – Código (C)	
Nível baixo (3000 A) – Código (1)	Nível alto (6000 A) – Código (2)
Material – Código (M)	
Chapas sem galvanização – Código (1)	Chapas galvanizadas – Código (2)

Na soldagem por resistência não foi possível fazer aquisição de dados e, por isso, os sinais elétricos foram medidos com os aparelhos descritos no Item 3.5. Os resultados dos sinais elétricos, segundo o planejamento experimental proposto estão dispostos na Tab. 4.15, onde se observa que os valores de corrente encontram-se dentro da faixa estipulada para a execução do processo e que os baixos valores de tensão são devidamente esperados para esse tipo de processo de soldagem (Aures, 2006).

Tabela 4.15 - Medidas de sinais elétricos para a soldagem RSW

Ensaio (Código)	Corrente (A)		Tensão (V)	
	Média	RMS	Média	RMS
RA1C1M1	3000	2121	0,9	0,7
RA2C2M1	6005	4251	1,5	1,1
RA3C1M2	3000	2121	1,0	0,7
RA4C2M2	6000	4242	1,5	1,1
RD5C1M1	2998	2120	1,5	1,1
RD6C2M1	6000	4243	1,8	1,3
RD7C1M2	3000	2121	1,6	1,1
RD8C2M2	6000	4243	1,6	1,2

A análise de variância realizada para um nível de significância de 95% revela um modelo estatisticamente significativo quanto aos resultados da tensão (Tab. 4.16). Tendo em

vista a correta execução dos ensaios, é possível dar segmento com a investigação de campos eletromagnéticos por via experimental e computacional, cujo procedimento inicial também refere-se a análise de variância dos resultados, seguindo o mesmo padrão estatístico adotado nesse trabalho.

Tabela 4.16 – Níveis de significância para análise dos resultados da soldagem RSW

Variável	Tensão	Nível de significância	
		Campo eletromagnético (E)	Campo eletromagnético (S)
Média	0,00	0,00	0,00
Versão do processo	0,00	0,01	0,04
Corrente	0,00	0,00	0,01
Revestimento	1,00	0,02	0,05
Ponto de medição	-	0,00	0,00

Os resultados da ANOVA, mostrados na Tab. 4.16 quanto aos valores demonstram que todas as variáveis analisadas por ambas as metodologias são estatisticamente significativas quanto a intensidade de campo eletromagnético oriundo de processos de soldagem por resistência a ponto ($p \leq 0,05$). Os valores obtidos por ambas as metodologias são mostrados na Tab. 4.17.

Tabela 4.17 – Medidas de campo eletromagnético para a soldagem RSW

Ensaio (Código)	Campo eletromagnético (E) (mT)				Campo eletromagnético (S) (mT)			
	(1)	(2)	(3)	(4)	(1)	(2)	(3)	(4)
RA1C1M1	3,108	0,024	0,273	0,551	3,126	0,032	0,297	0,573
RA2C2M1	3,523	0,078	0,387	0,678	3,658	0,076	0,394	0,656
RA3C1M2	2,229	0,012	0,058	0,407	2,233	0,016	0,050	0,421
RA4C2M2	3,447	0,034	0,163	0,539	3,454	0,042	0,172	0,533
RD5C1M1	2,344	0,085	0,167	0,595	2,371	0,086	0,173	0,620
RD6C2M1	2,637	0,097	0,191	0,631	2,616	0,086	0,197	0,648
RD7C1M2	1,642	0,073	0,134	0,414	1,691	0,071	0,136	0,420
RD8C2M2	1,728	0,097	0,207	0,559	1,818	0,093	0,208	0,544

Legenda: (1) Mão. (2) Cabeça, (3) Tronco e (4) Cintura

A averiguação dos dados da Tab. 4.17 permite afirmar que no processo feito em modo corrente alternada (AC) o campo eletromagnético é maior, concordando com o estudo de Mair

(2005) e Canova et. al. (2010) onde é relatado que os campos eletromagnéticos gerados por correntes alternadas são maiores que os gerados por corrente contínua (Fig. 4.26). Cabe lembrar que as escalas dos gráficos para este processo também precisam ser diferentes dos demais, o que não é ideal, mas necessário em função dos maiores níveis de corrente empregados.

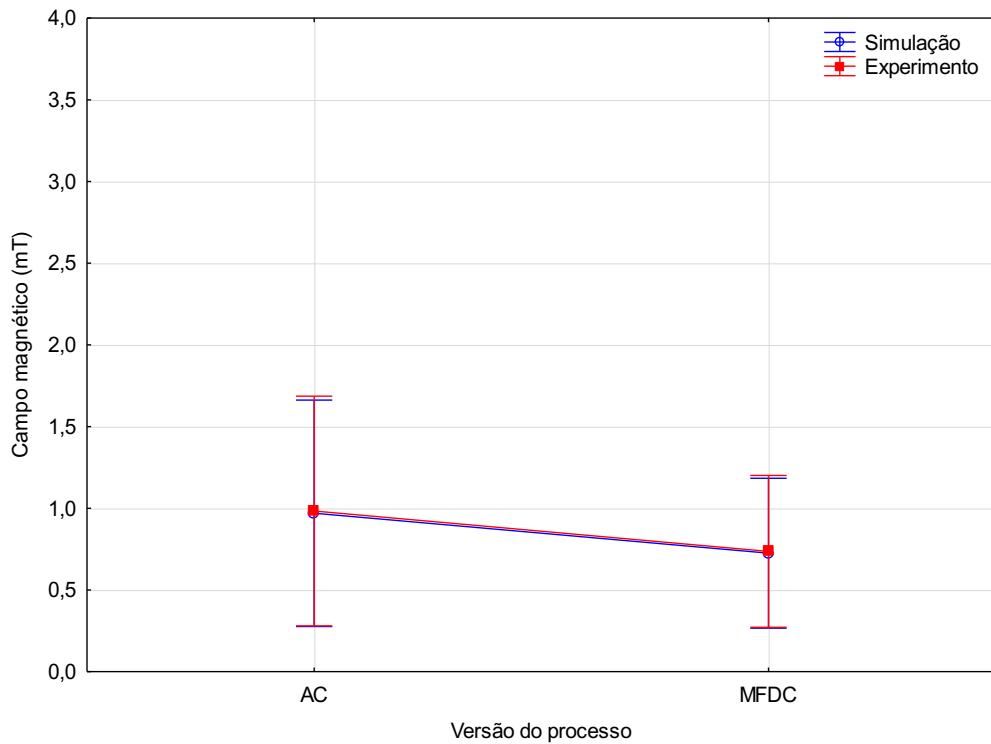


Figura 4.26 - Influência da versão do processo no valor de campo eletromagnético no processo de soldagem RSW

Assim como nos demais processos estudados, o campo eletromagnético oriundo da faixa de corrente mais alta foi maior (Fig. 4.27). A justificativa é a mesma utilizada nos outros resultados. Em acordo com a Lei de Biot-Savart, o campo eletromagnético cresce com o aumento da corrente de soldagem. Ainda é possível reforçar esse resultado ao comparar os valores de campos eletromagnéticos (Tab. 4.17) com os dados encontrados na literatura. Os resultados encontrados nesse trabalho são mais próximos dos estudos de Stuchly e lecuyer (1989), Silny et al. (2001) e Garrido (2013), sobretudo para a região da cintura do soldador, mas são menores que aqueles observados por Cooper (2002) e Melton (2005), provavelmente em virtude do uso de correntes superiores nesses dois últimos trabalhos.

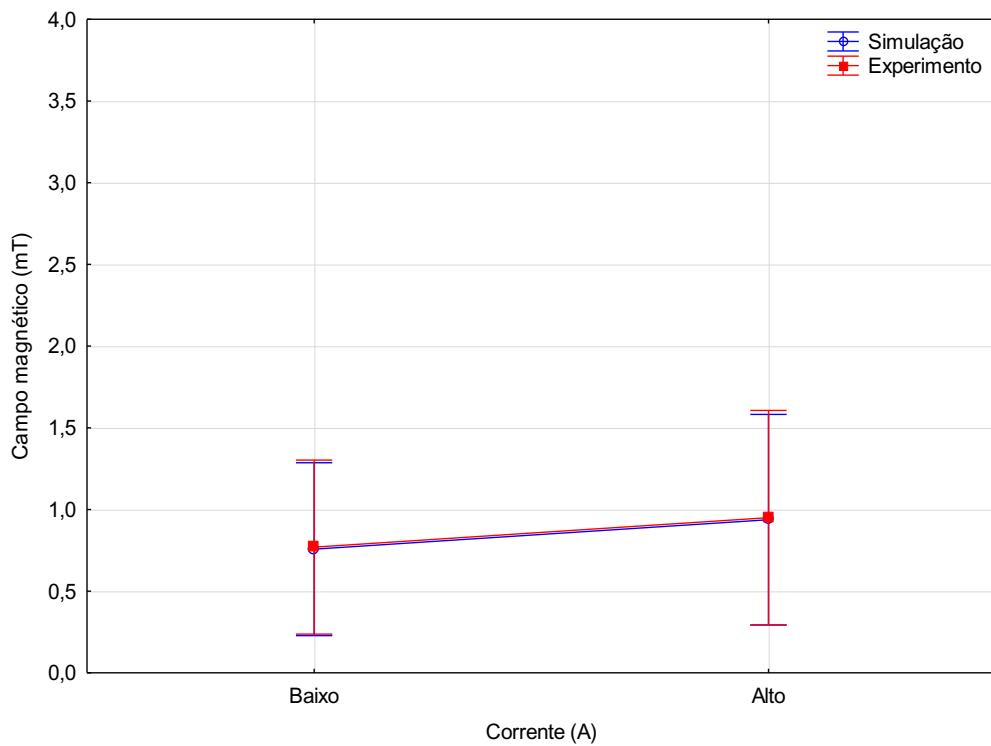


Figura 4.27 - Influência da corrente no valor de campo eletromagnético no processo de soldagem RSW

Com relação ao revestimento do material os resultados mostram que os testes feitos com chapas galvanizadas geraram menor campo eletromagnético (Fig. 4.28). Segundo Cruz (2005), o zinco é um material diamagnético (possui permeabilidade magnética menor que 1) e reduz a intensidade do campo eletromagnético. Assim, acredita-se que na soldagem de chapas galvanizadas, o zinco presente em seu revestimento alteraria a permeabilidade magnética do meio de modo a reduzir a intensidade de campo eletromagnético gerado. Um efeito similar foi observado na soldagem TIG em soldagens com materiais diferentes.

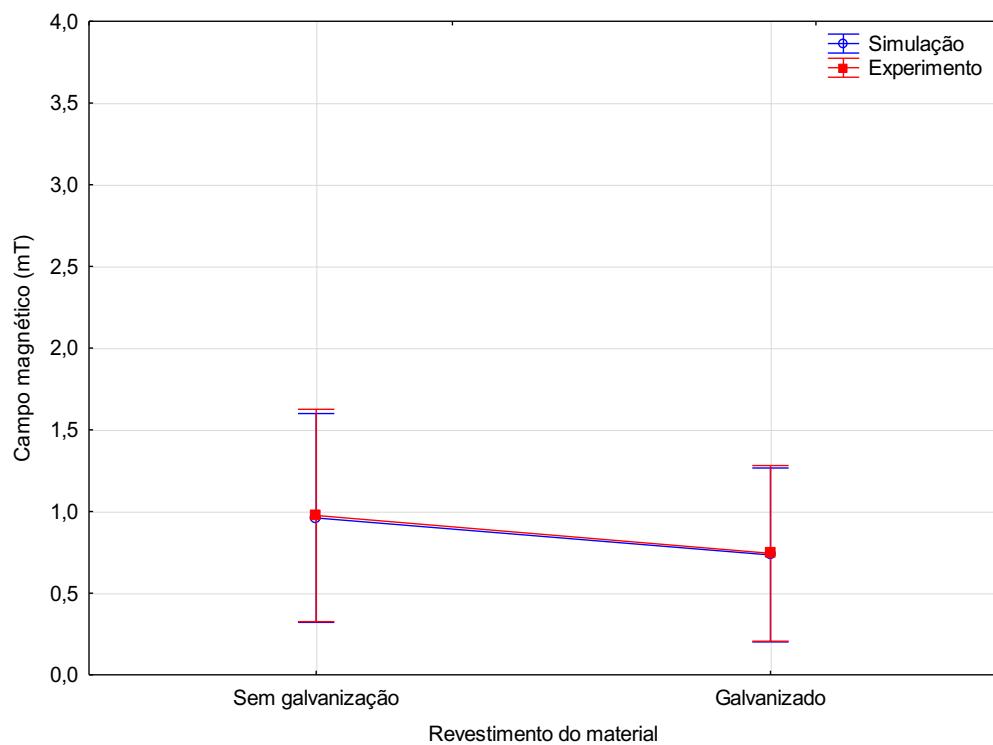


Figura 4.28 - Influência do revestimento do material no valor de campo eletromagnético no processo de soldagem RSW

No que se refere ao ponto de medição, os dados obtidos nos experimentos e por simulação computacional mostraram que, assim como nos processos de soldagem a arco, o maior valor de campo eletromagnético ocorre na mão do soldador. Os resultados da literatura de trabalhos referente a exposição de campos eletromagnéticos em processos de resistência não trazem medidas de campo eletromagnético no corpo de soldador, mas mostram que quanto menor é a distância do soldador ao equipamento de soldagem maior é o valor ao campo eletromagnético, bem como relatado nos estudos de Stuchly e lecuyer (1989) e Nadeem et al. (2004). Dessa forma, o campo eletromagnético é maior na mão do soldador pelo fato deste ser o ponto mais próximo a máquina de soldagem e, no caso da soldagem em modo AC, o soldador precisa estar segurando a alça da pinça de soldagem. O segundo ponto de maior valor de campo na cintura, seguido do tronco e cabeça, em coerência com as distâncias destes pontos a máquina de soldagem, conforme é mostrado na Fig. 4.29.

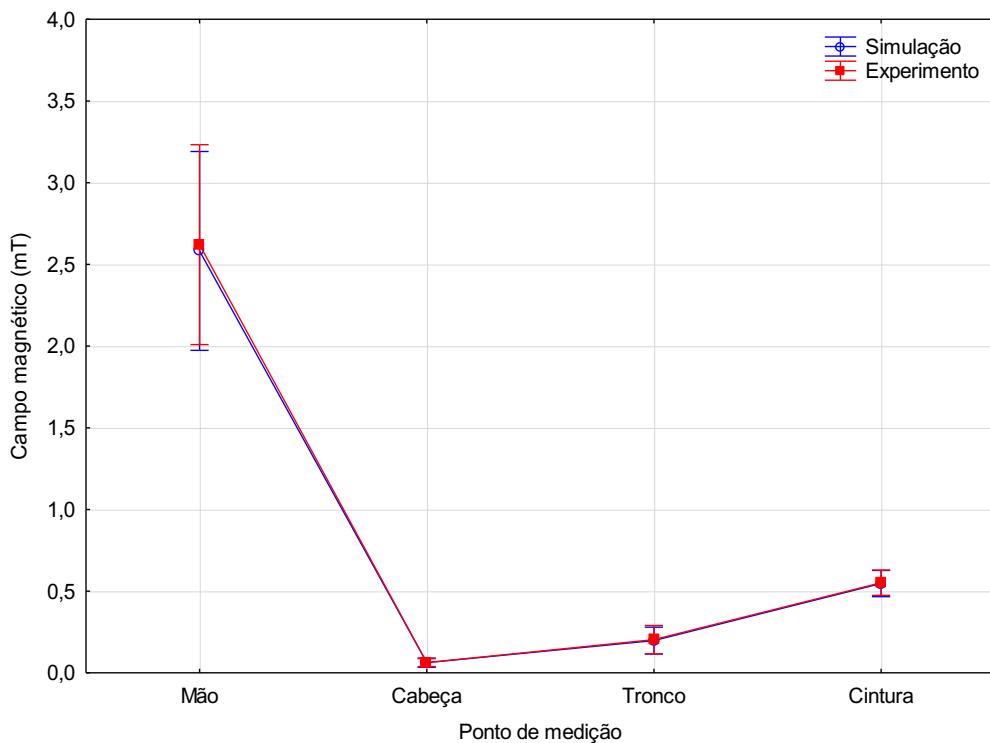


Figura 4.29 - Influência do ponto de medição no valor de campo eletromagnético no processo de soldagem RSW

Os resultados destes ensaios feitos na versão MFDC foram comparados com a diretiva do ICNIRP 2009, cujos valores de referência são 2000 mT para a cabeça e tronco e 8000 mT para os membros. Já os valores obtidos no processo na versão corrente alternada AC foram comparados com os limites estabelecidos pela diretiva ICNIRP de 2010, cujo valor limite de campo eletromagnético a frequência de 60 Hz utilizada é de 1 mT. Ao comparar os resultados obtidos com os limites determinados nestas diretrivas verificou-se que na soldagem feita na versão AC, os valores de referência foram ultrapassados na mão do soldador, chegando a atingir até 3 vezes mais o valor permitido. Nos demais pontos de medição e na soldagem no modo MFDC esses limites não foram alcançados.

Além da extração dos limites estabelecidos pela ICNIRP de 2010 para o caso da soldagem RSW no modo AC, outro fato que chama a atenção é que, de modo semelhante ao que ocorre no processo MIG/MAG, a faixa de valores de campos eletromagnéticos é superior a 0,5 mT, o que, de acordo com Desidério (2017), pode representar mudanças na latência de respostas em testes complexos de raciocínio, sensações visuais oscilatórias, excitabilidade do sistema nervoso central, efeitos irreversíveis como fibrilações cardíacas, alterações no metabolismo do cálcio e possíveis supressão na produção de melatonina.

Quanto aos resultados de simulação computacional, há grande semelhança com os resultados experimentais e este fato pode ser atribuído à fiel reprodução dos parâmetros

operacionais no ambiente virtual, bem como do posicionamento do soldador com relação a máquina de soldagem. Além disso, essa semelhança permite afirmar que a estimativa das propriedades magnéticas para as chapas galvanizadas e sem galvanização se mostra satisfatória. No que se refere a distribuição de campo eletromagnético no ambiente de soldagem, embora nesse processo os valores de campo eletromagnético sejam mais altos, as diferenças são mais perceptíveis também na região do eletrodo por onde passa a corrente de soldagem, de modo semelhante ao que ocorre nos processos de soldagem a arco, como é ilustrado na Fig. 4.29. Destaca-se que assim como nos processos de soldagem a arco, a região do eletrodo também não é objeto de estudo para o processo RSW.

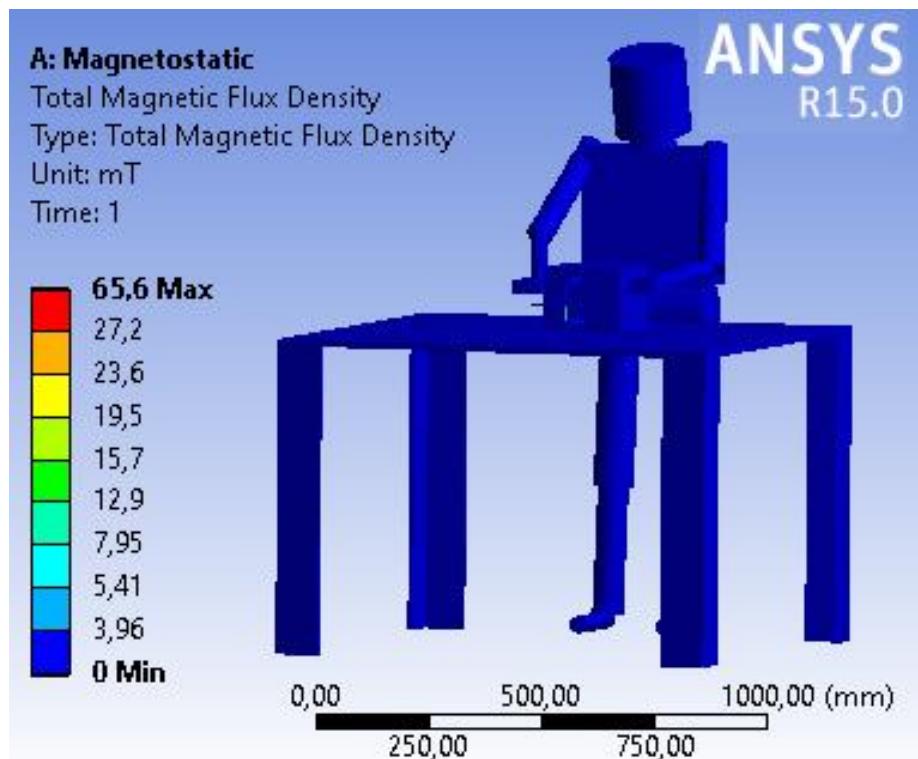


Figura 4.30 - Distribuição do campo eletromagnético no processo de soldagem RSW

4.6. Considerações finais sobre a avaliação de campos magnéticos nos processos de soldagem

De modo geral, a partir da análise dos resultados apresentadas é possível verificar que a corrente de soldagem é, de fato, o fator predominante quanto a influência na geração de campos eletromagnéticos. Aqueles processos em que foram empregados corrente de maior valor apresentaram também campo eletromagnético mais intenso, bem como estimando por alguns trabalhos da literatura tais como Melton (2005) e Ali (2012). Desse modo, os maiores

valores de campo eletromagnético foram registrados para o processo de soldagem RSW, em acordo ao estudo de Man e Shahidan, 2007, depois na soldagem GMAW, em seguida na soldagem SMAW e, por fim, na soldagem GTAW. No entanto, esses dois últimos apresentam resultados bem próximos, bem como é revelado na Fig. 4.31. O maior valor de campo eletromagnético registrado na soldagem com Eletrodo revestido com relação ao processo GTAW também foi relatado por Freschi et al. (2016).

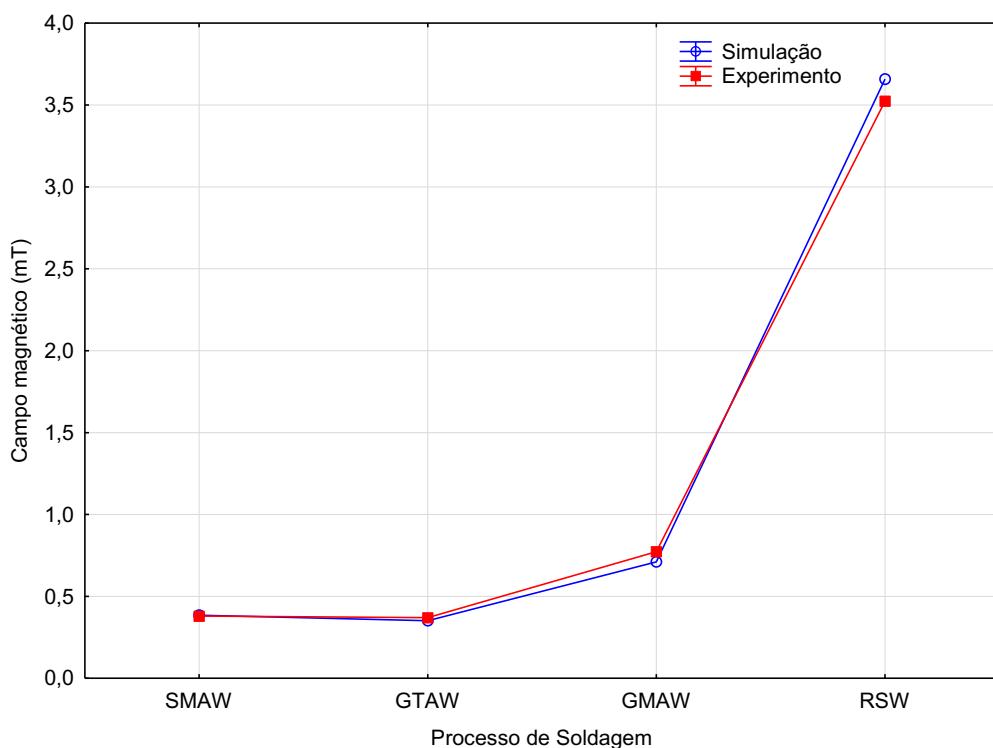


Figura 4.31 – Intensidade de campo eletromagnético nos processos de soldagem

Foi possível verificar que as características geométricas do arco podem influenciar significativamente na intensidade de campo eletromagnético, uma vez que, pela interpretação da Lei de Biot-Savart, a menor distância radial, conduz a campos eletromagnéticos mais intensos, justificando os maiores valores registrados para soldagens em que se utilizava arcos de maior comprimento. Desse modo é possível afirmar que há uma tendência de interferência da proteção gasosa utilizada nos processos GTAW e GMAW na intensidade de campo eletromagnético. Essa influência, é embasada na modificação do formato do arco elétrico que pode ocorrer em função da perda radial de calor ao empregar gases com maior condutividade térmica (Mondenesi, 2012), uma vez que a proteção gasosa não causa modificações perceptíveis na permeabilidade magnética do meio, fator que influencia diretamente na geração de campos eletromagnéticos mais ou menos intensos.

Na soldagem com materiais distintos durante o processo GTAW ou na soldagem SMAW, atribui-se as diferenças entre os valores de campos eletromagnéticos à alteração de permeabilidade magnética do meio ocasionada pela geração de vapores metálicos ou da decomposição de revestimentos contendo ferro, elemento de alta permeabilidade magnética, capaz de realizar tal modificação.

No que se refere a ponto de medição, em todos os processos estudados foi verificado que a mão do soldador é o ponto de maior concentração de campo eletromagnético, pelo fato deste ser o ponto mais próximo aos equipamentos de soldagem e pela necessidade do trabalhador está segurando o porta-eletrodo ou tocha de soldagem, assim como observado na grande maioria dos trabalhos da literatura. Os valores de campo eletromagnético registrados para os outros pontos de medição (cabeça, cintura e tronco) apresentaram padrões diferentes em cada processo, uma vez que, de acordo com Dasdag et al. (2002) o campo eletromagnético se distribui de forma não homogênea pelo corpo e cada processo o soldador pode mudar a posição de soldagem, aproximando ou afastando os diferentes pontos de medição avaliados.

Ressalta-se que neste estudo o grau de mecanização do processo não pôde ser avaliado, uma vez que todos os testes foram realizados na versão manual e que, no que se refere à exposição de soldadores/operadores, os valores de campo eletromagnético encontrados para os processos SMAW, GTAW e GMAW não ultrapassaram os limites de estabelecidos pelas diretrivas do ICNIRP, dentro do envelope de trabalho utilizado (Fig. 4.31). O mesmo não pode ser dito para o processo de soldagem RSW na versão AC, onde verifica-se a transgressão de até três vezes do limite referente à tal processo.

Com relação a simulação computacional, é possível verificar que o desenvolvimento do modelo e a estimativa de propriedades magnéticas foram adequados tendo em vista a proximidade entre os resultados computacionais e experimentais. Ainda, ressalta-se que a malha utilizada, embora seja adequada à obtenção dos resultados, não mostra imagens suavizadas referente a distribuição de campo eletromagnético. No entanto, em todos os casos as diferenças que ainda seriam perceptíveis seriam na região dos eletrodos ou arames que, em virtude das diferenças dimensionais com relação aos outros elementos do modelo, também não resultariam em imagens muito melhores, sem contar que essas regiões não são foco do presente estudo e, portanto, não justificam o custo computacional.

No âmbito da saúde ocupacional, para Rosen (2003), a faixa de valores registradas classifica os campos eletromagnéticos medidos nesse estudo como fracos ou moderados. Excetuando-se o processo RSW na versão AC, os limites estabelecidos pelas diretrivas do ICNIRP não foram ultrapassados, embora os valores de campos eletromagnéticos observados podem representar riscos à saúde humana, segundo Desidério (2017). Aliado a

este fato, cabe ressaltar que os limites estabelecidos como parâmetros para essa pesquisa podem ser modificados, bem como ressaltado por Grassi et al. (2012). Nesse contexto, reforça-se a importância desse estudo em função do seu potencial de contribuição com a saúde ocupacional de soldadores.

CAPÍTULO V

CONCLUSÃO

Em virtude do objetivo proposto neste trabalho de avaliar influência das variáveis operacionais dos processos de soldagem no valor do campo eletromagnético gerado e comparar os valores de campo eletromagnético obtidos nestes processos com os limites de referência contidos nas diretrivas mais recentes da ICNIRP, é possível concluir com base nos resultados obtidos nas condições experimentais especificadas e através da simulação computacional que:

a) Em relação a metodologia empregada na medição de campos eletromagnéticos:

A metodologia utilizada na realização dos ensaios e medições se mostrou adequada ao revelar resultados coerentes com aqueles registrados na literatura ou justificáveis a partir de teorias do eletromagnetismo ou embasados em estudos de outros autores.

b) Em relação a simulação computacional para medição de campos eletromagnéticos

A metodologia empregada para criação do modelo e a utilização de elementos finitos no software ANSYS® através do pacote computacional *magnetostatic* se mostrou satisfatória dentro dos objetivos desse estudo, visto que foram permitidas a criação do modelo, ainda que simplificado, que corresponesse as configurações dos experimentos.

O método elaborado para a estimativa de propriedades não obtidas na literatura também foi adequado ao passo que revelou resultados computacionais semelhantes aqueles encontrados por via experimental, o que constitui uma referência preliminar para trabalhos

futuros, visto a grande dificuldade em reproduzir tais condições experimentais em ambientes de simulação computacional.

c) Em relação a influência das variáveis analisadas nos processos de soldagem no valor do campo eletromagnético:

O aumento da corrente de soldagem conduz a campos eletromagnéticos de maior valor.

O aumento na altura do arco representa geração de campos eletromagnéticos de menor valor em função do formato cônico do arco de soldagem.

A permeabilidade magnética do meio influencia na intensidade de campo eletromagnético, logo alterações na atmosfera local causadas por vapores metálicos ou pela decomposição de revestimentos interferem no aumento ou diminuição do valor de campo eletromagnético.

No processo SMAW, eletrodos com revestimento celulósico produzem campos eletromagnéticos menores que aqueles gerados em soldagem com eletrodos rutílicos e básicos.

Especificamente para o processo GTAW, em testes feitos com proteção gasosa Ar+25%He foi registrado maior campo eletromagnético do que aquelas realizadas com Ar puro, possivelmente em função do formato do arco assumido com este tipo de gás de proteção.

Quanto a soldagem com diferentes materiais, soldagens GTAW feitas com aço carbono 1020 apresentam campo eletromagnético maior que em soldagens feitas com aço inoxidável austenítico em corrente contínua. Em ambos os casos o valor de campo eletromagnético é superior ao registrado em soldagens com alumínio no modo corrente alternada.

No que se refere ao processo GMAW, a intensidade do campo eletromagnético é maior quando empregadas maiores velocidades de alimentação e de tensão. Na soldagem em modo curto-circuito convencional os maiores valores de campo eletromagnético são alcançados quando se utiliza Ar + 25% de CO₂ como proteção gasosa. As versões do processo que demandam maior corrente de soldagem, também apresentam campos eletromagnéticos de maior valor.

Embora haja diferenças quanto a intensidade de campo eletromagnético em relação ao modo de transferência metálica, não é possível atribuir uma relação direta entre o modo de transferência metálica com a intensidade de campo eletromagnético.

A soldagem RSW na versão AC revela maiores valores de campo eletromagnético que na versão MFDC. Nesse processo, o campo eletromagnético é mais intenso quando empregadas chapas sem galvanização em comparação às chapas galvanizadas.

A mão do soldador é o ponto de medição onde se registra maior valor de campo eletromagnético, por ser este o ponto mais próximo a máquina de soldagem ou pelo fato do soldador precisar segurar o porta-eletrodo ou a tocha de soldagem. Os valores de campo eletromagnético obtidos na cintura, tronco e cabeça do soldador podem ser mais ou menos intensos a depender do processo, pelo fato do soldador mudar de posição de um processo para outro.

Os valores de campo eletromagnético encontrados para os processos SMAW, GTAW e GMAW não ultrapassaram os limites de estabelecidos pelas diretrivas do ICNIRP, dentro do envelope de trabalho utilizado. No entanto os valores oriundos da soldagem RSW na versão AC excedem o limite de referência estabelecido por essa diretiva.

A proximidade entre os resultados alcançados por ambas as metodologias pode ser atribuída à necessidade de reprodução do máximo de condições experimentais possíveis.

d) Em relação as contribuições com a saúde ocupacional

Visto que na soldagem é indispensável a presença do soldador/operador para realização do processo, esse estudo é de fundamental importância à saúde ocupacional, uma vez que, em posse de tal conhecimento, é possível revisar condições ou técnicas operatórias, que reduzam a geração de campos eletromagnéticos em caso que estes excedam os limites estabelecidos pelas diretrivas do ICNIRP. Para tanto, o desenvolvimento de ferramentas computacionais contribui com a previsão desses valores, por exemplo, para o estudo de novos processos, em que sejam empregados parâmetros que conduzam campos eletromagnéticos mais intensos.

Nesse sentido, embora somente durante a soldagem RSW na versão AC os limites estabelecidos pelas diretrivas ICNIRP foram excedidos, em todos os demais processos estudados há evidências que os valores de campos eletromagnéticos registrados podem representar adversidades à saúde humana e, por essa razão, algumas recomendações podem ser feitas a partir dos resultados encontrados nesse estudo, tais como: redução nos valores de corrente de soldagem e aumento da altura do arco, bem como análise das propriedades eletromagnéticas do revestimento de eletrodos e propriedades térmicas dos gases de proteção. Um cuidado especial deve ser tomado ao utilizar processos em corrente alternada e altos valores de corrente, visto que o limite de exposição, segundo as diretrivas do ICNIRP, é bem menor.

CAPÍTULO VI

TRABALHOS FUTUROS

Embora não existam muitos indícios comprovados dos efeitos do campo eletromagnético na saúde humana, é preciso estar atento quanto a exposição de soldadores aos campos eletromagnéticos gerados nos processos de soldagem, sobretudo para aqueles onde são empregados maiores valores de corrente e que são realizados em modos corrente alternada.

Sob este aspecto, sugere-se dar continuidade aos estudos dos campos eletromagnéticos emitidos nos processos de soldagem arco utilizando-se versões automatizadas dos processos estudados em condições experimentais diferentes.

Aprofundar o estudo acerca do processo MIG/MAG nos modos de transferência metálica curto-circuito convencional, curto-circuito controlado, globular e pulsado afim de obter relações entre o modo de transferência metálica e a geração de campo eletromagnético.

Estender esse estudo para outros processos de soldagem, tais como arco submerso e processos híbridos e derivativos dos processos estudados.

Estudar outras metodologias de medição de campo eletromagnético através de sensores acoplados ao soldador que permitam melhores condições experimentais de medição.

Refinar o modelo computacional proposto afim de obter reproduções ainda mais fieis do ambiente experimental de soldagem.

Criação de uma plataforma virtual comercial para previsão de campos eletromagnéticos em processos de soldagem como medida de segurança ocupacional para a indústria metal mecânica.

Em parceira com estudiosos das ciências biológicas, ampliar os estudos acerca da interação de campos eletromagnéticos com organismos vivos por meio simulação computacional e via experimental, resguardadas as devidas proporções éticas da pesquisa.

CAPÍTULO VII

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALI, K.J. Measurement of magnetic fields emitted from welding machines. **Diyala journal of engineering sciences.** v. 5, n. 2, p. 114-128, 2012.

AHLBOM et al. Occupational magnetic field exposure and myocardial infarction incidence. **Epidemiology.** v. 15, n. 4, p. 403-408, 2004.

<https://doi.org/10.1097/01.ede.0000129516.92192.60>

ALLEN, et al. **Review of occupational exposure to optical radiation and electric and magnetic fields with regard to the proposed CEC physical agents directive.** NRPB-R265, 1994.

ASHCROFT, N.W.; MERMIN, N.D. Solid State Physics, Thomson Learning, 1976.

AURES, J. E. V. **Estudo da formação, geometria e resistência do ponto na soldagem por resistência: uma abordagem estatística.** 2006. 164 f. Dissertação de mestrado, Universidade de Brasília.

AZEVEDO et al. Uma revisão de soldagem a plasma de alumínio. **XIII Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia,** Uberlândia, 2003.

AZEVEDO, S. C. **Avaliação de aspectos operacionais do processo de soldagem TIG-MIG/MAG.** 2019. 109 f. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Goiás, Catação, Goiás.

BARROS, J. P. A. A.; MORAIS, M. V. G. Identificação dos riscos químicos nos processos de soldagem e suas medidas de proteção. **Nucleus**. v. 14, n. 2, p. 63-76, 2017.

<https://doi.org/10.3738/1982.2278.2693>

BATISTA, K. T. et al. O papel dos comitês de ética em pesquisa. **Revista brasileira de cirurgia plástica**. v. 27, n. 1, p. 150-155, 2012. <https://doi.org/10.1590/S1983-51752012000100025>

BEDNAREK, K. Electromagnetic action of heavy-current equipment operating with power frequency. **International journal of occupational safety and ergonomics (JOSE)**. v. 5, n. 3, p. 357 – 368, 2010. <https://doi.org/10.1080/10803548.2010.11076851>

BEKHITE, M. M. et al. Differential effects of high and low strength magnetic fields on mouse embryonic development and vasculogenesis of embryonic stem cells. **Reprod toxicol**. v. 65, p. 46-58, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.reprotox.2016.06.016>

BIANCHI, H. **Riscos existentes nos ambientes de soldagem em uma indústria metalúrgica**. 2014. 43 f. Monografia de especialização, Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

BOLTE, J. F. B.; PRUPPERS, M. J. M. **Electromagnetic fields in the working environment**, Report of ministry of social affairs and employment (SZW), 2006.

BOWMAN, et al. Exposure to extremely low frequency (ELF) electromagnetic fields in occupations with elevated leukemia rates, **Applied industrial hygiene**. v. 3, n. 6, 1988.

BRASIL. Resolução nº 303, de 2 de julho de 2002. **Regulamento sobre Limitação da Exposição a Campos Elétricos, Magnéticos e Eletromagnéticos na Faixa de Radiofreqüências entre 9 kHz e 300 GHz**. Disponível em <<https://www.anatel.gov.br/legislacao/resolucoes/17-2002/128-resolucao-303>>. Acesso em: 12 de setembro de 2019.

BRASIL. Lei nº 11.934, de 5 de maio de 2009. **Dispõe sobre limites à exposição humana a campos elétricos, magnéticos e eletromagnéticos**. Disponível em <<https://www.anatel.gov.br/legislacao/leis/426-lei-11934>> Acesso em: 12 de setembro de 2019.

BRASIL. Resolução nº 466, de 12 de dezembro de 2012. Disponível em <https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/cns/2013/res0466_12_12_2012>. Acesso em 30 de outubro de 2018.

BRASIL. Resolução nº 700, de 28 de setembro de 2018. **Aprova o Regulamento sobre a Avaliação da Exposição Humana a Campos Elétricos, Magnéticos e Eletromagnéticos Associados à Operação de Estações Transmissoras de Radiocomunicação.** Disponível em <<https://www.anatel.gov.br/legislação/resoluções/2018/1161-resolucao-700>>. Acesso em: 12 de setembro de 2019.

BRASIL. Ministério do trabalho e emprego. **NR 15– Atividades e operações insalubres.** Disponível em: <<http://www.mte.gov.br>>. Acesso em: 03/07/2015.

CAPELARI, T.V.; MAZZAFERRO, J.A.E. Avaliação da geometria de ferramenta e parâmetros do processo FSW na soldagem da liga de alumínio AA 5052. **Soldagem & Inspeção.** v.14, n. 3, p. 215-227, 2009. <https://doi.org/10.1590/S0104-92242009000300005>

CANOVA, et al Evaluation of workers exposure to magnetic fields. **The european physical journal applied physics.** v. 52, p. 1 -5, 2010. <https://doi.org/10.1051/epjap/2010009466>

CANOVA, et al A simplified procedure for the exposure to the magnetic field produced by resistance spot welding guns. **IEEE Transactions on magnetics.** v. 52, n. 3, 2016. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2015.2479297>

CIAMPI, J. C. S. **Estudo de condições de trabalho em laboratório de soldagem de uma instituição de ensino profissionalizante.** 2013. 92 f. Monografia de especialização - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba.

COOPER, T.G. **Occupational exposure to electric and magnetic fields in the context of the ICNIRP guidelines,** NRPB-W24, 2002.

COSTA, T. F. **Aplicação de processos MAG curto-círcito convencional e controlado na soldagem de dutos de aço carbono.** 2011. 197 f. Dissertação de mestrado - Universidade Federal de Uberlândia, Minas Gerais. <https://doi.org/10.1590/S0104-92242012000400010>

CENTURION, J. M. R. **Segurança do trabalho na distribuição do acetileno.** 2003. 168 f. Dissertação de mestrado - Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina.

CERQUEIRA, S. I. C. **Proteção contra radiação não-ionizante: arco eléctrico.** 2013. 77 f. Dissertação de mestrado - Faculdade de ciências e tecnologia da universidade de Coimbra, Coimbra.

CROTTI, G.; GIORDANO, D. Analysis of critical situations in the evaluation of human exposure to magnetic fieldswith complex waveforms. **Radiation protection dosimetry.** p. 1 - 4, 2009. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncp228>

DANELON, M. R. et al. Estudo do efeito da nitretação iônica a plasma na resistência ao desgaste do aço SAE 1020 utilizado em matriz de conformação. **Revista brasileira de aplicações de vácuo.** v. 39, n. 2, p. 142-155, 2020.

<https://doi.org/10.17563/rbav.v39i2.1166>

DASDAG, S. et al Effects of extremely low frequency electromagnetic fields on hematologic and immunologic parameters in welders. **Archives of medical research.** v. 33, p. 29 - 32, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0188-4409\(01\)00337-X](https://doi.org/10.1016/S0188-4409(01)00337-X)

DESIDERE, D.; MASCHIO, A. Human exposure during operation of GMAW-P welding machines. **The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering.** v. 31, n. 4, p. 1144 - 1153, 2012.
<https://doi.org/10.1108/03321641211227393>

DESIDÉRIO, D. L. **Efeitos dos campos eletromagnéticos estáticos e compensados na proliferação celular in vitro.** 2017. 109 f. Tese de doutorado - Universidade de São Paulo, São Paulo.

DIAS, M. H. C.; SIQUEIRA, G. L. Considerações sobre os efeitos à saúde humana da irradiação emitida por antenas de estações de rádio - base de sistemas celulares. **Revista científica periódica – telecomunicações.** v. 5, n. 1, p. 41 - 54, 2002.

DOBBELIN, R. et al. Measurement and evaluation of pulsating environmental magnetic fields by the example of resistance welding installations. **International conference on electromagnetic compatibility,** China, 2002.

DOBBELIN, R.; FOSTER, S.; LINDEMANN, A. Reference system for basic-restrictions related evaluation of magnetic field exposure. **International symposium on electromagnetic compatibility**, Suécia, 2014.

<https://doi.org/10.1109/EMCEurope.2014.6930934>

DUGHIERO, F.; FORZAN, M.; SIENI, E. A numerical evaluation of electromagnetic fields exposure on real human body models until 100 kHz. **Journal international for computation and mathematics in electrical and electronic engineering**. v. 29, n. 6, p. 1552-1561, 2010.

EN 50444:2008-02. **Basic standard for the evaluation of human exposure to electromagnetic fields from equipment for arc welding and allied processes**.

Esferas em carboneto de tungstênio ligante Co Tc K10. **Rpgballs**. Disponível em:<<https://www.rpgballs.com/pt/>> Acesso em 20 de maio de 2019.

FARRUGIA, L. et al. Extremely low frequency magnetic fields in the work environment. In **Electromagnetic Research Symposium (PIERS)**, Shanghai, China, 2016.

<https://doi.org/10.1108/03321641011078625>

FORTES, C.; VAZ, C.T. Apostila de eletrodos revestidos. **Esab**, 2005. Disponível em: <<http://www.esab.com.br/>> Acesso em 14 de fev. de 2015.

FRESCHI, F. et al. Electrical safety in arc welding processes. **IEEE Industry Applications Society Annual Meeting**. Portland, OR, USA, 2016.

<https://doi.org/10.1109/IAS.2016.7731954>

FUHR, T. A. **Reconhecimento e avaliação dos riscos ambientais gerados nos processos de soldagem de uma empresa do segmento metal mecânico**. 2012. 76 f. Monografia de curso de pós graduação lato sensu, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul.

GALLEGOS, J.; VENTRELLA, V.A. Inclusões na formação da ferrita acicular: caracterização por microscopia eletrônica de varredura. In: **Anais do 69º Congresso Anual da ABM; 2014**; São Paulo. São Paulo: ABCERAM; 2014. 10 p. <https://doi.org/10.5151/1516-392X-24562>

GARRIDO, A.C.M. **Avaliação da exposição a campos eletromagnéticos em processos de soldadura.** 2013. 125 f. Dissertação de mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal.

GIL, F. S. L. **Análise da qualidade de malha de elementos finitos e validação de situação de caso real de viga biapoiada.** 2015. 76 f. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, Paraná.

GLOBALMAG. **Medidor de campo eletromagnético ambiental: TAMB-3D.** Manual de operação. 2015.

GOMES, G. F. et al. Dynamic behavior investigation of spot welding machines and its influence on weld current range by modal analysis. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering.** v. 39, n. 3, p. 765-77, 2017.

<https://doi.org/10.1007/s40430-016-0580-0>

GOVERNO FEDERAL. **Brasil maior: inovar para competir, competir para crescer.** Plano 2011/2014. Disponível em <www.mdic.gov.br/brasilmaior>. 24p.

GRASSI, F. et al. Human exposure in arc-welding processes: current versus previous ICNIRP basic restrictions. **IEEE International symposium on electromagnetic compatibility (EMC)**, Pittsburgh, Pennsylvania, 2012. <https://doi.org/10.1109/ISEMC.2012.6350920>

GROTELAARS, P. J. **Influência da variação dos parâmetros de soldagem sobre a transferência metálica e perfil do cordão no processo MIG/MAG duplo arame.** 2005. 74 f. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Uberlândia.

HABERMANN, M. Desigualdade social e exposição a campos eletromagnéticos na região metropolitana de São Paulo. **Revista Saúde Pública.** v. 44, n. 4, p. 703-709, 2010.
<https://doi.org/10.1590/S0034-89102010000400014>

HARTMANN, D. **Análise ergonômica da soldagem do produto lança em uma indústria do setor metal mecânica.** 2016. 52 f. Trabalho final de curso, Faculdade Horizontina.

HERRAULT, J.; DONATI, P. 2006. **Soudage par résistance – cartographie du champ magnétique et prévention.** INRS, ND 2252, 204, 2006, p. 21-31.

HERTEL, M. et al. Como a composição do gás define o processo de soldagem a arco. Corte & conformação de metais. v. 12, n. 114, p. 24-35, 2017.

IARC. International Agency for Research on Cancer. **Static and extremely low-frequency electric and magnetic fields**. IARC Monographs on the evaluation of the carcinogenic risks to humans. Lyon: IARC. v. 80, 2002.

IARC. International Agency for Research on Cancer. **IARC Classifies radiofrequency electromagnetic fields as possibly carcinogenic to humans**. Press release. Lyon: IARC. n. 208, p. 6, 2011.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Pesquisas de orçamentos familiares 2008 – 2009**. Disponível em <<http://www.ibge.gov.br>> Acesso em: 10 de outubro de 2015.
ICNIRP. Guidelines on limits of exposure to static magnetic fields. **Health physics**, 66(1), 1994, pp. 100-106.

ICNIRP. Guidelines for limiting exposure to time – varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz). **Health physics**, 74(4), 1998, pp. 494-522.

ICNIRP. General approach to protection against non-ionizing radiation protection. **Health physics**, 82(4), 2002, pp. 540-548. <https://doi.org/10.1097/00004032-200204000-00017>

ICNIRP. Guidelines on limits of exposure to static magnetic fields. **Health physics**, 96(4), 2009, pp. 504-514. <https://doi.org/10.1097/01.HP.0000343164.27920.4a>

ICNIRP. Guidelines for limiting exposure to time – varying electric, magnetic and electromagnetic fields (1 Hz – 100 kHz). **Health physics**, 99(6), 2010, pp. 818-836.
<https://doi.org/10.1097/HP.0b013e3181f06c86>

IEC Standard 62226-3-1:2007-05, **Exposure to electric or magnetic fields in the low and intermediate frequency range – methods for calculating the current density and internal electric field induced in the human body. Part 3-1: Exposure to electric fields – analytical and 2D numerical models** (2007).

ISO 3834:2005. **Quality requirements for fusion welding of metallic materials**, 2005, 7p.

LEITE, J. P. **Técnica não destrutiva para análise da interação de linhas de campo eletromagnético e material.** Tese de doutorado. Universidade Federal da Paraíba, 2014. 149 p.

LEONELLO FILHO, A. **Análise da influência dos parâmetros do processo de soldagem com eletrodos revestidos na estabilidade do arco e características geométricas do cordão.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá, 2005, 107 p.

LINCOLN. **Technology gets to the root of pipe welding.** Disponível em <www.lincolnelectric.com>. Acesso em: 16 de dezembro, 2015.

LIPP, M. E. N, et al. **Exposição a campos eletromagnéticos e saúde: Um estudo brasileiro.** ABRICEM. Editora Papirus. 2010.

LUCENA NETO, J. G. **Um estudo da aplicação do conceito de risco na conscientização e conhecimento de estudante de ensino técnico sobre o risco de segurança e saúde ocupacional em laboratório de soldagem.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2007, 105 p.

MAIR, P. **Assessment of EMF (electromagnetic fields) and biological effects in arc welding applications.** International institute of welding, Commission XII, Intermediate meeting, Fronius international, 2005.

MALAGONI, J. A. **Os elementos finitos no estudo de eletromagnetismo utilizando o software GMASH/GETDP.** Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, 2012, 120 p.

MAN, A.K.; SHAHIDAN R; Variations in occupational exposure to magnetic fields among welders in Malaysia. **Radiation Protection Dosimetry**, v. 128, n. 4, p. 444-448, 2007.
<https://doi.org/10.1093/rpd/ncm434>

MARCILIO, I. et al. Campos eletromagnéticos de frequência extremamente baixa e efeitos na saúde: revisão da literatura. **Revista Brasileira de Epidemiologia**. v. 12, n. 2, p. 105-123, 2009. <https://doi.org/10.1590/S1415-790X2009000200002>

MARTIM, H. C. **Avaliação de Campos Magnéticos Emitidos pelos Processos Eletrodo Revestido e TIG.** 2016. 83 f. Dissertação, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia/MG, Brasil.

MAZZAFERRO, J. A. E. Indústria 4.0 e a qualidade da informação. **Soldagem e Inspeção.** v. 23, n. 1, p. 1-2, 2018. <https://doi.org/10.1590/0104-9224/si2301.01>

MELO, M.L.N.M. et al. Análise dos modelos utilizados para a previsão dos parâmetros microestruturais obtidos durante a solidificação direcional do aço inoxidável austenítico AISI 304. **Revista escola de Minas.** v. 60, n. 1, p. 135-140, 2007. <https://doi.org/10.1590/S0370-44672007000100021>

MELTON, G.B. **Measurement and analysis of magnetic fields from welding processes.** TWI Research Report 338, 2005, 51p.

MILD, K. H. et al Exposure of workers to electromagnetic fields. a review of open questions on exposure assessment techniques. **International journal of occupational safety and ergonomics.** v. 15, n. 1, p. 3–33, 2009. <https://doi.org/10.1080/10803548.2009.11076785>

MONDENESI, P.J.; MARQUES, P.V.; SANTOS, D.B. **Introdução à metalurgia da soldagem.** Universidade Federal de Minas Gerais. Departamento de engenharia metalúrgica e de materiais, 2012. 209p.

MOZETIC, H. **Design do produto: seleção de materiais e processos com aplicação de campo eletromagnético em núcleos de alto-falantes.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2008, 101 p.

NADEEM. M. et al Magnetic field from spot welding equipment is the basic restriction exceeded? **Bioelectromagnetics**, v. 25, p. 278 – 284, 2004.

<https://doi.org/10.1002/bem.10197>

NATIONAL INSTRUMENTS. **Data Sheet NI USB-6008, NI USB-6009.** Disponível em <www.ni.com/pdf/products/us/20043762301101dlr.pdf>. Acesso em: 12 de novembro de 2015.

NERIS, M. M. **Soldagem dos metais.** Disponível em <<http://cursos.unisanta.br>>. Acesso em 05 de dezembro de 2015.

NEVES et al. **Análise comparativa dos eletrodos revestidos E6010 e E6013 em Aço SAE 1020.** Trabalho de conclusão de curso. Senai, Santo Antônio da Platina, 2013. 70 p.

OLIVEIRA, V. **Processos de alta produtividade GMAW: parâmetros não convencionais.** Monografia de especialização, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná. 2013. 31 p.

PEREIRA, J.P.; GONÇALVES, G.M.B. Análise de distorção e corrosão em perfil estrutural soldado tipo U dobrado. **Engenharia Estudo e Pesquisa. ABPE.** v. 17, n. 1, p. 11-17, 2017.

PEIXOTO, A. L. **Soldagem.** Belém do Pará: Escola Técnica Aberta do Brasil, 2012. 90 p.

PINHO, L. C. A. B. **Materiais magnéticos e suas aplicações.** Dissertação de mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2009, 99 p.

QUEIROZ, C. S. **Gestão de riscos da exposição humana a campos eletromagnéticos oriundos de estações rádio base: Estudo de caso.** Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Minas Gerais, 2011, 95 p.

RAMAZANI, A. et al. Caracterização de juntas de aço DP600 confeccionadas por soldagem a ponto por resistência elétrica. **Corte e conformação de metais.** v. 8, n. 139, p. 20-28, 2016.

REIS, et al Influência do tipo de material no rendimento de fusão em soldagem a arco. **Soldagem e inspeção.** v. 16, n. 4, p. 369 – 376, 2011. <https://doi.org/10.1590/S0104-92242011000400008>

ROSA, O. S. **Investigação sobre aspectos de uso energético nos processos de soldagem a resistência por ponto para as versões corrente alternada (AC) e corrente contínua a média frequência (MFDC).** Tese de doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, 2013. 174 p.

RESENDE, A. A., et al. (The Influence of the CO₂ e O₂ Contend on Globular-Spray Transition Current when Using Argon-Base Blends in GMAW of ER70S-6 Wire. **Soldagem & Inspeção**. v. 14, n. 1, p. 26-35, 2009. <https://doi.org/10.1590/S0104-92242009000100004>

ROSEN, A. D. Mechanism of action of moderate-intensity static magnetic fields. **Biochem. Biophys. Acta**. v. 128, p. 149-155, 2003.

SACHIKO, Y. S., et al. Measuring exposed magnetic fields of welders in working time. **Industrial health**, v. 49, p. 274 – 279, 2011. <https://doi.org/10.2486/indhealth.MS1269>

SACHSE, F. et al. Development of a human body model for numerical calculation of electrical fields. **Computerized Medical Imaging and Graphics**. v. 23, n. 3, p. 165-171, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0895-6111\(00\)00016-1](https://doi.org/10.1016/S0895-6111(00)00016-1)

SANTOS, A. O. Exposição a campos eletromagnéticos e a saúde dos trabalhadores. **Rede**. v. 1, p. 78-84, 2019.

SANTOS, H.S.T.; GARDELLI, D. Análise da Lei de Biot-Savart em comparação com a força entre elementos de corrente de Ampére. **Caderno brasileiro de ensino de física**. v. 34, n. 3, p. 864-879, 2017. <https://doi.org/10.5007/2175-7941.2017v34n3p864>

SAVITZ, D. A. et al. Magnetic fields exposure and cardiovascular disease mortality among electric utility workers. **Am J Epidemiol**. v. 149, n. 2, p. 135-142, 1999. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aje.a009779>

SCHWEDERSKY, M.B. et al. Soldagem TIG de elevada produtividade: influência dos gases de proteção na velocidade limite para formação de defeitos. **Soldagem & Inspeção**. v.16, n. 4, p. 333-340, 2011. <https://doi.org/10.1590/S0104-92242011000400004>

SCOTTI, A.; MONTEIRO, L.S. Uma metodologia para parametrização do processo MIG/MAG CA. **Soldagem e Inspeção**, v. 17, n. 3, p. 271 – 277, 2012. <https://doi.org/10.1590/S0104-92242012000300011>

SEARS, F. W.; ZEMANSKY, M. W.; YOUNG, H. D. College Physics. 7 ed.1991.

SHIMIZU, H., et al. Feedability of wires during metal active gas welding. **Science and technology of welding and joining**, v.11, n. 1, p. 81-93, 2006.

<https://doi.org/10.1179/174329306X77876>

SILNY, et al. Electromagnetic environmental compatibility of resistance spot welding installations, **Welding and cutting**, v. 53, n. 5, 2001.

SILVA, A. D.; CETLIN, P. R.; Campos, H. B.; Aguilar, M. T. P.; PERTENCE, A. E. M.. Aspectos de Influência na Simulação Computacional da Conformação Mecânica baseada no Método dos Elementos Finitos. In: 36º SENAFOR, 2016, Porto Alegre. Anais da 20ª Conferência Internacional de Forjamento, 2016.

SILVA, F. **Soldadura robotizada com tecnologia CMT**. 2015. 71 f. Dissertação de mestrado, Instituto Politécnico de Setúbal.

SILVA, A. C. S., et al. Aplicação da metodologia para qualificação de procedimentos de soldagem de tubulações industriais conforme parâmetros do código ASME B31.3 e ASME section IX, **Soldagem & Inspeção**, v. 24, 2019. <https://doi.org/10.1590/0104-9224/si24.23>

SILVA, M.L.F.; SOUZA, J.S.; SIQUEIRA, A.M.A. Análise qualitativa dos riscos químicos inerentes à saúde no ambiente laboral que abrange o processo de soldagem com eletrodos revestidos. **XXXIV Encontro Nacional de Engenharia de Produção**, Curitiba, 2014.

SILVA, M. M. et al. Soldagem GTAW mecanizada com adição de arame frio. **Rev. Bras. Apl. Vac.** v. 38, n.1, p. 38-43, 2019. <https://doi.org/10.17563/rbav.v38i1.1123>

SILVA, R.M.C. **Estudo da exposição humana a campos elétricos e magnéticos na frequência industrial utilizando métodos numéricos**. 2009. 141 f. Trabalho final de curso, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

SILVEIRA, C. C. **Efeito de revestimentos galvanizados na estampagem de um aço bifásico destinado a indústria automotiva**. 2015. 108 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina. <https://doi.org/10.5151/1516-392X-25195>

SKOTTE, J.H.; HJOLLUND, H.I. Exposure of welders and other metal workers to ELF magnetic fields, **Bioelectromagnetics**, 18, 1997, pp. 470-477.

[https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1521-186X\(1997\)18:7<470::AID-BEM2>3.0.CO;2-#](https://doi.org/10.1002/(SICI)1521-186X(1997)18:7<470::AID-BEM2>3.0.CO;2-#)

SOEIRO JUNIOR, J. C. et al. Comparação da taxa e eficiência de deposição entre os consumíveis ER70S-6 e E71T-1C. **Soldagem & Inspeção**. v. 20, n. 1, p. 2-15, 2015.

<https://doi.org/10.1590/0104-9224/SI2001.02>

SOUZA, J. A. L.; BARRA, S. R. Exposição à radiação em processos a arco elétrico: consequências à saúde e formas de controle. **Corte & conformação de metais**. p. 108-123, 2012.

SOUZA. D. **Levantamento de mapas operacionais de transferência metálica para soldagem MIG/MAG de aço ao carbono na posição plana**. 2010. 169 f. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Uberlândia.

SOUZA JUNIOR, M. A. **Estudo hidrodinâmico da estaca torpedo através do software Ansys CFX®**. 2011. 76 f. Trabalho de Conclusão de Curso. Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Pernambuco.

SPINELLI, R. et al. **Higiene Ocupacional**, São Paulo: SENAC, 2010.

STUCHLY, M.A.; LECUYER, D.W. Exposure to electromagnetic fields in arc welding, **Health physics**, v. 56, n. 3, 1989. <https://doi.org/10.1097/00004032-198903000-00003>

SAITO, K. et al. Teratogenic effects of static magnetic fields on mouse fetures. **Reprod toxicol**. v. 22, p. 118-124, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.reprotox.2005.08.003>

TATAGIBA, L.C.S. et al. Tendências no Desenvolvimento de Gases de Proteção Utilizados na Soldagem MIG/MAG. **Soldagem & Inspeção**. v.17, n. 3, p. 218-228, 2012.

<https://doi.org/10.1590/S0104-92242012000300006>

UNIÃO EUROPEIA. Directive 2004/40/EC of the European Parliament and of the Council of 29 April 2004. Official Journal of the European Union, 24.5.2004, L184, pp. 1-9.

UNIÃO EUROPEIA. Directive 2013/35/EC of the European Parliament and of the Council of 26 June 2013. Official Journal of the European Union, 26.6.2013, L179, pp. 1-21.

VAZ, C. T.; BRACARENSE, A. Q. Influência do uso de PTFE como aglomerante em eletrodos revestidos básicos sobre a formação de ferrita acicular no metal de solda.

Soldagem e inspeção, v. 19, n. 2, p. 177-189, 2014. <https://doi.org/10.1590/0104-9224/SI1902.10>

WHO. Word Health Organization. Extremely low frequency fields. Environmental health criteria, 238, 2007.

WOLFF, M.A.; SILVA, R.F.; VILARINHO, L.O. Determinação dos campos de soldabilidade para o aço Dual-Phase 600 em equipamentos de soldagem a ponto AC e MFDC. **Soldagem e inspeção**, v. 15, p. 200-208, 2010. <https://doi.org/10.1590/S0104-92242010000300006>

ANEXO A

SISTEMA DE EQUAÇÕES DO *MAGNETOSTATIC*

O pacote computacional *magnetostatic*, presente no software ANSYS® e utilizado no desenvolvimento na abordagem numérica desse trabalho, envolve equações diferenciais parciais que relacionam os fenômenos magnéticos e elétricos unificando os princípios do eletromagnetismo (Eq. A.1 a Eq. A.4).

$$\text{rot } H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (\text{A.1})$$

$$\text{div } B = 0 \quad (\text{A.2})$$

$$\text{rot } E = - \frac{\partial B}{\partial t} \quad (\text{A.3})$$

$$\text{div } D = \rho \quad (\text{A.4})$$

Nas equações A.1 a A.4, H é o campo eletromagnético [A/m], J é a densidade de corrente de condução [A/m²], D é a densidade de fluxo elétrico ou indução elétrica [C/m²], E é o campo elétrico [V/m], B é a indução magnética ou densidade de fluxo magnético [T] e ρ é a densidade volumétrica de carga elétrica [C/m³]. Além dessas equações, a modelagem completa dos fenômenos eletromagnéticos exige as leis de comportamento de materiais que estabelecem a relação entre campos elétricos e magnéticos e o meio em que estão inseridos. Essas leis compreendem mais duas equações (Eq. A.5 e A.6). Nessas equações ε representa a permissividade elétrica do material [F/m] e σ uma constante referente a condutividade elétrica do meio [S/m] (Malagoni, 2012).

$$D = \epsilon E \quad (\text{A.5})$$

$$J = \sigma E \quad (\text{A.6})$$

As equações A.1 a A.6 representam, respectivamente, generalizações da Lei de Ampère, Lei de Gauss Magnética, Lei de Faraday e Lei de Gauss Elétrica. Tais leis são utilizadas como referência por institutos como ICNIRP ou IEEE em estudos destinados a formulação

ANEXO B

LEITURAS DE CAMPO ELETROMAGNÉTICO

Nesse tópico será apresentado um exemplo detalhado do registro das cinco leituras de campo eletromagnético realizados por via experimental e numérica. A Tab. A.1 mostra, como exemplo, o experimento E1C1A1E1, realizado para o processo SMAW. Nela estão contidos os valores das cinco leituras e os respectivos valores de média e incerteza de medição (IM) para cada região de medição. Considerando que os demais experimentos obedeceram rigorosamente ao mesmo padrão, a leitura do referido exemplo é suficiente para compor o entendimento desse trabalho.

Tabela A1 – Procedimento de avaliação das leituras de campo eletromagnético

Leitura	Campo eletromagnético (E) (mT)				Campo eletromagnético (S) (mT)			
	(1)	(2)	(3)	(4)	(1)	(2)	(3)	(4)
1	0,229	0,070	0,085	0,116	0,200	0,056	0,082	0,117
2	0,192	0,072	0,101	0,107	0,198	0,065	0,083	0,097
3	0,221	0,060	0,097	0,108	0,218	0,066	0,107	0,109
4	0,211	0,065	0,087	0,123	0,210	0,069	0,092	0,114
5	0,219	0,077	0,084	0,119	0,208	0,057	0,082	0,119
Média	0,214	0,068	0,090	0,114	0,207	0,062	0,089	0,111
IM	0,002	0,004	0,004	0,008	0,009	0,009	0,001	0,006

Legenda: (1) Mão. (2) Cabeça, (3) Tronco e (4) Cintura