

HÉLIO CARDOSO MARTIM

AVALIAÇÃO DE CAMPOS MAGNÉTICOS EMITIDOS
PELOS PROCESSOS ELETRODO REVESTIDO E TIG



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2016

HÉLIO CARDOSO MARTIM

**AVALIAÇÃO DE CAMPOS MAGNÉTICOS EMITIDOS PELOS
PROCESSOS ELETRODO REVESTIDO E TIG**

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

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Louriel Oliveira Vilarinho

UBERLÂNDIA - MG

2016

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

M378a
2016 Martim, Hélio Cardoso, 1990-
Avaliação de campos magnéticos emitidos pelos processos eletrodo
revestido e TIG / Hélio Cardoso Martim. - 2016.
83 f. : il.

Orientador: Louriel Oliveira Vilarinho.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.
Inclui bibliografia.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Soldagem elétrica - Teses. I.
Vilarinho, Louriel Oliveira, 1975- II. Universidade Federal de
Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III.
Título.

CDU: 621

À Deus.

À minha querida avó, sempre.

Aos meus pais Maria Dione e José Martim.

Aos meus irmãos.

À minha madrinha Vanda Brasileiro.

Aos demais familiares e amigos.

AGRADECIMENTOS

À 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 com meu crescimento pessoal e profissional.

À todos os professores que contribuíram com a realização deste trabalho: Américo Scotti, Valtair Antônio Ferraresi e Ruham Pablo Reis do Laprosolda e aos professores do Instituto de Física da Universidade Federal de Uberlândia.

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

À todos os técnicos, engenheiros e amigos do Laprosolda, tão fundamentais no processo de aprendizagem.

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

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.

RESUMO

Os processos de soldagem a arco são amplamente utilizados no setor industrial metalomecânico em uma vasta gama de aplicações. Nestes processos são empregados altos de níveis de corrente que chegam a centenas de amperes e que geram campos magnéticos, cujos efeitos nocivos à saúde humana ainda não são devidamente comprovados. Ainda assim, órgãos ligados a saúde ocupacional formularam diretrizes que limitam a exposição do trabalhador a tais campos. Em adição, estudos mostram que, em função dos níveis de corrente e do modo como a soldagem é realizada, estes limites de referência podem ser ultrapassados em alguns casos. Diante deste fato, o objetivo deste trabalho consiste na realização de soldagens a arco utilizando-se os processos Eletrodo Revestido e TIG, por serem realizados majoritariamente de forma manual, para a avaliação da influência de variáveis como corrente de soldagem, altura de arco, proteção gasosa, material e revestimento nos valores de campo magnético gerado e compará-los com os limites estabelecidos pelas diretivas mais recentes do ICNIRP. Os resultados mostraram que o campo magnético é maior quanto maior for a corrente de soldagem e menor quanto maior for a altura do arco. O revestimento do eletrodo influencia no valor do campo magnético por estar relacionado com a estabilidade do arco. A proteção gasosa se mostra influente por modificar o formato do arco. Por fim, o campo magnético é influenciado pela permeabilidade magnética do material soldado.

Palavras-Chave: Soldagem a Arco; Campo magnético; Limites de Exposição.

MARTIM, H. C. **Assessment of Magnetic Fields Emitted by Covered-Electrode and TIG Processes**. 2016. 83 f. Dissertation, Federal University of Uberlândia, Uberlândia/MG, Brazil.

ABSTRACT

Welding arc processes are widely used in metal industry in a wide range of applications. These processes employ high current levels that reach hundreds of amperes and generate magnetic fields, whose harmful effects on human health are not yet fully proven. Even though, bureaus connected to occupational health formulated guidelines that limit exposure of the worker to such fields. Moreover, studies show that, depending on current levels and how the welding is performed, these reference levels may be exceeded in some cases. Therefore, the objective of this work is to carry out weldments by using the covered-electrode and TIG processes, since they are mostly performed manually, to evaluate the influence of variables such as welding current, arc length, shielding gas, material and coating on magnetic-field values and compare them to the threshold limits established by the latest directives of the ICNIRP. The results showed that the magnetic field is higher as the higher the welding current and the lower the greater the height of the arc. The electrode coating influences the value of the magnetic field to be associated with arc stability. The shielding gas influences the magnetic field by modifying the arc format. Finally, the magnetic field is influenced by the magnetic permeability of the base material.

Keywords: Arc Welding; Magnetic Field; Exposure Thresholds.

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)	16
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)	25
Figura 2.2 - simulação da distribuição do campo magnético em um corte do soldador segurando o cabo e a tocha de soldagem (Corrente de 100 A) (Mair, 2005 - Modificado) ...	28
Figura 2.3 - Distribuição do campo magnético medido no local de trabalho (Corrente em curto-circuito de 100A e altura do plano horizontal de 125 cm) (Mair, 2005 - Modificado)....	28
Figura 2.4 - Configuração para medição de campo magnético para soldagem a arco: posição do soldador (direita) e configuração dos pontos de medição com suporte dos cabos (esquerda) (Melton, 2005 – Modificado).....	33
Figura 2.5 - Medição de campo magnético durante o dia de trabalho (Sachiko et al 2011 – Modificado)	34
Figura 3.1 - Configuração dos pontos de medição no soldador para os processos de soldagem a arco	37
Figura 3.2 - Visão geral do medidor de campo magnético TAMB-3D (Globalmag, 2015).....	38
Figura 3.3 - Ajuste de zero. (Globalmag, 2015).....	39
Figura 3.4 - Fonte utilizada para soldagem Eletrodo Revestido e TIG (Fonte multiprocesso Inversal da IMC)	40
Figura 3.5 - Placa para aquisição de dados modelo NI USB-6009 (NATIONAL INSTRUMENTS, 2015).....	40
Figura 3.6 - Tocha de soldagem TIG WP 18.....	44
Figura 3.1– Exemplos da aquisição de dados para o processo Eletrodo Revestido	50
Figura 4.2 – Influência da corrente na tensão no processo Eletrodo Revestido	52
Figura 4.3 - Influência da altura do arco na tensão no processo Eletrodo Revestido	52
Figura 4.4 - Influência do revestimento do eletrodo na tensão no processo Eletrodo Revestido.....	53
Figura 4.5 - Influência da corrente no valor de campo magnético para o processo Eletrodo Revestido.....	54
Figura 4.6 - Representação da densidade de corrente ou campo magnético em função da altura do arco de soldagem ($H_1 < H_2$)	56

Figura 4.7 - Influência do comprimento do arco no valor de campo magnético para o processo Eletrodo Revestido	57
Figura 4.8 - Influência do revestimento do eletrodo no valor de campo magnético para o processo eletrodo revestido.....	58
Figura 4.9 - Influência do ponto de medição no valor do campo magnético para o processo Eletrodo Revestido.....	59
Figura 4.10 - Exemplo do resultado da aquisição de dados para experimento de soldagem TIG	63
Figura 4.11 - Influência da corrente na tensão para a soldagem TIG.....	65
Figura 4.12 - Influência da distância eletrodo-peça na tensão para a soldagem TIG	65
Figura 4.13 - Influência do gás de proteção na tensão para a soldagem TIG.....	66
Figura 4.14 - Influência do material de base na tensão para a soldagem TIG.....	67
Figura 4.15 - Influência da corrente no valor de campo magnético no processo TIG	68
Figura 4.16 - Influência da distância eletrodo-peça no valor de campo magnético no processo TIG	69
Figura 4.17 - Influência do gás de proteção no valor de campo magnético no processo TIG	70
Figura 4.18 - Influência do material de base no valor de campo magnético no processo TIG	71
Figura 4.19 - Influência do ponto de medição no valor de campo magnético no processo TIG.	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1- Principais riscos físicos do processo de soldagem e suas consequências (Lucena Neto, 2007 - Modificado)	19
Tabela 2.2- Efeitos adversos dos campos eletromagnéticos (ICNIRP, 2002 – Modificado)..	22
Tabela 2.3- Limites de exposição ocupacional para campos magnéticos estáticos (ICNIRP, 1994 - Modificado)	23
Tabela 2.4 - Limites de exposição ocupacional para campos magnéticos estáticos (ICNIRP, 2009 - Modificado)	23
Tabela 2.5 - Limites de exposição ocupacional para campos magnéticos variantes no tempo (ICNIRP, 1998 - Modificado)	24
Tabela 2.6 - Limites de exposição ocupacional para campos magnéticos variantes no tempo (ICNIRP, 2010 - Modificado)	24
Tabela 2.7 - Fontes de campo magnético no local de trabalho (Sachiko et al 2011 – Modificado)	34
Tabela 3.1 - Variáveis analisadas nos processos de soldagem.	36
Tabela 3.2 - Composição química e propriedades mecânicas nominais do aço ABNT 1020 41	
Tabela 3.3 - Faixa de corrente recomendada para soldagem com Eletrodos Revestidos de diâmetro 3,2 mm. (Fortes, 2005 – Modificado)	42
Tabela 3.4 - Composição química e propriedades mecânicas nominais dos eletrodos revestidos	42
Tabela 3.5 - Planejamento experimental para a soldagem Eletrodo Revestido.....	43
Tabela 3.6 - Composição química e propriedades mecânicas nominais do aço inoxidável austenítico AISI 304.....	44
Tabela 3.7 - Composição química e propriedades mecânicas nominais do alumínio AA5052	45
Tabela 3.8 - Planejamento experimental para a soldagem TIG	46
Tabela 4.1 - Codificações dos parâmetros experimentais para soldagem Eletrodo Revestido	48
Tabela 4.2 - Média da variação da tensão para os processos Eletrodo Revestido.....	49
Tabela 4.3 - Medidas de campo magnético para a soldagem Eletrodo Revestido.....	51
Tabela 4.4 - Níveis de significância para análise da tensão do Processo Eletrodo Revestido	52
Tabela 4.5 - Níveis de significância para análise do campo magnético do processo Eletrodo Revestido.....	54

Tabela 4.6 - Codificações dos parâmetros experimentais para soldagem TIG	60
Tabela 4.7 - Medidas de campo magnético para a soldagem TIG	61
Tabela 4.8 - Níveis de significância para análise da tensão do processo TIG	64
Tabela 4.9 - Níveis de significância para análise do campo magnético do processo TIG	68

LISTA DE SÍMBOLOS

3D	Tridimensional
AC	Corrente Alternada
ACGIH	<i>American Conference of Governmental Industrial Hygienists</i>
ANOVA	Análise de variância
AWS	<i>American Welding Society</i>
CC	Corrente Constante
B	Densidade do fluxo magnético
DC	Corrente Contínua
EMF	<i>Eletromagnetic Fields</i>
f	Frequência
GMAW	<i>Gas Metal Arc Welding</i>
GTAW	<i>Gas-Shielded Tungsten Arc Welding</i>
H	Intensidade do campo magnético
I	Corrente de soldagem
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICNIRP	<i>International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection</i>
L	Comprimento do arco
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>
p	Nível de significância
r	Distância radial do centro do arco até a extremidade do campo magnético.
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>
T	Tesla

θ	Ângulo formado entre o arco e peça
TIG	<i>Tungsten Inert Gas</i>
μ	Permeabilidade magnética
WHO	<i>World Health Organization</i>

SUMÁRIO

CAPÍTULO I.....	15
INTRODUÇÃO.....	15
CAPÍTULO II.....	18
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
2.1. Introdução	18
2.2. Evidências científicas dos efeitos do campo magnético sobre o corpo humano	19
2.3. Limites de exposição a campos magnéticos.....	21
2.4. Fatores de influência na geração de campo magnético nos processos de soldagem.....	26
2.5. Processos de soldagem a arco.....	29
2.6. Campos magnéticos gerados nos processos de soldagem a arco	31
CAPÍTULO III.....	36
METODOLOGIA	36
3.1. Medição de campo magnético.....	37
3.2. Medição de campo magnético para a soldagem Eletrodo Revestido	39
3.2.1. Fonte de soldagem para o processo Eletrodo Revestido	39
3.2.2. Sistema de aquisição	40
3.2.3. Material de base	41
3.2.4. Eletrodos Consumíveis	41
3.2.5. Planejamento experimental	42
3.3. Medição de campo magnético para a soldagem TIG	44
3.3.1. Material de base	44
3.3.2. Eletrodos não consumíveis	45
3.3.3. Gás de proteção	45
3.3.4. Planejamento experimental	45
CAPÍTULO IV	47
RESULTADOS E DISCUSSÃO	47
4.1. Processo Eletrodo Revestido	47
4.2. Processo TIG	60
4.5. Considerações finais sobre os processos de soldagem	72
CAPÍTULO V	74
CONCLUSÃO	74
CAPÍTULO VI	76
TRABALHOS FUTUROS.....	76
CAPÍTULO VII	77
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	77

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

A soldagem é o mais importante processo industrial de fabricação de peças metálicas, podendo ser também utilizado na recuperação de peças desgastadas e para o corte (MONDENESI; MARQUES; SANTOS, 2012). Em virtude da vasta gama de aplicações os processos de soldagem são amplamente empregados na indústria manufatureira e, recentemente, são utilizados níveis de corrente cada vez mais elevados como forma de aumentar a produtividade e assegurar a competitividade no ambiente industrial (SHIMIZU et al 2006).

Nos processos de soldagem a arco, por exemplo, são empregados níveis de corrente que variam desde valores inferiores a 1 A na soldagem microplasma até valores superiores a 1000 ou 2000 A em processo como a soldagem a arco submerso (MONDENESI; MARQUES, 2011). No caso da soldagem por resistência Wolff; Silva; Vilarinho (2010) relatam que os níveis de corrente podem ultrapassar valores na ordem de 10.000 A.

Estes níveis mais elevados de corrente são mais aplicáveis para processos mecanizados/robotizados/automatizados, os quais estão aliados aos altos índices de produção. No entanto, o uso destes processos é limitado pelas tolerâncias entre as partes a serem unidas, fazendo-se necessário um grande controle dimensional e de posicionamento, o que requer maiores investimentos em equipamentos mão de obra e preparação.

Com relação à mão de obra, é preciso levar em conta o fato de que a soldagem é um processo industrial complexo e por isso requer uma detalhada avaliação antes da fabricação, onde as atividades são regidas por normas de qualidade (ISO 3834, 2005). Assim, sua realização deve ser feita com o uso de mão de obra qualificada. Silva et al (2014) reforça que o processo de soldagem deve ser executado por profissionais comprometidos com a segurança e higiene do trabalho, pois na maioria dos acidentes na soldagem decorrem do desconhecimento dos riscos envolvidos no processo.

Dessa forma, ao se utilizar processos manuais e semiautomáticos (ou seja, realizados por pessoal técnico qualificado), deve-se atentar aos níveis significantes de campos magnéticos gerados ao redor de cabos, eletrodos e da própria peça de trabalho. Embora não haja estudos biológicos específicos sobre a influência destes campos magnéticos gerados durante o processo de soldagem em seres humanos (MELTON, 2005), a Diretiva Europeia EC/40/2004 (COX, 2004) restringiu a exposição de trabalhadores a campos eletromagnéticos (EMFs), com legislação vigorando desde Abril de 2008.

No contexto da diretiva EC/40/2004 entidades como a *International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection* (ICNIRP) têm estudado os processos de soldagem com a finalidade de promover a segurança desta atividade. No entanto, os acidentes relacionados com o excesso de exposição podem surgir em decorrência de falhas nas medidas de segurança ou equipamento de proteção. Por esta razão, nesta área específica do setor industrial há a necessidade da disseminação de informações a respeito das diretrizes fundamentais relativas à proteção contra a radiação não-ionizante emitida durante os processos de soldagem (CERQUEIRA, 2013).

Diante do que foi exposto é de fundamental importância avaliar a presença de campos magnéticos durante a soldagem. Além disto, ao se considerar que o próprio Governo Federal estabeleceu que a soldagem e processos afins são importantes para a inovação do Brasil, conforme demonstrado pelas imagens na Cartilha Brasil Maior (Fig. 1.1), o alcance do presente estudo é realçado e expandido para a realidade brasileira, demonstrando, assim, sua excelência quanto aos aspectos científicos, tecnológicos e de inovação.



Figura 1.1 - Imagem de um maçarico do processo de oxicorte (processo afim) retirada da Cartilha Brasil Maior do Governo Federal (2011)

Neste contexto, a presente dissertação tem como objetivo geral avaliar os campos magnéticos emitidos pelos processos de soldagem Eletrodo Revestido e TIG (*Tungsten Inert Gas*), por serem realizados majoritariamente de forma manual e muito utilizados no Brasil e correlacioná-los com os limites estabelecidos pela Comissão Internacional de Proteção Contra Radiação Não-Ionizante (ICNIRP), no contexto da Diretiva Europeia EC/40/2004.

Para tanto os objetivos específicos deste trabalho incluem a medição dos campos magnéticos gerados, em condições experimentais determinadas, durante a soldagem a arco elétrico para os processos Eletrodo Revestido (SMAW – *Shielded Metal Arc Welding* ou MMA – *Manual Metal Arc*) e TIG (ou GTAW – *Gas Tungsten Arc Welding*) e comparar os limites estabelecidos pela ICNIRP, levando-se em conta diferentes frequências (harmônicos) que possam existir e variando-se os parâmetros dos processos tais como níveis de corrente, materiais e consumíveis.

Em função destes objetivos, considera-se que a principal meta deste estudo é ao final obter os valores pontuais para os campos magnéticos emitidos por diferentes processos de soldagem em condições industriais, mensurados experimentalmente.

Os resultados das medições, portanto, permitirão estudar os fenômenos físicos envolvidos no valor do campo magnético obtido nos diferentes pontos de medição, especialmente aquelas próximas a tocha/porta eletrodo, avaliando o grau de exposição do trabalhador a partir resultados até então estabelecidos na literatura técnica. Desse modo é possível contribuir para o bem estar de soldadores/operadores do ponto de vista de saúde ocupacional e segurança do trabalho ao definir se o nível de exposição destes trabalhadores aos campos magnéticos emitidos nos processos de soldagem a arco Eletrodo Revestido e TIG excede ou não os limites mínimos estabelecidos pelas diretrizes vigentes.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Introdução

Os processos de soldagem são atualmente considerados um dos principais meios de fabricação em diversos segmentos da indústria desde aqueles de baixa tecnologia até aqueles com elevado grau tecnológico e de complexidade (BIANCHI, 2014). Estima-se que 1,8% da população economicamente ativa esteja diretamente relacionada à fabricação soldada. Estes trabalhadores estão expostos diariamente aos campos magnéticos gerados pelos processos de soldagem, em especial, processos a arco e por resistência (MELTON, 2005).

O campo magnético é uma modalidade de radiação não ionizante desprovida de energia suficiente para ionizar os átomos da matéria, geralmente na faixa de frequência entre 100 kHz e 300 GHz (QUEIROZ, 2011). Este campo está inserido, segundo a NR-15, no grupo dos riscos físicos inerentes ao processo de soldagem, cujos efeitos sobre o trabalhador foram estudados por Lucena Neto (2007). O autor relata que a exposição ao campo magnético pode acarretar diferentes prejuízos à saúde humana, como pode ser visto na Tab. 2.1 que reúne os principais riscos físicos oriundos dos processos de soldagem e suas consequências. Quanto aos prejuízos relacionados aos campos magnéticos, cabe ressaltar que ainda não há evidências científicas suficientes que comprovem tais efeitos.

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.
Calor	Taquicardia, aumento da pulsação, cansaço, irritação, internação (afecção orgânica produzida pelo calor), choque térmico, fadiga térmica, perturbações das funções digestivas e hipertensão.
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 magnético sobre o corpo humano

O estudo dos efeitos do campo magnético à saúde humana deve ser complexo e detalhado e a avaliação da exposição ocupacional deve sempre considerar a pior situação. Embora os efeitos do campo magnético à saúde ainda não sejam devidamente comprovados, estudos indicam que a exposição aos campos de frequência extremamente baixa pode causar diferentes efeitos nocivos à saúde. A excitação nervosa, por exemplo, é ocasionada pela presença de correntes elétricas significativas no corpo, induzidas pela presença de campos magnéticos (MILD et al 2009).

Pesquisas realizadas em laboratório, até então, fornecem apenas algumas evidências sobre a forma de interação dos campos magnéticos com os processos biológicos básicos

dos seres humanos. Alguns desses efeitos são: alterações nas funções das células e tecidos, diminuição do hormônio melatonina, alterações do sistema imunológico, crescimento acelerado de tumor, alterações no biorritmo e mudanças na atividade cerebral humana e frequência cardíaca (ALI, 2012).

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.

Em concordância ao que foi exposto até então, Bednarek (2010) relata que os efeitos relacionados com a absorção da energia do campo magnético, ocorrem sob a forma da corrente de indução de fluxo através dos tecidos, resultando no aumento de temperatura, queimaduras e até mesmo paralisia. 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.

Dasdag et al (2002) investigaram os efeitos dos campos magnéticos 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 magnéticos 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 magnético não altera os parâmetros hematológicos e imunológicos dos soldadores.

Embora muitos grupos de pesquisas encontrem evidências de possíveis efeitos adversos à saúde causados pela exposição aos campos magnéticos, os únicos efeitos devidamente comprovados em voluntários expostos a campos magnéticos de baixa frequência são a estimulação dos tecidos do sistema nervoso central e periférico e a indução na retina de fosfenos, uma percepção visual de luz cintilante na periferia do campo visual (ICNIRP, 2002).

Ainda assim, por ser o campo magnético considerado um dos principais agentes físicos presentes no ambiente de trabalho onde existe o processo de soldagem (FUHR, 2012), alguns pesquisadores e órgãos ligados a saúde e segurança do trabalhador dedicam-se ao estudo dos possíveis efeitos deste campo sobre o organismo humano no sentido de

avaliar e restringir a exposição dos soldadores a estes campos nos processos de soldagem para que desta forma seja possível tornar o processo ainda mais seguro.

2.3. Limites de exposição a campos magnéticos

Em função dos possíveis efeitos dos campos magnéticos à saúde e com a finalidade de tornar o processo de soldagem mais seguro, entidades internacionais formularam diretrizes baseadas em normas europeias que promovem a segurança desta atividade. Como exemplo dessas entidades, podem ser citados o *National Institute for Occupational Safety and Health* (NIOSH), *Occupational Safety and Health Administration* (OSHA), *American Welding Society* (AWS), *International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection* (ICNIRP), *World Health Organization* (WHO) e a *American Conference of Governmental Industrial Hygienists* (ACGIH). Dentre essas instituições, destaca-se 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 magnético 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 a 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, diretivas a respeito dos limites de exposição contra campos magnéticos estáticos e, em 1998, diretivas para campos eletromagnéticos variantes até 300 GHz. Nestas diretivas é ressaltado que os limites de exposição condizem com os níveis em que há evidências consideráveis de efeitos adversos a saúde, além

destes níveis não há evidências dos efeitos 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 magnético estático	Efeitos sobre o sistema nervoso central e cardiovascular
Campo magnético 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 microondas

Segundo tais diretivas, para efeitos de proteção, o campo magnético pode ser expresso como densidade do fluxo magnético, B , expresso em Tesla (T), ou como intensidade do campo magnético, H , expresso em ampere por metro ($A.m^{-1}$). 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 $4\pi \times 10^{-7} H.m^{-1}$ (ICNIRP, 1994). Neste trabalho o campo magnético será expresso como densidade de fluxo magnético (T), assim como as diretrizes do ICNIRP para maior praticidade nas comparações posteriores.

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

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 diretivas 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 magnéticos.

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

Características da exposição	Densidade de fluxo magnético (mT)
Dia inteiro de trabalho (Média ponderada no tempo)	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 magnéticos 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 magnéticos estáticos (ICNIRP, 2009 - Modificado)

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

Ambas as diretivas fazem uma alerta quanto ao caso de pessoas que utilizam marca-passos cardíacos e outros dispositivos ativados eletricamente ou com implantes ferromagnéticos. Estas pessoas não estão adequadamente protegidas pelos limites dessa diretiva, pois a maioria dos marca-passos cardíacos podem ser afetados pela exposição a campos acima de 0,5 mT. Aquelas que possuem implantes ferromagnéticos ou dispositivos acionados eletricamente podem ser afetadas por campos acima de alguns militeslas (ICNIRP, 1994; ICNIRP, 2009).

Para os campos magnéticos 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 magnéticos variantes no tempo em uma gama de frequências de até 300 GHz. Os valores médios dos campos magnéticos a que o trabalhador pode estar exposto são determinados, na maioria dos casos, em função da frequência (f) em Hz (Tab. 2.5). Diferente das diretivas referentes a campos magnéticos

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 magnéticos 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 magnéticos 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 magnéticos 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 magnéticos variantes no tempo fornecidos por ambas as diretivas 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.

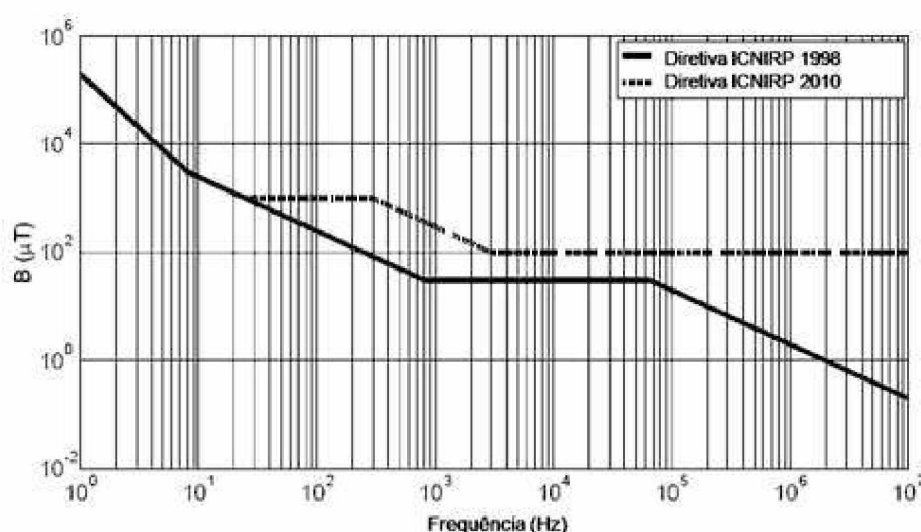


Figura 2.1 - Densidade do fluxo magnético: Níveis de referência para exposição ocupacional pelas diretrizes ICNIRP 1998 (linha cheia) e 2010 (linha tracejada). (Grassi et al 2012 – Modificado).

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

Crotti e Giordano (2009) ressaltam a importância da avaliação da conformidade da exposição humana aos campos magnéticos com os níveis de referência dados pela ICNIRP. Segundo os autores, esta comparação entre os valores de campo magnético 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 diretivas 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, conseqüentemente, geram maiores campos magnéticos (MELTON, 2005). Entre os processos de soldagem, aqueles que utilizam o arco elétrico como fonte de energia chamam a atenção pelo seu amplo uso industrial.

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

Os campos magnéticos gerados durante os processos de soldagem a arco e por resistência são governados por diferentes fatores, dentre os quais devem ser destacados, a intensidade e o tipo de corrente (AC ou DC) utilizado, 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 magnéticos (BOLTE e PRUPPERS, 2006).

Quanto ao tipo, correntes DC geram campos estáticos, enquanto que correntes AC e pulsadas geram campos magnéticos variantes no tempo. Mair (2005) inclui 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 Eletrodo Revestido, ou até mesmo formas de onda complexas utilizadas para processos pulsados, podem ser fatores que alterem o campo magnético. Neste contexto, o autor também afirma que normalmente os campos magnéticos 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.

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 magnético, 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 é considerado um condutor fluídico 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 magnético pode ser expressa como a densidade de fluxo magnético (B), que de acordo com a lei de Biot-Savart, matematicamente expressa pela Equação 2.2, é diretamente proporcional a corrente de soldagem.

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

No caso da soldagem, I representa a corrente, L o comprimento do arco, θ o ângulo formado entre o arco e peça, r a distância radial do centro do arco até a extremidade do campo magnético e μ a permeabilidade magnética.

A Equação 2.2 além de explicar a influência da corrente no campo magnético, permite presumir que a densidade de campo magnético pode ser maior quanto menor for o comprimento do arco. Em contrapartida, Neris (2015) explica que a intensidade do campo magnético varia de modo inversamente proporcional com o quadrado da distância do centro do arco a extremidade do campo magnético e é por esta razão que o campo magnético é maior na região do arco mais próxima ao eletrodo e menor na região mais próxima a peça, devido ao formato cônico do arco.

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 magnético em um ambiente de trabalho (Fig. 2.3). O campo magnético é mais intenso quanto mais próximo o soldador estiver do cabo ou da máquina de soldagem. É possível verificar que a distribuição do campo magnético é semelhante ao formato do arco elétrico. 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 magnético mais intenso.

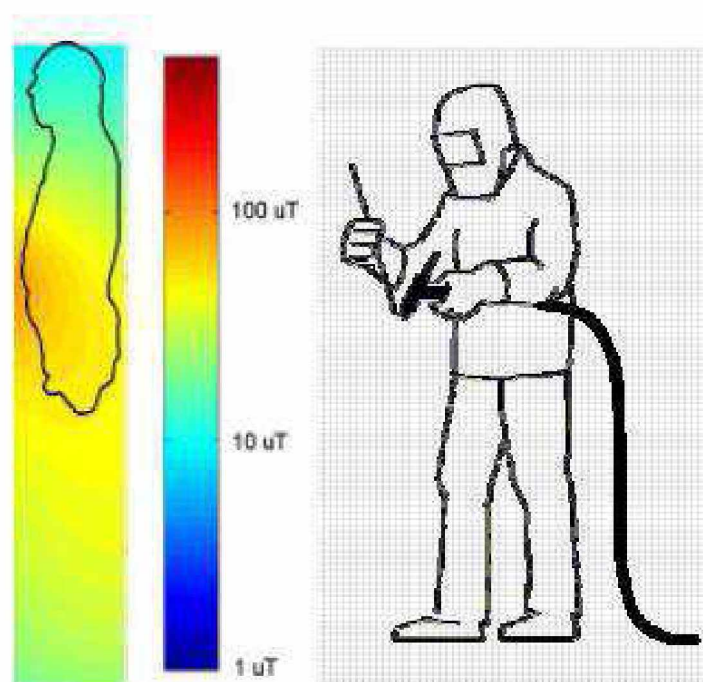


Figura 2.2 - simulação da distribuição do campo magnético em um corte do soldador segurando o cabo e a tocha de soldagem (Corrente de 100 A) (Mair, 2005 - Modificado)

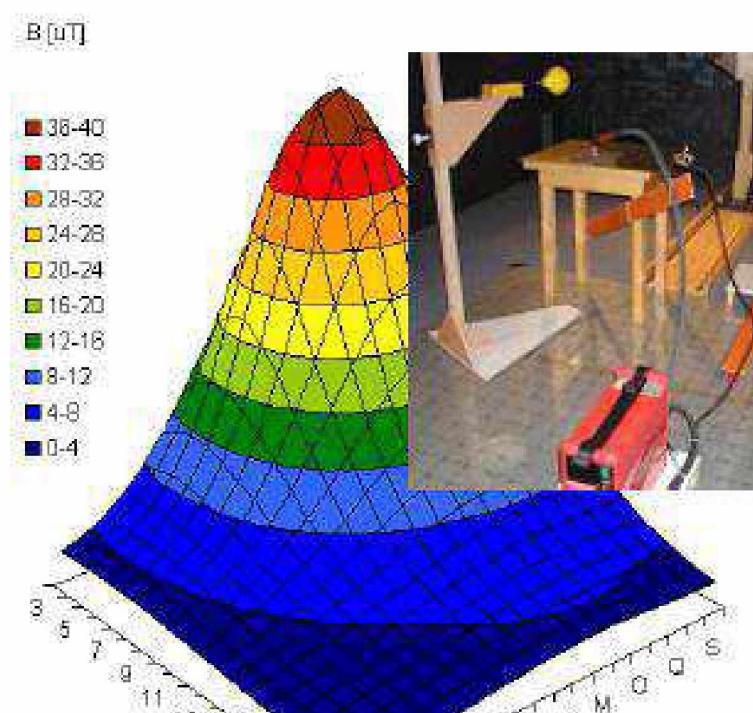


Figura 2.3 - Distribuição do campo magnético medido no local de trabalho (Corrente em curto-circuito de 100A e altura do plano horizontal de 125 cm) (Mair, 2005 - Modificado).

Assim como Mair (2005), Dasdag et al (2002) também observaram que o valor do campo magnético 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 magnético.

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 Eletrodo Revestido) ou a tocha (para o processo TIG), 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 magnético, embora ainda não seja confirmado nenhum prejuízo potencial a saúde humana. O cumprimento destas medidas não altera o valor do campo magnético 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 magnético 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 magnéticos e a adoção de uma distância de segurança durante a execução do trabalho.

É possível, portanto, verificar que para melhor avaliar a exposição de soldadores aos campos magnéticos gerados nos diferentes processos de soldagem a arco, é preciso conhecê-los separadamente, de modo a obter as principais características, capazes de influenciar nesta exposição.

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 Eletrodo Revestido, TIG, MIG/MAG, soldagem (e corte) a plasma e a soldagem a arco submerso, sendo estes últimos normalmente mecanizados (MELTON, 2005).

De modo geral, os processos de soldagem por Eletrodo Revestido, TIG e MIG/MAG são, dentre os processos de soldagem a arco, os mais utilizados e realizados por soldadores (SHIMIZU et al 2006), sendo dada ênfase no trabalho aos dois primeiros.

O processo Eletrodo Revestido 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 no Brasil (VAZ; BRACARENSE, 2014). 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 TIG pode-se afirmar que, atualmente, é largamente utilizado para soldar diversos materiais na indústria com boa qualidade. A corrente, que normalmente varia entre 5 A e 500 A (MELTON, 2005), é escolhida em função do tipo de material e espessura a soldar, podendo ser utilizada corrente contínua ou corrente alternada (SILVA, 2015).

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 (MONDENESI, 2009).

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 Arco Submerso) em polaridade 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 do TIG pulsado a 400 Hz para o MIG/MAG). 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 Eletrodo Revestido) ou a tocha

(para o processo e TIG) 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 magnéticos nestes processos se torna indispensável, uma vez que é possível encontrar evidências de que o campo magnético gerado ultrapasse as restrições básicas propostas pelo ICNIRP (GRASSI et al 2012).

2.6. Campos magnéticos gerados nos processos de soldagem a arco

De acordo com Melton (2005), não há na literatura um grande número de publicações contendo informações sobre medição de campos magnéticos nos processos de soldagem a arco. Um dos primeiros trabalhos encontrados acerca deste tema foi feito por Bowman et al (1988), onde foram mensurados os campos magnéticos gerados em frequências extremamente baixas (abaixo de 100 Hz) para o processo TIG. Na soldagem TIG AC foi registrado um campo magnético na faixa de 0,0024 a 0,009 mT e 0,0004 a 0,0016 mT para TIG DC. No referido trabalho não foi apresentada nenhuma correlação dos valores de campo magnético 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), quando esses autores afirmam que os maiores valores de campo magnético estão associados aos processos realizados em corrente alternada.

Anos mais tarde, Allen (1994) também realizou medidas de campo magnético oriundo do processo TIG e encontrou valores de campo magnético 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 e técnicas operatórias do processo.

Stuchly e Lecuyer (1989) obtiveram resultados de medidas de campos magnéticos 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 magnéticos 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 magnético 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. Estes valores não foram comparados com os limites estabelecidos pela ICNIRP. Outras medições feitas a 10

cm do cabo de soldagem registraram um campo magnético superior a 1,256 mT, que é cerca de três vezes o nível de referência ICNIRP para uma frequência de 60Hz.

Nestes trabalhos não fica clara a correlação do campo magnético 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 magnético influi 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 magnético mais forte em 120 Hz ou 180 Hz.

Skotte e Hjollund (1997) avaliaram a exposição de soldadores a campos magnéticos oriundos de diferentes processos de soldagem durante todo o dia de trabalho, encontrado valores de 0,1 mT para o processo Eletrodo Revestido utilizando corrente alternada e 0,01 mT na soldagem MIG/MAG com utilização de corrente contínua. Próximo ao corpo dos soldadores de Eletrodo Revestido e MIG/MAG foram encontrados, respectivamente, os valores médios de campo magnético na ordem de 0,0212 mT e 0,0023 mT. Já os valores encontrados próximo ao cabo terra na soldagem MIG/MAG 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 mediu os campos magnéticos gerados nos processos Eletrodo Revestido e MIG/MAG 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 Eletrodo Revestido, as medições feitas no corpo do soldador, utilizando uma fonte AC convencional e corrente de 200 A, mostraram que o campo magnético 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 magnético encontrado foi 0,298 mT na cintura do soldador. No entanto, ao avaliar o campo magnético 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.

Ao avaliar o campo magnético gerado na soldagem MIG/MAG, com transferência por curto-circuito em modo convencional em 150 A e com transferência controlada pulsada em 200 A, os valores de campo magnético foram respectivamente de 0,056 mT e de 0,17 mT (MELTON, 2005).

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 magnéticos 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.

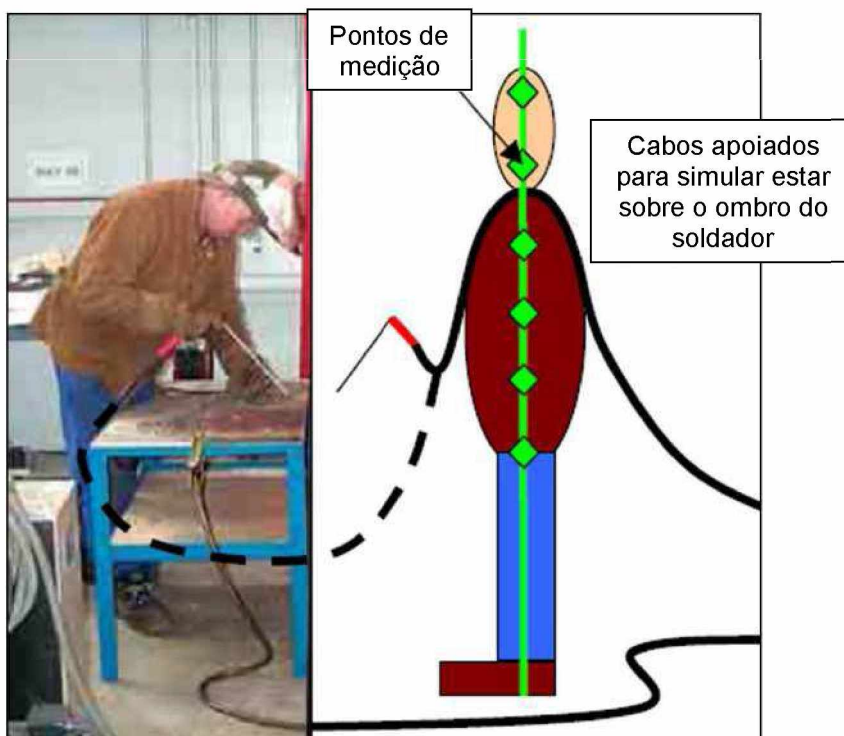


Figura 2.4 - Configuração para medição de campo magnético para soldagem a arco: posição do soldador (direita) e configuração dos pontos de medição com suporte dos cabos (esquerda) (Melton, 2005 – Modificado).

Diante desse fato, Sachiko et al (2011) concentrou seu estudo em medições feitas durante processos de soldagem a arco na mão do soldador. As medidas foram obtidas por 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 e o valor médio por dia de trabalho foi de 0,04 a 0,12 mT.

Sachiko et al (2011) comentam 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 magnético como brocas, esmeril e martelos de pressão, por exemplo. No entanto, esses campos magnéticos são muito mais baixos, quando comparados com aqueles existentes nos processos de soldagem (Tab. 2.7).

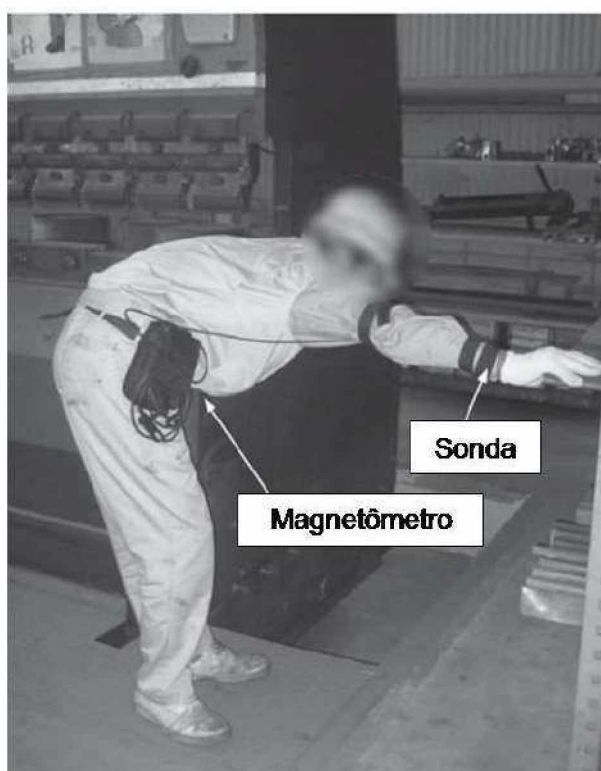


Figura 2.5 - Medição de campo magnético durante o dia de trabalho (Sachiko et al 2011 – Modificado)

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

Campo de exposição máximo (mT)	
Soldagem	8,69
Esmeril	1,01
Broca	1,70
Martelo de Pressão	1,68

Ali (2012) avaliou os campos magnéticos 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 magnético 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 magnético é mais forte para os maiores níveis de corrente. O maior valor de campo magnético registrado no trabalho de Ali (2012) foi 0,41 mT, em um

nível 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.

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. Os campos magnéticos gerados são de até 0,4 mT. 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 magnéticos oriundos das soldagens Eletrodo Revestido e TIG em condições experimentais previamente especificadas para que os resultados obtidos possam ser comparados com os limites ICNIRP de forma mais consistente.

CAPÍTULO III

METODOLOGIA

Em função do objetivo principal deste trabalho que consiste em avaliar os campos magnéticos oriundos dos processos de soldagem a arco (Eletrodo Revestido e TIG), foi feito o planejamento de experimentos para medição do campo magnético gerado nestes processos. Para tanto, a metodologia utilizada consistiu primeiramente na realização de soldagens a arco com o uso de componentes essenciais a cada um deles. Algumas variáveis operacionais foram modificadas de acordo com o processo analisado, conforme mostra a Tab. 3.1.

Tabela 3.1 - Variáveis analisadas nos processos de soldagem.

Processo de soldagem	Variáveis analisadas
Eletrodo Revestido	Faixa de corrente, altura do arco e eletrodos consumíveis.
TIG	Faixa e versão da corrente, distância eletrodo-peça, gás de proteção e material de base.

Durante a realização dos experimentos, a cada mudança de variável, foi medido o campo magnético 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. O soldador que realizou o teste possui 1,73 m, que corresponde à altura média 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). A Fig. 3.1 mostra a configuração dos pontos de medição identificados pelo losango de cor vermelha.

Os valores medidos serviram de base para que posteriormente fosse possível avaliar a influência das variáveis analisadas na geração dos campos magnéticos e a exposição do

soldador, em função dos pontos de medição mencionados, através da comparação entre os valores medidos e os limites estabelecidos pelas diretivas mais atualizadas do ICNIRP.

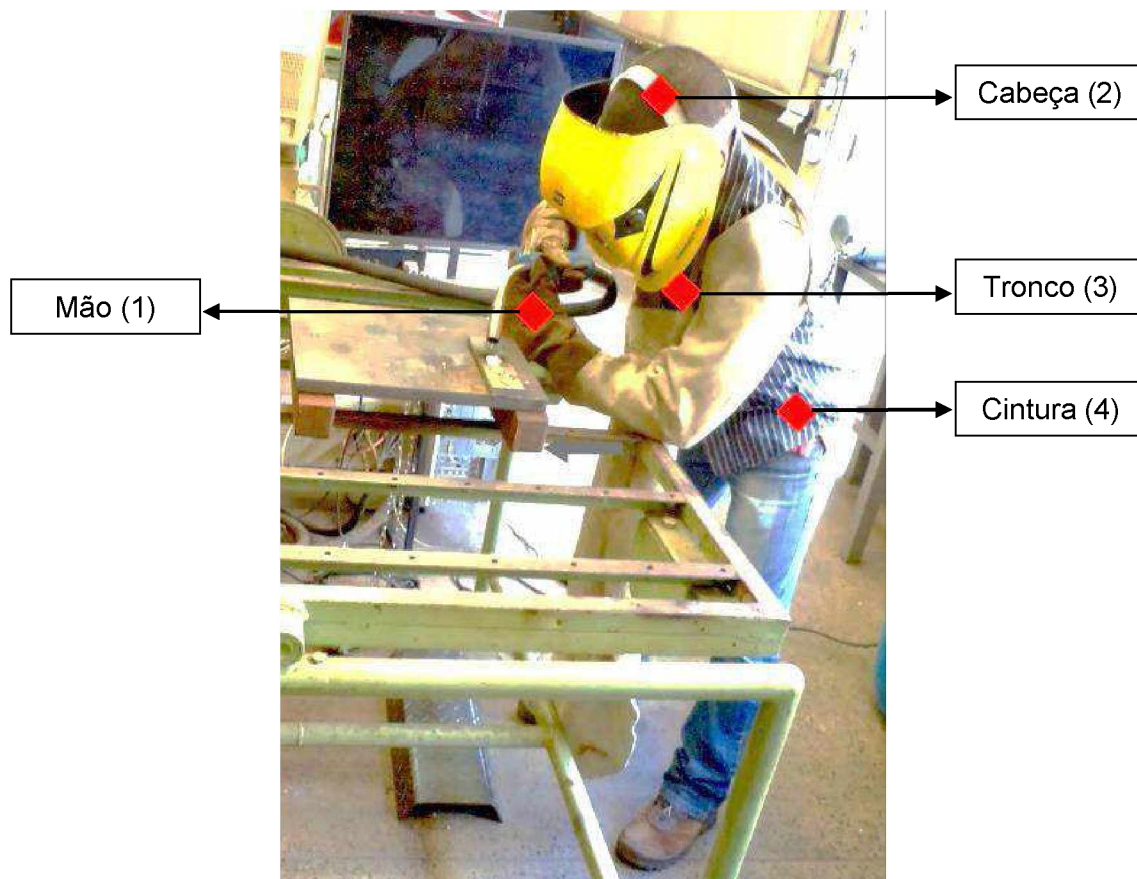


Figura 3.1 - Configuração dos pontos de medição no soldador para os processos de soldagem a arco

3.1. Medição de campo magnético

Em todos os processos estudados, as medições de campo magnético para todos os processos estudados neste trabalho foram realizadas em rms (*root mean square*) com o medidor de campo magnético ambiental mostrado na Fig. 3.2, 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. Neste trabalho a precisão utilizada foi de $\pm 2\%$ da leitura.



Figura 3.2 - Visão geral do medidor de campo magnético TAMB-3D (Globalmag, 2015)

Segundo Globalmag (2015), o medidor de campo magnético ambiental modelo TAMB-3D é um instrumento robusto, cuja principal aplicação é avaliar a valor de campos magnéticos de baixa frequência em ambientes industriais e comerciais. Este instrumento possui uma sonda magnética de 3 eixos capaz de medir a valor do campo magnético em qualquer posição. Este medidor também foi projetado para medir simultaneamente a valor do campo magnético contínuo (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.

O instrumento pode operar tanto com pilha descartável de 9 V, quanto por meio de um adaptador de rede elétrica. A medida de campo magnético 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 magnético terrestre sobre a sonda, como exemplificado na Fig. 3.3.



Figura 3.3 - Ajuste de zero. (Globalmag, 2015)

3.2. Medição de campo magnético para a soldagem Eletrodo Revestido

A execução dos testes de soldagem Eletrodo Revestido 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 inversal da IMC, cuja faixa de corrente varia entre 0 e 300 A (Fig. 3.4). Esta 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 3.4 - Fonte utilizada para soldagem Eletrodo Revestido e TIG (Fonte multiprocesso Inversal da IMC)

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 (Fig. 3.5) 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.



Figura 3.5 - Placa para aquisição de dados modelo NI USB-6009 (NATIONAL INSTRUMENTS, 2015)

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 e eletrodos consumíveis, cujas informações básicas 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 x 50,2 x 12,6 mm, cuja composição e propriedades físicas estão descritas na Tab. 3.2.

Tabela 3.2 - Composição química e propriedades mecânicas nominais do aço ABNT 1020

Aço Carbono 1020				
Composição química %				
C – 0,23	Mn – 0,45	Si – 0,21	P – 0,04	S – 0,05
Propriedades físicas				
Densidade (g/cm ³)	Calor específico (J/g°C)	Condutividade térmica (W/cm°C)	Temperatura de fusão (°C)	Permeabilidade magnética relativa
7,8	0,63	0,47	1520	100

3.2.4. Eletrodos Consumíveis

Os testes foram feitos com os eletrodos celulósico E6010, rutilico E6013 e básico E7018 com diâmetro de 3,2 mm. A faixa de corrente recomendada para operação com esses eletrodos para um diâmetro de 3,2 mm é descrita, segundo Fortes (2005), na Tab. 3.3. As respectivas composições químicas e propriedades mecânicas são mostradas na Tab. 3.4. Cabe ressaltar que embora seja recomendada uma corrente máxima de 140 A para a soldagem com Eletrodo Revestido E6010 com o diâmetro especificado, neste trabalho todos os processos de soldagem foram realizados em duas faixas de corrente, sendo a mais baixa de 100 e a mais alta de 150 A, como forma de uniformizar os parâmetros utilizados na soldagem com Eletrodo Revestido e no processo TIG.

Tabela 3.3 - Faixa de corrente recomendada para soldagem com Eletrodos Revestidos de diâmetro 3,2 mm. (Fortes, 2005 – Modificado)

Eletrodo Revestido (Diâmetro 3,2 mm)	Faixa de corrente (A)
E 6010	80 - 140
E 6013	80 - 150
E 7018	100 - 150

Tabela 3.4 - Composição química e propriedades mecânicas nominais dos eletrodos revestidos

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 e alto), sendo o nível baixo e alto ajustados em 100 e 150 A, respectivamente, 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, medidas com o auxílio de um

gabarito. É importante destacar que por ser um processo manual essas altura de arco são medidas aproximadas, em razão da dificuldade em se manter essas distâncias durante o processo. 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 magnético em quatro pontos de medição mão (1), cabeça (2), tronco (3) e cintura (4) do soldador em um total de 48 medições, conforme mostra a Tab. 3.5.

Tabela 3.5 - 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 magnético para a soldagem TIG

Na soldagem TIG alguns dos parâmetros experimentais utilizados foram extraídos do trabalho de Reis et al (2011). Quanto aos equipamentos, nestes ensaios 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 (Fig. 3.6). Os testes ocorreram sem adição de material. Logo, os insumos utilizados neste processo incluem o material de base, o gás de proteção e o eletrodo não consumível.



Figura 3.6 - Tocha de soldagem TIG WP 18.

3.3.1. Material de base

Os ensaios com soldagem TIG 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 x 38 x 6,3 mm e alumínio AA5052 de dimensões 200 x 50,8 x 6,1 mm. As composições e propriedades destes dois últimos são apresentadas nas Tab. 3.7 e Tab. 3.8, respectivamente.

Tabela 3.6 - Composição química e propriedades mecânicas nominais do aço inoxidável austenítico AISI 304

Aço Inoxidável Austenítico AISI 304				
Composição química %				
C – 0,03	Mn – 1,13	Si – 0,04	Cr – 18,06	Ni – 8,03
Propriedades físicas				
Densidade (g/cm ³)	Calor específico (J/g°C)	Condutividade térmica (W/cm°C)	Temperatura de fusão (°C)	Permeabilidade magnética relativa
8,0	0,29	0,033	1398	1,02

Tabela 3.7 - Composição química e propriedades mecânicas nominais do alumínio AA5052

Alumínio AA5052					
Composição química %					
Al – 96,5	Mn – 0,21	Si – 0,25	Mg – 2,22	Cr – 0,32	Fe – 0,50
Propriedades físicas					
Densidade (g/cm ³)	Calor específico (J/g°C)	Condutividade térmica (W/cm°C)	Temperatura de fusão (°C)	Permeabilidade magnética relativa	
2,7	0,92	2,05	659	1,00002	

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.

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 TIG forma feitos com a utilização dos três materiais de base diferentes (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 (2 e 4 mm), que está diretamente relacionada com a altura do arco, e com a utilização de dois diferentes gases de proteção (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 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 foram os mesmos avaliados no processo anterior. Este planejamento fatorial completo resultou em um total de 24 grupos de experimentos e 96 medições, assim como mostrado na Tab. 3.10.

Tabela 3.8 - Planejamento experimental para a soldagem TIG.

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)

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos para todos os processos de soldagem estudados consistem nos valores gráficos da tensão e da corrente adquiridos pelo sistema de aquisição, bem como na representação gráfica destes sinais elétricos. Além destes dados, foi obtido também o valor de campo magnético em cada experimento descrito. O conjunto de resultados adquiridos serviu de base para determinar a 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 magnético obtidos em todos os ensaios foram posteriormente comparados com os limites de referência trazidos nas diretrizes mais atuais da ICNIRP afim de avaliar a exposição de soldadores aos campos magnéticos.

4.1. Processo Eletrodo Revestido

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 ao 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 altura de arco utilizando-se eletrodo celulósico seria codificado de E1C1A1E1, conforme os códigos apresentados na Tab. 4.1.

Tabela 4.1 - Codificações dos parâmetros experimentais para soldagem Eletrodo Revestido

Corrente – Código (C)		
Nível baixo (100 A) – Código (1)		Nível alto (150 A) – Código (2)
Altura 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, 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. A Fig. 4.1 mostra um exemplo da aquisição dos sinais elétricos feita nesse processo para os três tipos de consumíveis. Uma vez que o processo Eletrodo Revestido faz uso da característica estática da fonte do tipo corrente constante, os sinais elétricos apresentados na Fig. 4.1 apresentam uma grande uniformidade para a corrente de soldagem, ao passo que a tensão flutua conforme a altura do arco, diretamente relacionada com a habilidade do soldador.

Ao observar os sinais elétricos da Fig. 4.1 percebe-se que, na soldagem com eletrodo celulósico E6010, a tensão se apresenta bastante irregular, em função das dificuldades de soldar com este tipo de eletrodo. Os sinais elétricos oriundos da soldagem com eletrodo rutílico E6013 apresentam certa regularidade, uma vez que se observa a presença constante de picos vales com formatos similares e em intervalos de tempo muito curtos, quando comparados com a soldagem com eletrodo básico E7018, cujos picos e vales aparecem em intervalos de tempo maiores e com variações mais acentuadas tanto para a tensão como para corrente, evidenciando o tipo de transferência por curto-circuito que ocorre na soldagem com este tipo de eletrodo.

Outro fato a ser considerado é que ao calcular a diferença entre os valores e tensão em um ponto do intervalo e tempo considerado e outro ponto consecutivo, é possível obter a variação de tensão entre estes pontos. A partir destes resultados é possível obter uma média da variação da tensão durante a soldagem com os eletrodos celulósico, rutílico e básico, mencionados anteriormente. Os valores médios encontrados para variação de tensão nestes processos estão dispostos na Tab. 4.2, a qual revela que a maior variação e tensão foi alcançada na soldagem com eletrodo celulósico, depois no processo com eletrodo básico e por fim na soldagem com eletrodo rutílico, na qual encontra-se o menor valor para variação de tensão.

Tabela 4.2 - Média da variação da tensão para os processos Eletrodo Revestido

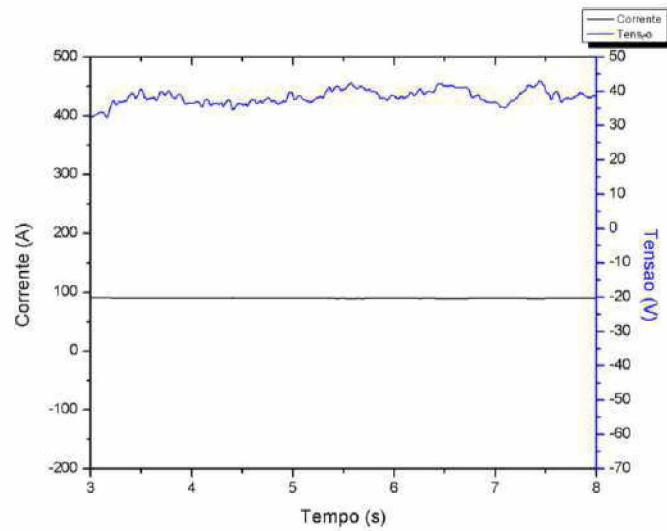
Processo Eletrodo Revestido	Média da Variação de Tensão (V)
Eletrodo celulósico E6010	0,74
Eletrodo rutilico E6013	0,34
Eletrodo básico E7018	0,47

Assim, com base no comportamento da tensão, é correto afirmar que na soldagem com eletrodo rutilico E6013 o arco elétrico foi mais estável, seguido da soldagem com eletrodo básico E7018 e por fim na soldagem com eletrodo celulósico E6010, onde foi verificada maior instabilidade no arco. De acordo com Leonello Filho (2005) esse resultado é decorrente da composição química do revestimento desse eletrodo. A elevada quantidade rutila (TiO_2) contida nesse eletrodo é responsável pela maior estabilidade do arco. Além disso, cabe ressaltar que há uma maior facilidade em soldar com eletrodo rutilico do que com os eletrodos celulósico e básico e, por isso, o soldador desenvolveu um melhor controle do arco durante a soldagem com esse eletrodo.

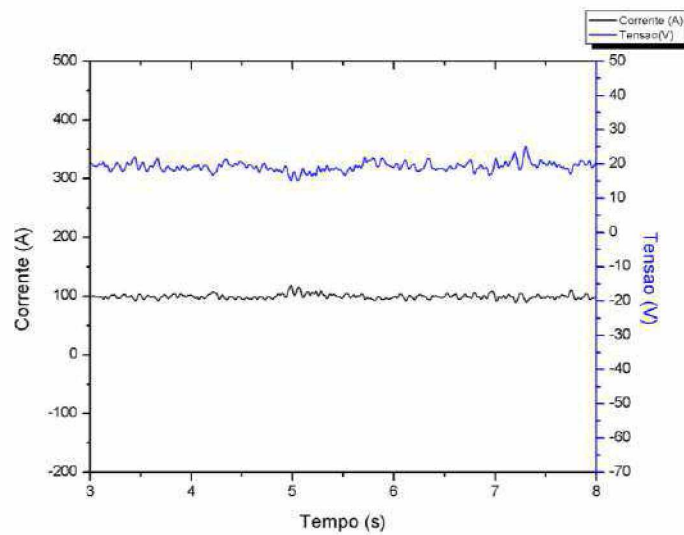
Leonello Filho (2005) também justifica o fato da menor estabilidade do arco verificada na soldagem com eletrodo celulósico E6010 ao atribui esse comportamento a grande quantidade de respingos gerada na soldagem com esse processo, em função do tipo de transferência metálica (spray), fazendo com que o soldador não consiga desenvolver maior controle do arco voltaico.

Os resultados observados quanto à estabilidade do arco refletem nos valores de tensão requerida para as soldagens com esses eletrodos. O eletrodo celulósico E6010, que apresenta maior instabilidade de arco, é também aquele que necessita de maior tensão, seguido do eletrodo básico E7018 e do eletrodo rutilico E6013. Esse resultado é coerente com os estudos de Neves et al (2013), no qual é relatado que a soldagem com eletrodo celulósico requer maior nível de tensão quando comparado com os demais tipos de eletrodos.

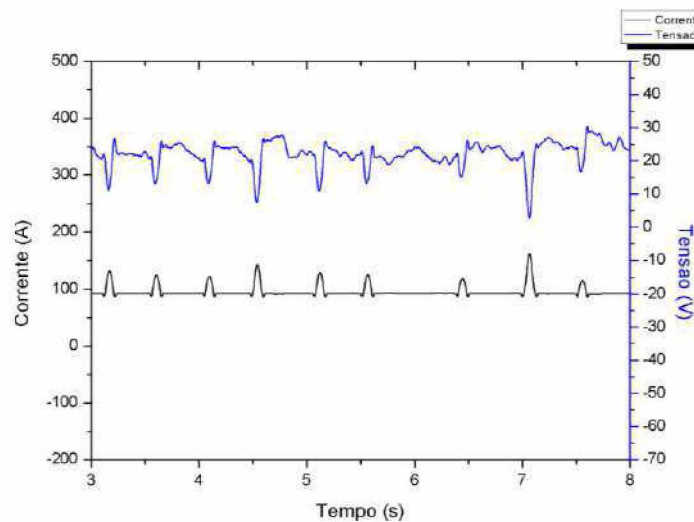
Com relação a corrente, percebe-se que há uma menor variação na corrente com eletrodo celulósico E6010, e maior variação na soldagem com eletrodo E7018, onde observa-se grande quantidade de picos que ultrapassam o valor médio em algumas dezenas de amperes, em função da presença de curtos-circuitos, mesmo sendo uma fonte do tipo corrente constante.



(a) Eletrodo celulósico E6010, nível baixo de corrente e nível alto de altura do arco.



(b) Eletrodo rutilico E6013, nível baixo de corrente e nível baixo de altura do arco.



(c) Eletrodo básico E7018, nível baixo de corrente e nível baixo de altura do arco.

Figura 3.1– Exemplos da aquisição de dados para o processo Eletrodo Revestido

A Tab. 4.3 reúne os resultados encontrados para os valores médios e eficazes da tensão e corrente de soldagem, bem como os valores mensurados para o campo magnético em cada ponto de medição (mão, cabeça, tronco e cintura) durante os experimentos.

Tabela 4.3 - Medidas de campo magnético para a soldagem Eletrodo Revestido

Ensaio (Código)	Campo magnético (mT)				Corrente (A)		Tensão (V)	
	Mão	Cabeça	Tronco	Cintura	Média	RMS	Média	RMS
E1C1A1E1	0,214	0,068	0,090	0,114	97	97	25,0	25,6
E2C1A2E1	0,168	0,065	0,085	0,107	91	91	36,3	36,6
E2C2A1E1	0,258	0,070	0,124	0,187	149	149	30,0	31,1
E4C2A2E1	0,241	0,065	0,097	0,144	146	146	40,4	40,6
E5C1A1E2	0,222	0,066	0,090	0,130	101	103	19,0	19,5
E6C1A2E2	0,195	0,064	0,087	0,124	100	102	18,4	19,0
E7C2A1E2	0,380	0,080	0,102	0,158	149	149	22,8	23,0
E8C2A2E2	0,300	0,070	0,102	0,150	146	146	39,2	39,4
E9C1A1E3	0,197	0,078	0,104	0,117	96	98	22,1	22,6
E10C1A2E3	0,183	0,073	0,087	0,109	98	100	22,1	23,0
E11C2B1E3	0,295	0,100	0,153	0,168	149	149	26,3	27,0
E12C2A2E3	0,268	0,087	0,143	0,163	148	148	29,8	30,0

Com respeito aos valores de corrente e tensão, somente o Ensaio E2C1A2E1 levou a uma menor corrente de soldagem, extrapolando uma faixa de tolerância considerada de ± 5 A, que seria desejável. Entretanto, ainda se considera aceitável uma variação de 10 A, uma vez que será realizada uma análise de variância (ANOVA) para se avaliar os resultados.

O modelo de ANOVA feito para avaliação dos valores obtidos para a tensão mostrados na Tab. 4.3, haja vista que a tensão é consequência do processo (fonte do tipo corrente constante), se mostrou significativa com $p = 0,02$. A Tab. 4.4 traz os valores dos demais níveis de significância, enquanto que as Figs. 4.2, 4.3 e 4.4 revelam os resultados ANOVA referentes ao comportamento da tensão em função da corrente, altura de arco e revestimento do eletrodo, respectivamente.

Tabela 4.4 - Níveis de significância para análise da tensão do Processo Eletrodo Revestido

Variável	Nível de significância
Média	0,00
Corrente	0,02
Altura do arco	0,04
Revestimento	0,06

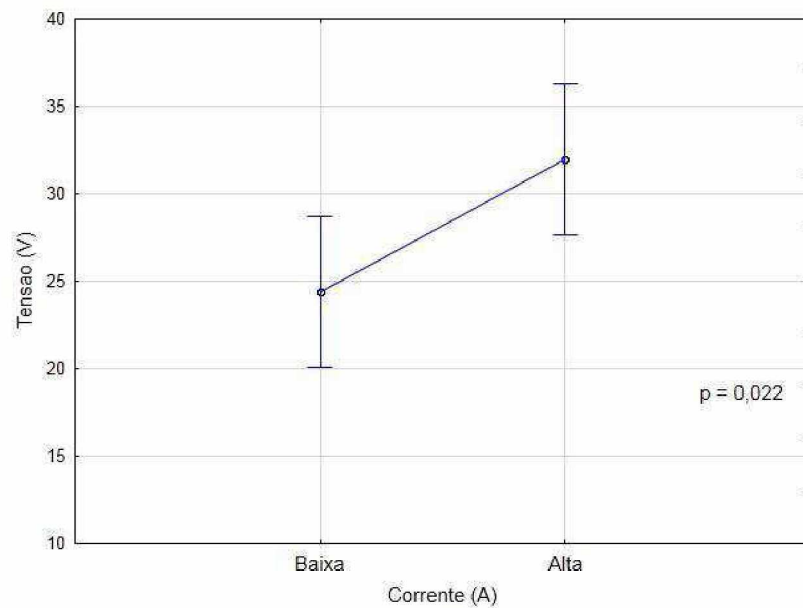


Figura 4.2 – Influência da corrente na tensão no processo Eletrodo Revestido

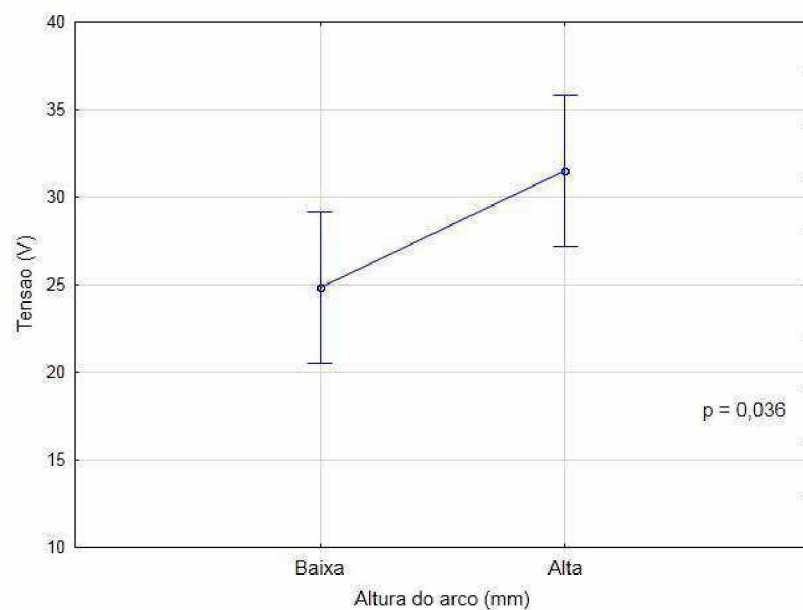


Figura 4.3 - Influência da altura do arco na tensão no processo Eletrodo Revestido

Quanto ao revestimento, os resultados obtidos estão em conformidade com os dados fornecidos no estudo de Neves et al (2013), pois mostram que na soldagem com eletrodo celulósico emprega-se tensões mais altas com relação aos demais eletrodos analisados, em função da dificuldade de soldar com este tipo de eletrodo, o que causa maior instabilidade de arco, exigindo maior habilidade do soldador. Nesse sentido, os menores valores de tensão são observados nas soldagens com eletrodos rutilico e básico, sendo o valor da tensão para o eletrodo rutilico pouco menor que para o eletrodo básico. De acordo com Costa filho (2005), a soldagem com eletrodos rutilicos é mais fácil e proporciona maior controle do arco pelo soldador. Uma vez que Neves et al (2013) relaciona a quantidade de tensão requerida com a estabilidade do arco, os resultados mostrados na Fig. 4.4 são coerentes, por fazerem a correspondência esperada entre a estabilidade do arco e o valor de tensão requerido na soldagem com esses eletrodos.

Em função da conformidade dos resultados obtidos para a tensão com os dados da literatura, é possível afirmar que o processo Eletrodo Revestido foi conduzido de forma correta e, por isso, a análise dos resultados referente às medições de campo magnético pode ser realizada.

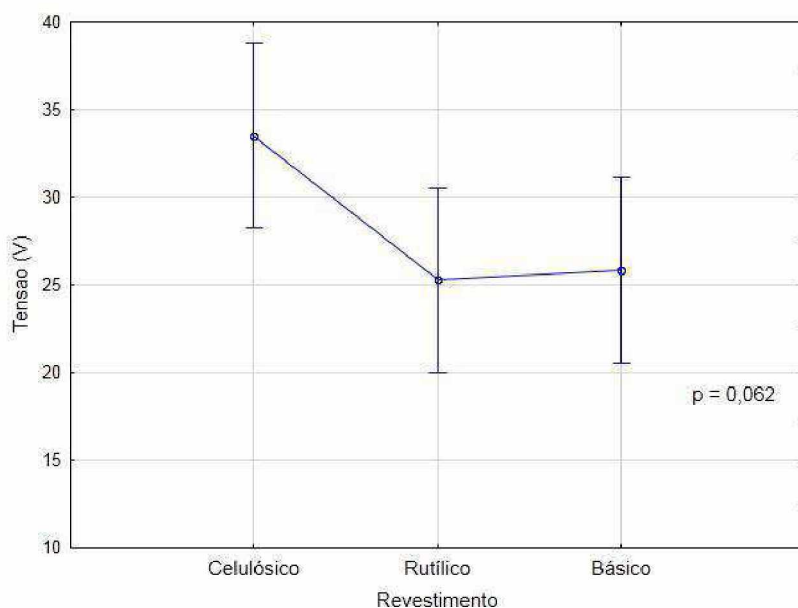


Figura 4.4 - Influência do revestimento do eletrodo na tensão no processo Eletrodo Revestido

Conforme descrito no Item 3.2, os experimentos com Eletrodo Revestido foram realizados com intuito de avaliar a influência da corrente de soldagem, altura do arco, tipo de revestimento do eletrodo e ponto de medição no corpo do soldador nos valores de campo magnético e determinar se algum destes resultados excede os limites de exposição

propostos pelas diretrizes do ICNIRP. Os resultados destas medições são mostrados na Tab. 4.3 e os resultados da ANOVA referente a análise do campo magnético são apresentados na Tab. 4.5. Assim, pela análise da Tab. 4.5, no processo Eletrodo Revestido, todas as variáveis analisadas foram significativas e, portanto, influenciam nos valores de campo magnético observados.

Tabela 4.4 - Níveis de significância para análise do campo magnético do processo Eletrodo Revestido

Variável	Nível de significância
Média	0,00
Corrente	0,00
Altura do arco	0,00
Revestimento	0,02
Ponto de medição	0,00

A Fig. 4.5 mostra a influência da corrente de soldagem no valor de campo magnético, o qual se mostra maior quanto maior for a corrente de soldagem. Este resultado concorda com o que é relatado nos trabalhos de Melton (2005), Bolte e Pruppers (2006) e Ali (2012), além de ser coerente com a lei de Biot-Savart ao comprovar experimentalmente que o campo magnético e a corrente de soldagem são grandezas diretamente proporcionais.

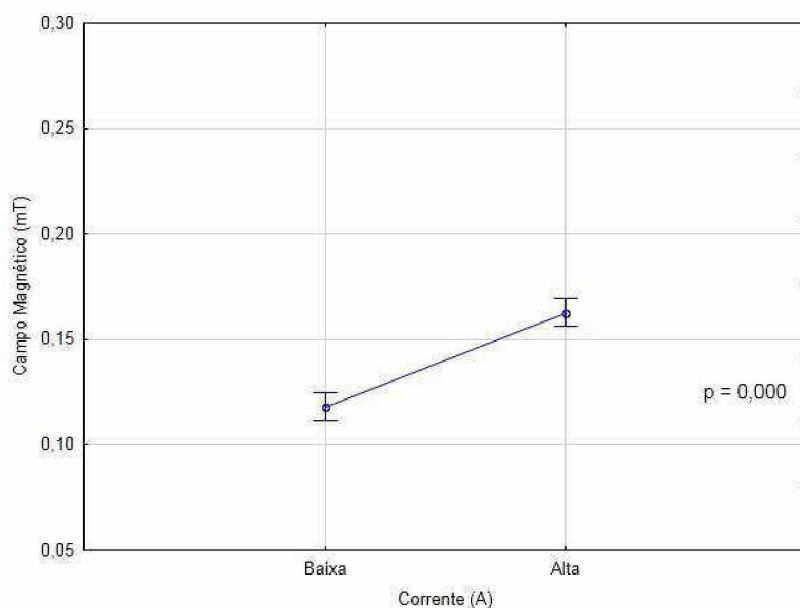


Figura 4.5 - Influência da corrente no valor de campo magnético para o processo Eletrodo Revestido

Quanto à altura do arco, a análise da lei de Biot-Savart, mostra que o valor do campo magnético varia diretamente com o comprimento do arco e inversamente com o quadrado da distância do centro do arco até a extremidade do campo magnético medido. Os resultados obtidos estão de acordo com Mair (2005) e Neris (2015) ao evidenciarem que a distância do centro do arco a extremidade do campo magnético predomina com relação a distância longitudinal do arco quanto a influência no valor do campo magnético, uma vez que arcos mais curtos, com menor distância radial e mais próximos do eletrodo, mostraram um campo magnético de maior valor (Fig. 4.7).

Outro ponto a ser considerado é que o arco elétrico pode ser considerado como um condutor fluido, através do qual flui uma corrente elétrica. Assim sendo, como também é explicado pela lei de Biot-Savart, quanto maior a densidade de corrente maior é o campo magnético gerado. Por esta razão, arcos mais contritos (menor comprimento radial e longitudinal) apresentam maior campo magnético.

De modo ilustrativo, na Fig. 4.6 é apresentada uma comparação entre o campo magnético gerado por dois arcos de tamanhos diferentes H1 e H2, sendo H1 menor que H2 em um processo de soldagem realizado com material de base com as mesmas dimensões. Ao aproximar o medidor do campo magnético a uma mesma distância 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 magnético 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.

Este resultado se torna ainda mais confiável ao ressaltar o fato de que o arco de soldagem possui forma cônica, que de que nestes ensaios foram utilizados eletrodos de 3,2 mm de diâmetro e que os valores aproximados de comprimento de arco são de, respectivamente, 2 e 4 mm para os níveis baixo e alto.

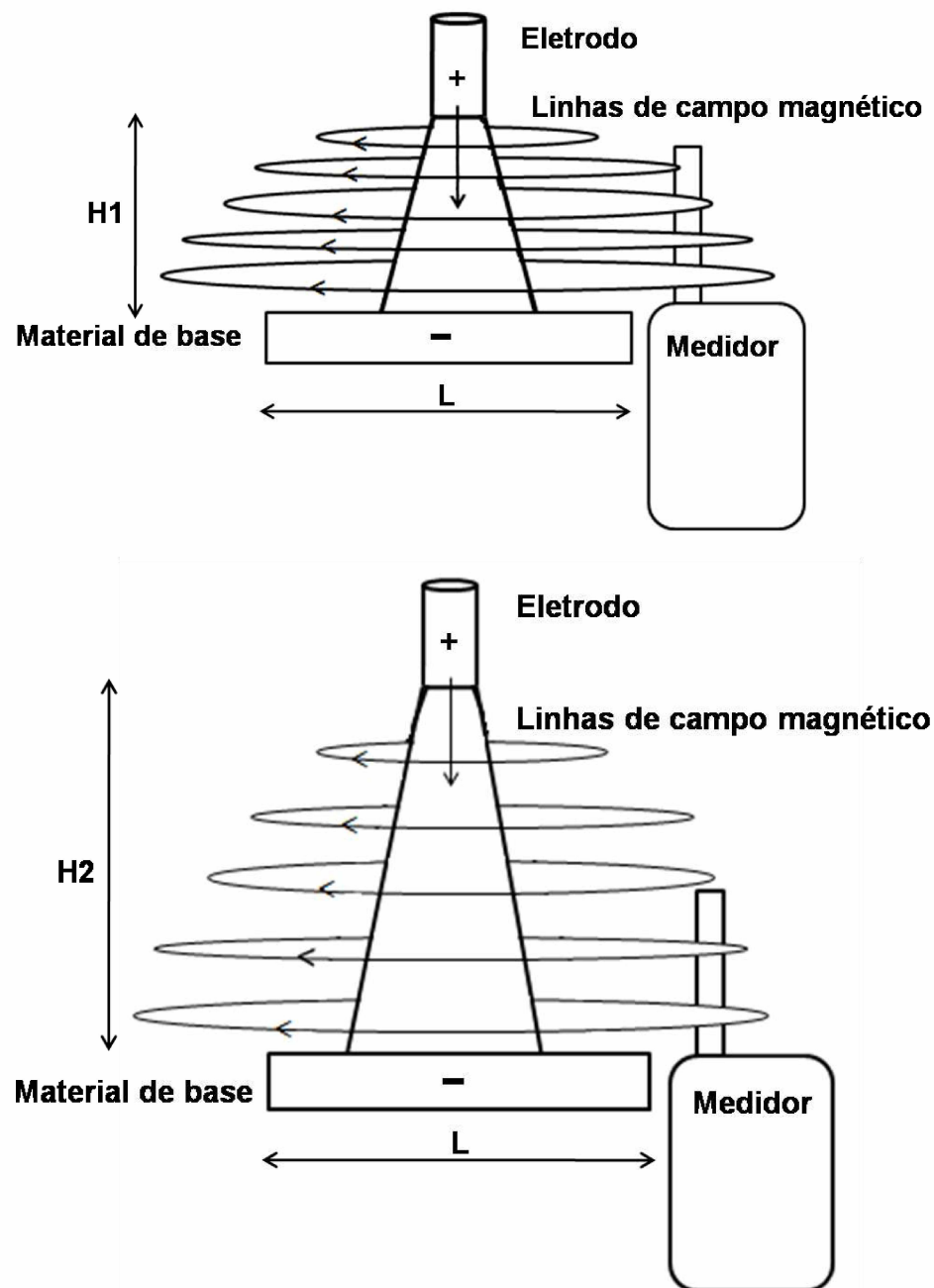


Figura 4.6 - Representação da densidade de corrente ou campo magnético em função da altura do arco de soldagem ($H1 < H2$)

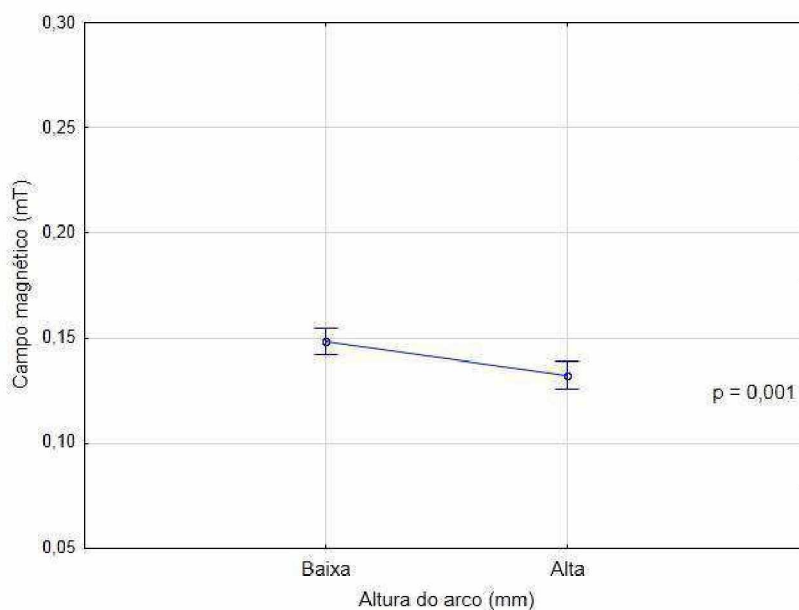


Figura 4.7 - Influência do comprimento do arco no valor de campo magnético para o processo Eletrodo Revestido

No que se refere ao revestimento, os resultados mostraram que o campo magnético oriundo da soldagem com o eletrodo celulósico é menor do que aquele gerado pelas soldagens com eletrodos rutilico e básico, que se mantiveram praticamente inalterados (Fig. 4.8.). Não foi encontrado na literatura nenhum indício que justificasse este resultado. Acredita-se que ele pode estar associado ao fato de que na soldagem com eletrodo celulósico o arco é mais violento e mais instável, resultando em um campo magnético médio de menor valor.

Um outro ponto a ser considerado nessa análise diz respeito novamente ao comprimento do arco. Pela análise dos sinais da Fig. 4.1, nota-se que na soldagem dos eletrodos rutilico e básico houve uma maior oscilação da corrente de soldagem, o que evidencia a existência de curtos-circuitos. Por outro lado, o sinal de corrente do eletrodo básico da referida figura apresenta-se bem constante, o que indica uma transferência sem curtos-circuitos no intervalo mostrado (considerando-se que o intervalo selecionado seja representativo da soldagem como um todo). Assim, é possível assumir que o arco elétrico estaria maior no caso do eletrodo celulósico, o que levaria a um menor campo magnético, conforme explicado na Fig. 4.6. Para se confirmar tal suposição dever-se-ia realizar filmagens em altas velocidades, mas que não são objetivo do presente trabalho.

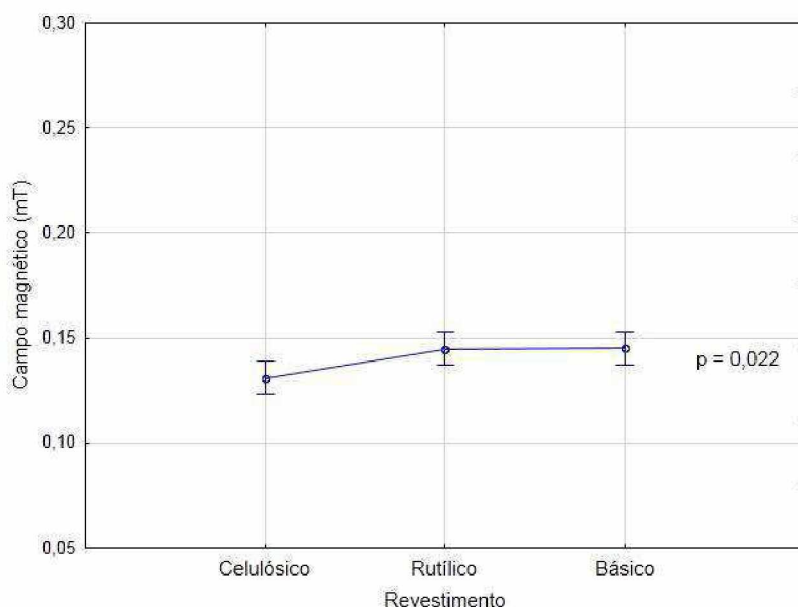


Figura 4.8 - Influência do revestimento do eletrodo no valor de campo magnético para o processo eletrodo revestido.

A Fig. 4.9 apresenta a influência do ponto de medição no valor do campo magnético. Pelo mesmo fato de que o campo magnético aumenta inversamente com o quadrado da distância, quanto mais próximo do campo magnético estiver o ponto de medição mais intenso este campo será. Logo, como pode ser observado na Fig. 4.9, o maior valor registrado foi na mão do soldador, pelo fato dele está segurando o porta-eletrodo, sendo este o ponto mais próximo ao campo magnético gerado no processo, seguido da cintura, troco e cabeça, onde se encontra o menor valor de campo magnético. A diferença dos resultados de campo magnético nos pontos de medição ocorre em função da distância do soldador a estes pontos. 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 magnético no tronco e na cabeça e maior valor na cintura e na mão.

Estes resultados estão de acordo com os dados apresentados na literatura por Melton (2005) e Sachiko et al (2011), os quais também indicam que o ponto de maior exposição ocorre na mão do trabalhador. Cabe ressaltar que, embora os pontos de medição encontrem-se a diferentes inclinações com relação ao arco elétrico, os valores medidos equivalem a média dos valores do campo magnético nas direções x, y e z.

A análise conjunta da Fig. 4.9 e da Tab. 4.1 permite avaliar também a exposição do soldador, ao comparar os valores de campo magnético obtidos no processo de soldagem Eletrodo Revestido com os limites estabelecidos pela diretiva do ICNIRP de 2009. Nesta análise foi verificado que o maior valor de campo magnético registrado foi de 0,380 mT na

mão do soldador com o uso do eletrodo rutilico em uma corrente alta e com altura de arco baixa. Nenhum dos valores registrados ultrapassa o limite de exposição, que segundo esta diretiva é de 2000 mT para a cabeça e tronco e 8000 mT para os membros.

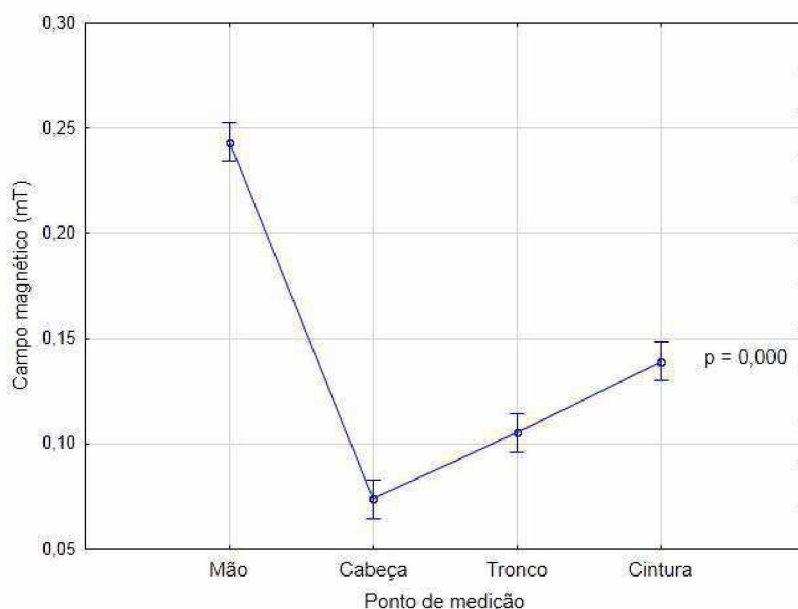


Figura 4.9 - Influência do ponto de medição no valor do campo magnético para o processo Eletrodo Revestido.

Por fim, os resultados obtidos neste grupo de experimentos mostraram também que podem existir interações estatisticamente significativas entre as variáveis analisadas como, por exemplo, a interação da corrente de soldagem com o ponto de medição ($p = 0,000$) e do revestimento do eletrodo com o ponto de medição ($p = 0,003$). Essas interações estatísticas podem significar simplesmente um ajuste do modelo de ANOVA para representar o modelo empírico do processo ou podem realmente ter um significado físico experimental. Nesse caso, os níveis de corrente e os tipos de revestimento podem alterar a geometria do campo magnético, alterando sua densidade e variando a distribuição das linhas de campo esquematizadas na Fig. 4.6. A avaliação de tal suposição pode ser feita com uso de modelos numéricos que, uma vez validados para situações mais simples, calculariam a distribuição das linhas de campo e, conseqüentemente, validariam ou não a referida suposição. Entretanto, embora seja de interesse científico e prático, o modelamento do campo magnético emitido pelos processos de soldagem não foi escopo do presente trabalho.

4.2. Processo TIG

Na soldagem TIG analisou-se a influência do modo e valor corrente, altura de arco, gás de proteção, o material de base e o ponto de medição. Bem como foi feito para o processo Eletrodo Revestido, no estudo do processo TIG os experimentos também 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 (T para soldagem TIG) e ao número de ensaio, seguido do tipo e material correspondente, depois pelo tipo e nível de corrente, depois 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 (no caso do material, tipo de corrente ou gás de proteção), conforme é apresentado na Tab. 4.6.

Tabela 4.6 - Codificações dos parâmetros experimentais para soldagem TIG.

Material - Código (M)		
Aço carbono 1020 – Código (1)	Aço inoxidável austenítico AISI304 – Código (2)	Alumínio AA5052 – Código (3)
Corrente – Código (C)		
Corrente Contínua (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)

Assim, de acordo com a Tab. 4.6, o primeiro experimento realizado em aço carbono, empregando nível baixo de corrente em modo DC, com nível baixo referente a distância eletrodo-peça, com utilização de Ar como gás de proteção teria a código T1M1C11D1G1. Os valores do campo magnético medidos nos experimentos com soldagem TIG e os valores dos sinais elétricos adquiridos são mostrados na Tab. 4.7, conforme a codificação sugerida.

Tabela 4.7 - Medidas de campo magnético para a soldagem TIG

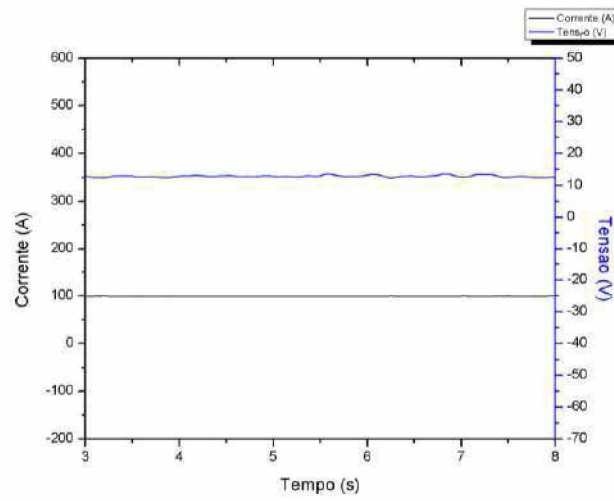
Ensaio	Campo magnético (mT)				Corrente (A)		Tensão (V)	
	Mão	Cabeça	Tronco	Cintura	Média	RMS	Média	RMS
T1M1C11D1G1	0,170	0,063	0,153	0,065	100	101	10,7	10,7
T2M1C11D2G1	0,156	0,058	0,139	0,041	99	99	12,8	12,8
T3M1C12D1G1	0,319	0,090	0,302	0,061	150	150	11,8	11,8
T4M1C12D2G1	0,268	0,075	0,219	0,046	150	150	13,2	13,2
T5M1C11D1G2	0,241	0,063	0,214	0,058	99	100	11,9	11,9
T6M1C11D2G2	0,231	0,058	0,168	0,034	99	99	12,6	12,6
T7M1C12D1G2	0,370	0,082	0,275	0,068	150	150	11,0	11,0
T8M1C12D2G2	0,285	0,078	0,251	0,048	150	150	12,7	12,7
T9M2C11D1G1	0,212	0,051	0,180	0,039	100	100	11,2	11,2
T10M2C11D2G1	0,156	0,068	0,139	0,031	99	99	12,9	12,9
T11M2C12D1G1	0,268	0,070	0,226	0,065	150	150	11,1	11,1
T12M2C12D2G1	0,246	0,092	0,204	0,036	150	150	12,7	12,7
T13M2C11D1G2	0,248	0,043	0,212	0,036	99	99	11,3	11,5
T14M2C11D2G2	0,195	0,065	0,222	0,039	99	99	12,0	12,1
T15M2C12D1G2	0,307	0,073	0,273	0,058	150	150	10,8	10,8
T16M2C12D2G2	0,273	0,075	0,239	0,061	149	149	13,1	13,1
T17M3C21D1G1	0,124	0,051	0,097	0,031	86	104	6,0	9,9
T18M3C21D2G1	0,109	0,046	0,073	0,026	85	102	9,8	14
T19M3C22D1G1	0,175	0,070	0,141	0,046	128	153	6,8	10,5
T20M3C22D2G1	0,156	0,068	0,139	0,038	127	153	10,0	14,3
T21M3C21D1G2	0,129	0,051	0,117	0,031	86	103	7,0	11,2
T22M3C21D2G2	0,114	0,043	0,073	0,024	86	103	7,8	11,6
T23M3C22D1G2	0,165	0,070	0,153	0,046	128	154	7,2	11,3
T24M3C22D2G2	0,148	0,063	0,136	0,041	127	153	9,2	13,4

Percebe-se com a observação da Tab. 4.7 que os valores rms para a corrente em todos os processos de soldagem TIG encontram-se dentro da faixa estabelecida no envelope experimental de 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 próprio formato de onda.

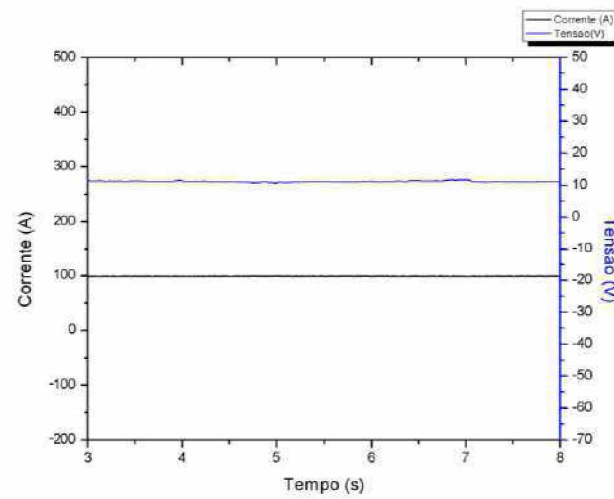
A Fig. 4.10 apresenta o exemplo do resultado da aquisição de sinais elétricos para a soldagem TIG em corrente contínua realizada em aço carbono ABNT 1020 e em aço

inoxidável austenítico AISI 304 e para soldagem TIG em corrente alternada no alumínio AA5052. Observa-se que, nas soldagens com aço carbono 1020 e aço inoxidável austenítico AISI 304, a tensão apresenta pequenas flutuações, o que implica em um processo de grande estabilidade do arco, como esperado para um processo TIG de alta qualidade (PEIXOTO, 2012). Além do comportamento gráfico, os valores de tensão nas soldagens com aço carbono e aço inoxidável austenítico são bem próximos, o que revela grande semelhança na soldagem com esses materiais em modo corrente contínua, no que diz respeito à estabilidade do processo.

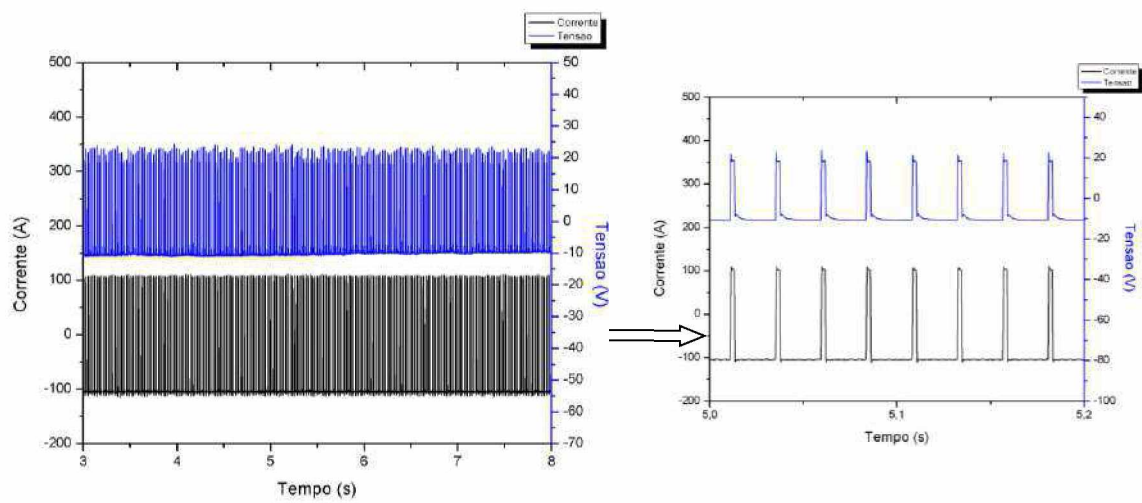
Quanto a soldagem em alumínio AA5052, percebe-se que os sinais elétricos adquiridos evidenciam o modo corrente alternada necessário à soldagem com esse material. Os menores valores de tensão revelados na soldagem com alumínio podem ser atribuídos ao fato de que esse material possui baixo ponto de fusão e de vaporização, havendo durante a soldagem maior quantidade de metal vaporizado, o que facilita a ionização do arco e, conseqüentemente reduz o valor da tensão (MONDENESI et al 2012). No entanto, os baixos valores de tensão observados para a soldagem com alumínio não podem ser comparados com aqueles obtidos nas soldagens com aço carbono e aço inoxidável austenítico, visto que esses dois últimos foram soldados em corrente contínua. Reis et al (2011) encontrou valores de tensão mais alta para a soldagem com alumínio e valores mais elevados na soldagem com aço carbono e aço inoxidável. Porém, em seu trabalho todos os testes foram feitos em corrente alternada e, por essa razão, o resultado obtido por esses autores, embora sejam semelhantes aos encontrados nesse trabalho, não podem ser comparados.



(a) TIG corrente contínua em Aço Carbono



(b) TIG corrente contínua em Aço Inoxidável Austenítico



(c) TIG corrente alternada em Alumínio

Figura 4.10 - Exemplo do resultado da aquisição de dados para experimento de soldagem TIG

Uma vez que a tensão é resposta do processo de soldagem TIG, realizado em corrente constante e em corrente alternada, foi realizada análise de variância (ANOVA) objetivando determinar a influência das variáveis estudadas no processo (corrente, distância eletrodo-peça, proteção gasosa e material/polaridade) na tensão de soldagem. O modelo de ANOVA revelou-se significativo ($p = 0,00$). Os demais níveis de significância, mostrados na Tab. 4.8, revelam que somente a distância eletrodo-peça e o material de base são fatores que exercem influência significativa na tensão de soldagem. Embora a corrente e o gás de proteção não demonstrem significância nos resultados de tensão adquiridos, todos os parâmetros operacionais estudados nesse processo foram analisados no sentido de avaliar a conformidade desses resultados com os dados da literatura. Uma vez que haja tal conformidade para os resultados de tensão será possível dar segmento com a análise do campo magnético gerado no processo TIG.

Tabela 4.8 - Níveis de significância para análise da tensão do processo TIG

Variável	Nível de significância
Média	0,00
Corrente	0,25
Distância eletrodo-peça	0,00
Gás de proteção	0,35
Material/Polaridade	0,00

As Fig. 4.11 e 4.12 mostram, respectivamente, a influência da corrente e da distância eletrodo-peça na tensão de soldagem. De acordo com essas figuras, a tensão de soldagem é maior para os maiores valores de corrente e distância eletrodo-peça e consequentemente altura do arco. Este resultado também foi obtido no processo Eletrodo Revestido e pode ser justificado pela mesma razão. Para os níveis de altura de arco (superior a 1 mm) e de corrente (superior a 50 A) adotados nesse estudo, a aumento do comprimento de arco faz com que o valor de tensão também aumente. Pelas mesmas razões apresentadas no processo Eletrodo Revestido, o arco de maior comprimento troca maior quantidade de calor com meio externo e necessita de maior tensão para manutenção da temperatura de ionização dos gases e conservação do arco elétrico.

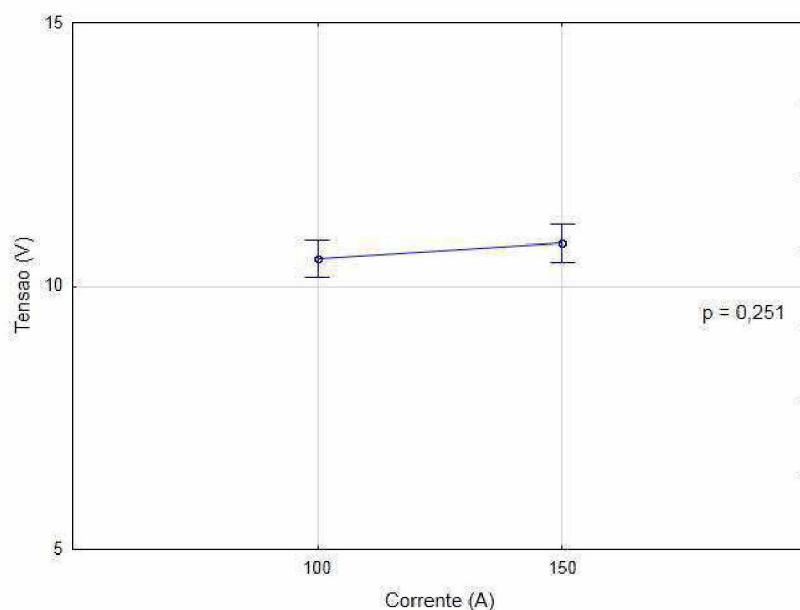


Figura 4.11 - Influência da corrente na tensão para a soldagem TIG

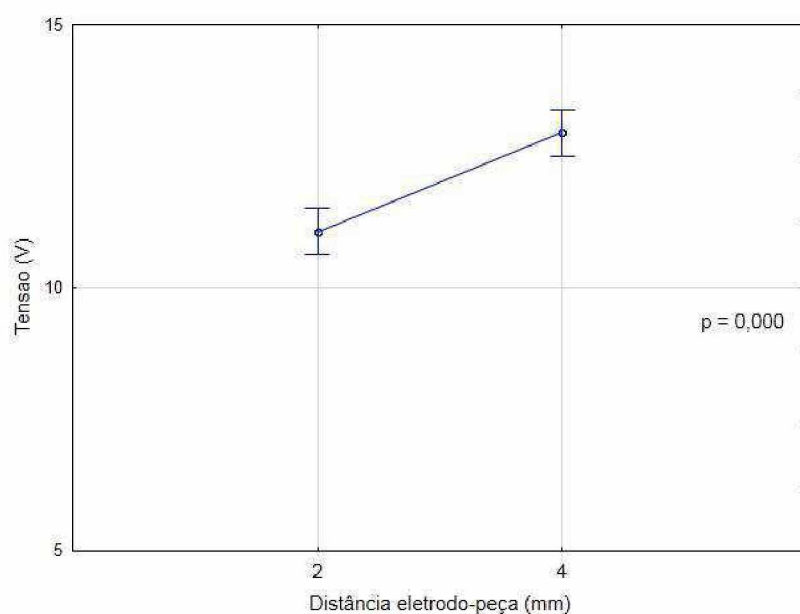


Figura 4.12 - Influência da distância eletrodo-peça na tensão para a soldagem TIG

A Fig. 4.13 apresenta o comportamento da tensão em resposta a proteção gasosa utilizada no processo. A tensão registrada com a utilização do Ar puro como gás de proteção é pouco maior que a tensão adquirida na soldagem com Ar+25%He. De acordo com Mondenesi et al (2012), gases com menor potencial de ionização requerem menor valor tensão, em função da facilidade de abertura e manutenção da estabilidade do arco. Logo, pelo fato do Ar ter menor potencial de ionização que o He, a mistura gasosa Ar+25%He, quando comparada com o Ar puro em termos de potencial de ionização, necessitaria de maior tensão. No entanto, os autores enfatizam que o comportamento global do arco em

soldagem depende de diversos 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, até mesmo pelo fato da proteção gasosa não ter demonstrado influência significativa como é claramente observado na Fig. 4.13 pela grande proximidade entre os resultados, não é possível extrair uma conclusão precisa para o comportamento observado.

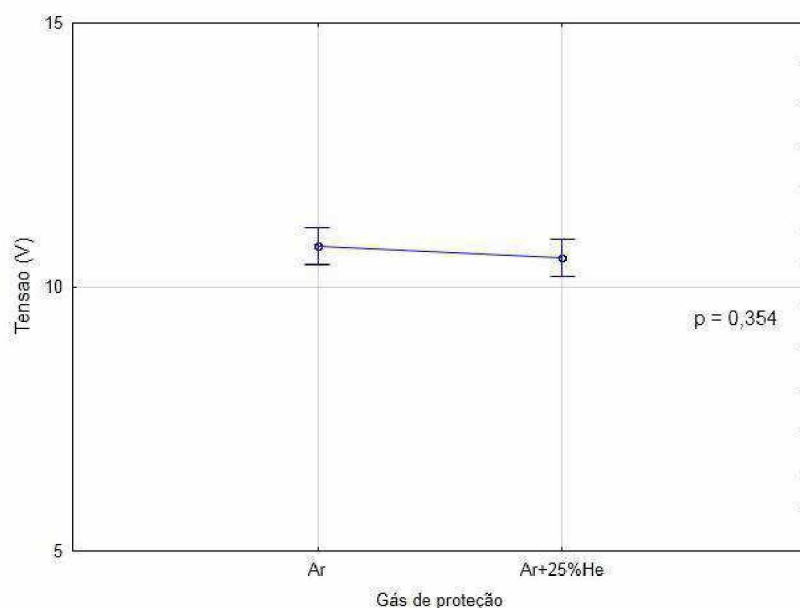


Figura 4.13 - Influência do gás de proteção na tensão para a soldagem TIG

Pela Fig. 4.14 percebe-se que a tensão é menor na soldagem com alumínio em corrente alternada, seguido da soldagem com aço inoxidável austenítico e aço carbono, ambas realizadas em modo corrente contínua. Como já foi exposto, o menor valor de tensão observado para soldagem em alumínio pode ser atribuído ao menor ponto de fusão desse material. Essa característica física faz com que haja maior quantidade de metal vaporizado, facilitando a ionização do arco durante a soldagem e, por esse motivo, reduzindo o valor da tensão (MONDENESI et al 2012). Embora esse resultado, seja o mesmo encontrado por Reis et al (2011), nenhuma comparação pode ser realizada, uma vez que, diferentemente do presente estudo, no trabalho desses autores foi utilizada, exclusivamente, corrente alternada.

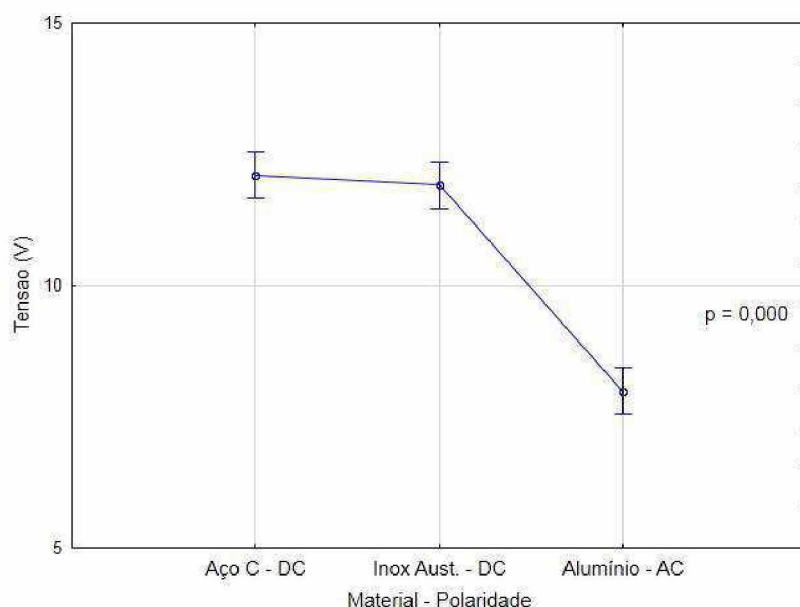


Figura 4.14 - Influência do material de base na tensão para a soldagem TIG

Nesse contexto, embora não tenha sido possível fazer uma análise precisa do resultado da tensão em função da proteção gasosa, é possível afirmar que, de modo geral, os resultados apresentados para a tensão na soldagem TIG estão em acordo com o referencial teórico, o que permite afirmar que o processo foi realizado de modo satisfatório e, por esse motivo, é possível dar segmento ao estudo com a análise de variância para os valores de campo magnético obtidos nos diferentes conjuntos experimentais previamente estabelecidos. O modelo de ANOVA, realizado para análise da geração de campo magnético no processo TIG em função das variáveis experimentais selecionadas, revela-se também significativo $p = (0,00)$ (Tab. 4.9), demonstrando assim que todas as variáveis estudadas são determinantes no valor de campo magnético medido.

Tabela 4.9 - Níveis de significância para análise do campo magnético do processo TIG

Variável	Nível de significância
Média	0,00
Corrente	0,00
Distância eletrodo-peça	0,00
Gás de proteção	0,00
Material/Polaridade	0,00
Ponto de medição	0,00

O comportamento da corrente na geração de campo magnético foi o mesmo que aquele observado na soldagem Eletrodo Revestido. O campo magnético é maior quanto maior for a corrente de soldagem (Fig. 4.15). Sendo assim, esse resultado também está de acordo com Melton (2005), Bolte e Pruppers (2006) e Ali (2012), e é explicado pela lei de Biot-Savart ao mostrar que o campo magnético e a corrente de soldagem são grandezas diretamente proporcionais e, portanto, o aumento na corrente de soldagem implica em campos magnéticos de maior intensidade.

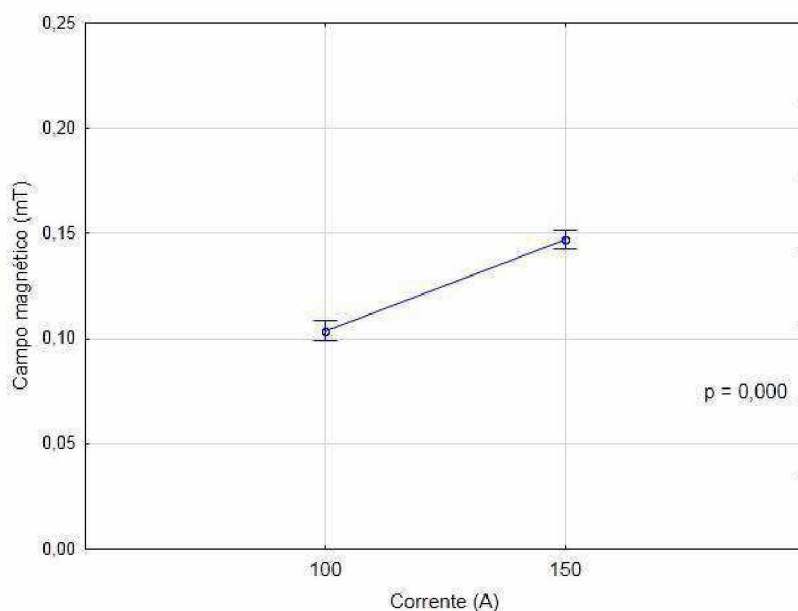


Figura 4.15 - Influência da corrente no valor de campo magnético no processo TIG

A Fig. 4.16 apresenta o resultado obtido para influência da distância eletrodo-peça e, em consequência, da altura do arco na intensidade do campo magnético. Assim como discutido no processo Eletrodo Revestido, em coerência com a Lei de Biot-Savart, arcos de menor comprimento apresentam menor distância radial entre o centro do arco e a

extremidade do campo magnético medido e, por essa razão, apresentam maior densidade de campo magnético com relação aqueles de maior comprimento que, por possuírem maior distância radial, geram menor densidade de campo. Desse modo, no processo TIG os resultados encontrados confirmam estes relatos e também concordam com os estudos de Mair (2005) e Neris (2015) ao mostrarem que o campo magnético é maior quanto menor o comprimento do arco

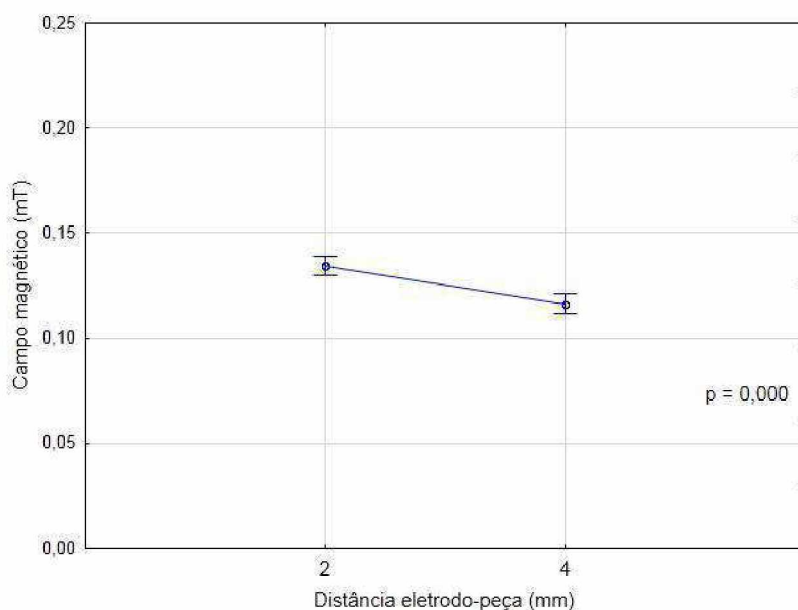


Figura 4.16 - Influência da distância eletrodo-peça no valor de campo magnético no processo TIG

A proteção gasosa exerce papel importante no valor do campo magnético. Os resultados mostraram que o campo magnético é maior com a utilização da mistura gasosa Ar+25%He do que com Ar puro (Fig. 4.17). Este resultado pode ser explicado pela condutividade térmica dos gases. 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. Gases com maior condutividade térmica perdem muito calor radialmente, assumindo um formato mais estreito, enquanto gases de menor condutividade térmica possuem arcos com uma zona externa mais larga. Desse modo, sabendo que o campo magnético diminui com o quadrado da distância radial do centro do arco até a extremidade do campo magnético gerado ao redor do arco (Lei de Biot-Savart), é possível justificar que a soldagem com proteção gasosa de Ar puro conduz a campos magnéticos de menor valor, devido ao seu formato de arco ser mais largo do que aquele formado na soldagem com Ar+25%He.

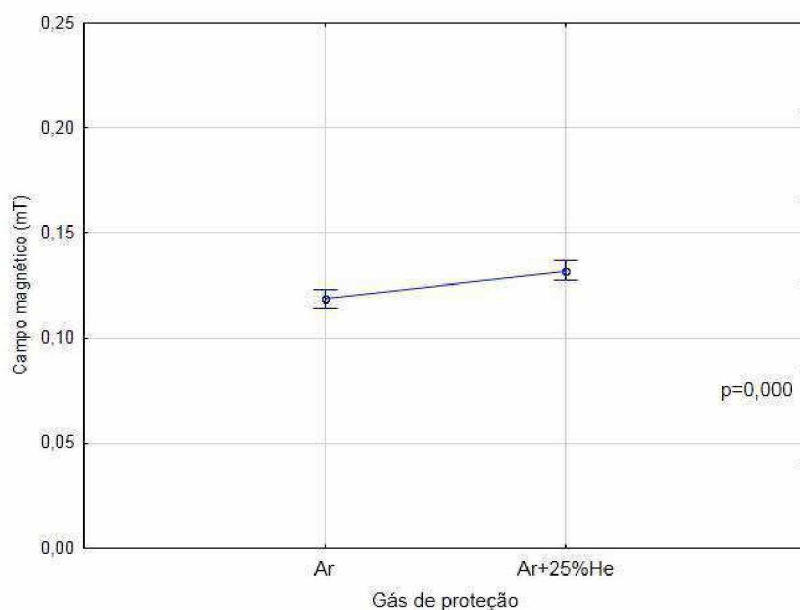


Figura 4.17 - Influência do gás de proteção no valor de campo magnético no processo TIG

Quanto ao tipo de material de base, a Fig. 4.18 revela que o maior campo magnético foi registrado para a soldagem do aço carbono 1020, seguido do aço inoxidável austenítico e, por fim, do alumínio. É possível perceber que os valores de campo magnético obtidos encontram-se em ordem decrescente, fazendo correspondência a permeabilidade magnética destes materiais. De acordo com as Equações 2.1 e 2.2 (Lei de Biot-Savart) o campo magnético é diretamente proporcional a permeabilidade magnética do material (μ). Sendo assim, por ser o aço carbono o material de maior permeabilidade magnética, ele também apresenta campo magnético de maior valor. O aço inoxidável austenítico e o alumínio são ambos paramagnéticos. No entanto, a permeabilidade magnética do alumínio é menor, resultando em campos magnéticos também menores.

Por outro lado, deve-se atentar para o fato de que o alumínio, em função da necessidade de limpeza catódica, foi soldado com corrente alternada. Assim, a Fig. 4.18 também revela informações a respeito da polaridade da corrente empregada nos processos TIG. Somente aqueles experimentos feitos com alumínio foram realizados com o uso de corrente alternada. Melton (2005) ao estudar este processo, mostra que na soldagem com corrente alternada o valor de campo magnético deve ser maior. No entanto, como já foi exposto, no presente trabalho 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.

Ainda da análise da Fig. 4.18, diferentemente do processo Eletrodo Revestido, deve-se atentar para não correlacionar a tensão de soldagem desses materiais com o campo

magnético gerado, haja vista que o comprimento do arco está correlacionado com a distância eletrodo-peça para o TIG, que é um processo não-consumível.

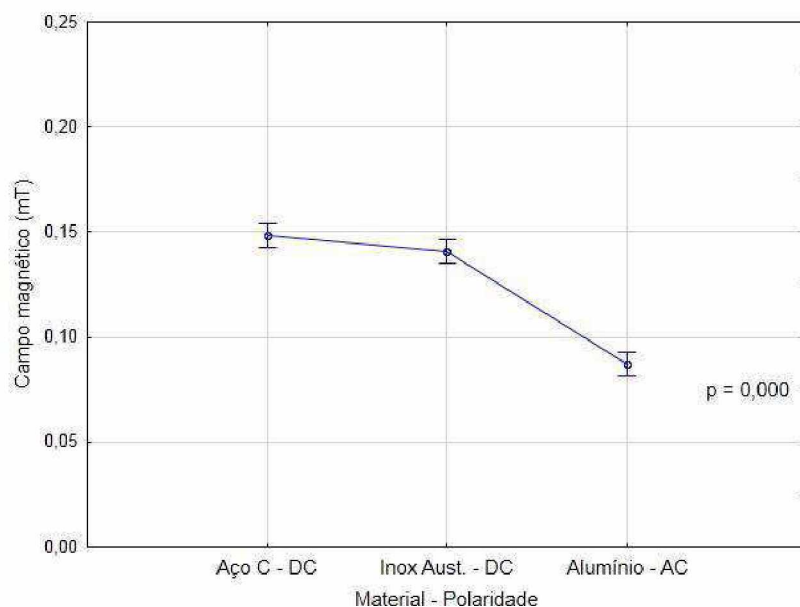


Figura 4.18 - Influência do material de base no valor de campo magnético no processo TIG

A Fig. 4.19 mostra a influência do ponto de medição no valor do campo magnético medido. Assim como no processo Eletrodo Revestido, a mão do soldador foi o ponto de medição onde o campo magnético foi maior, pelo fato do soldador segurar a tocha de soldagem durante o processo e, portanto, ser o ponto de maior proximidade. 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. Na soldagem TIG após a mão, os maiores valores de campo magnético 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 conseqüentemente afastando a cintura.

A comparação dos valores de campo magnético 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 magnético mensurado nas soldagens com corrente alternada, devendo ser comparada com limites estabelecidos da diretiva ICNIRP de 2010, referente a campos magnéticos variantes

no tempo. De acordo com esta última diretiva, para os processos TIG AC feitos neste trabalho, cuja nível de frequência foi de 40 Hz, o valor de referência é de 1 mT.

A análise geral dos valores contidos na Tab. 4.2 revela que os valores obtidos variam de 0,031 mT na cintura a 0,370 mT na mão do soldador. Em nenhum processo de soldagem TIG, seja ele AC ou DC, os valores de referência foram ultrapassados.

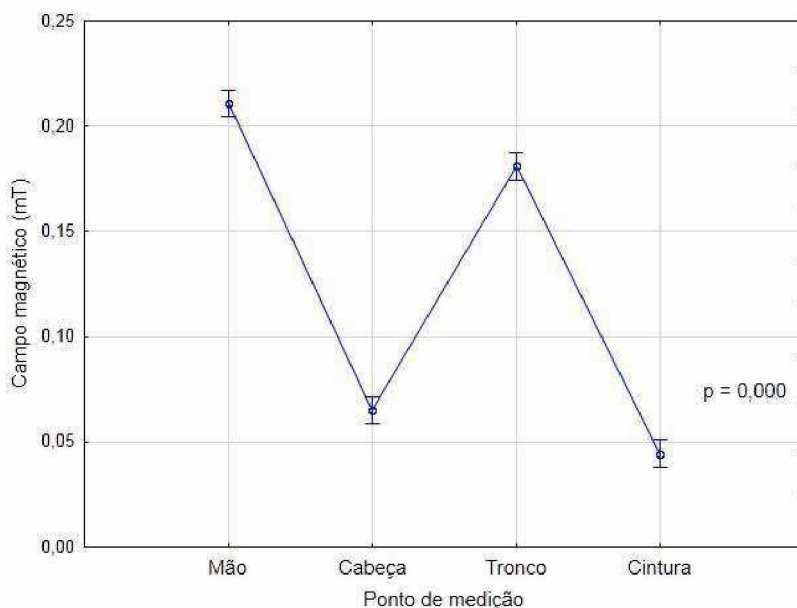


Figura 4.19 - Influência do ponto de medição no valor de campo magnético no processo TIG.

Por fim, a análise de variância desse processo não apontou nenhuma interação significativa entre as variáveis.

4.5. Considerações finais sobre os 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 magnéticos. Aqueles processos em que foram empregados corrente de maior valor apresentaram também campo magnético mais intenso. Desse modo, os maiores valores de campo magnético foram registrados para o processo de soldagem TIG e, em seguida, Eletrodo Revestido.

Foi possível perceber que quanto maior a altura do arco menor é a valor campo magnético. Este resultado foi explicado pela lei de Biot-Savart. Segundo esta lei o campo magnético é maior quando menor for a distância radial do centro do arco até a extremidade

do campo magnético. Como arcos mais curtos possuem essa distância menor, o campo magnético se mostrou mais intenso.

A proteção gasosa foi um fator de influência para o processo TIG. Esse fato foi justificado pelo formato adquirido ao se variar o gás de proteção. Arcos mais estreitos formados por misturas com maior condutividade térmica (Ar+25%He, no caso) e, portanto, com menor distância radial do centro do arco a extremidade do campo magnético, resultam em campos magnéticos de maior valor.

Quanto aos materiais é possível incluir que no caso da soldagem Eletrodo Revestido celulósico o campo magnético teve menor valor quando comparado com o campo obtido na soldagem com os outros eletrodos rutilico e básico, pelo fato da soldagem com eletrodo celulósico oferecer um arco menos instável. No caso da soldagem TIG a diferença de campo magnético em função do material de base utilizado ocorreu em função da permeabilidade magnética. Materiais com maior permeabilidade magnética ofereceram maior valor de campo. Este resultado também é coerente com a lei de Biot-Savart.

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 magnético, 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. Os valores de campo magnético 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 magnético 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.

Neste estudo o grau de mecanização do processo não pôde ser avaliado, uma vez que todos os testes foram realizados na versão manual.

Os valores de campo magnético encontrados para os processos Eletrodo Revestido e TIG não ultrapassaram os limites estabelecidos pelas diretivas do ICNIRP, dentro do envelope de trabalho utilizado.

CAPÍTULO V

CONCLUSÃO

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

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

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 por estudos de outros autores.

b) Em relação a influência das variáveis analisadas no processo eletrodo revestido no valor do campo magnético:

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

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

Eletrodos com revestimento celulósico produzem campos magnéticos menores que aqueles gerados em soldagem com eletrodos rútilicos e básicos.

A mão do soldador é o ponto de medição onde se obtém maior campo magnético, seguido da cintura, tronco e cabeça.

Os valores de campo magnético registrados não ultrapassam ultrapassa os limites de referência estabelecidos na diretiva ICNIRP.

c) Em relação a influência das variáveis analisadas no processo TIG no valor do campo magnético:

O valor de campo magnético é maior quando se utiliza maior corrente de soldagem.

A altura do arco elevada representa menor valor de campo magnético em função do formato cônico do arco elétrico.

Nas soldagens realizadas com proteção gasosa Ar+25%He foi registrado maior campo magnético do que aquelas realizadas com Ar puro, em função do formato do arco assumido com este tipo de gás de proteção.

Soldagens feitas com aço carbono 1020 apresentam campo magnético maior que soldagens feitas com aço inoxidável austenítico em corrente contínua. Em ambos os processos o valor de campo magnético é superior ao registrado em soldagens com alumínio no modo corrente alternada.

O ponto de medição onde se registra maior campo magnético é na mão do soldador, seguido do tronco, cabeça e cintura.

Os valores de campo magnético registrados não ultrapassam os limites de referência estabelecidos na diretiva ICNIRP.

d) Em relação ao trabalho, de modo geral:

O aumento da corrente de soldagem faz com que se aumente o valor de campo magnético.

A altura do arco e o gás de proteção por estarem relacionados com o formato do arco, exercem influência significativa no valor do campo magnético.

A mão do soldador é o ponto de medição onde se registra maior valor de campo magnético, 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 magnético 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 magnético encontrados para os processos Eletrodo Revestido e TIG não ultrapassaram os limites estabelecidos pelas diretivas do ICNIRP, dentro do envelope de trabalho utilizado.

CAPÍTULO VI

TRABALHOS FUTUROS

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

Sob este aspecto, sugere-se dar continuidade aos estudos dos campos magnéticos emitidos nos processos de soldagem arco utilizando-se o processo MIG/MAG nos modos de transferência metálica curto-circuito convencional, curto-circuito controlado, globular e pulsado, e avaliando a influência dos parâmetros operatórios na geração de campos magnéticos e a exposição dos soldadores aos campos magnéticos oriundos desse processo, através da comparação com os limites estabelecidos pelas diretivas mais atualizadas do ICNIRP.

Após a verificação dos campos magnéticos gerados nos processos de soldagem a arco Eletrodo Revestido, TIG e MIG/MAG, sendo os dois primeiros já estudados no presente trabalho, sugere-se avaliar a geração de campos magnéticos em soldagens por resistência (RSW) nos modos corrente contínua e corrente alternada, também com foco na influência das variáveis operacionais na geração desses campos e na exposição do soldador.

Por fim, sugere-se que os resultados obtidos experimentalmente nesses estudos poderiam ser validados por meio da elaboração de um modelo computacional capaz de simular a geração de campos magnéticos nos processos de soldagem a arco e por resistência em função das variáveis operatórias desses processos e então ser possível comparar os dados obtidos em experimentos com aqueles adquiridos através de modelagem computacional.

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.

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.

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.

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.

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

CANOVA, et al Evaluation of workers exposure to magnetic fields. **The european physical journal applied physics**. v. 52, p. 1 -5, 2010.

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-circuito convencional e controlado na soldagem de dutos de aço carbono**. 2011. 197 f. Dissertação de mestrado – Universidade Federal de Uberlândia, Minas Gerais.

COX, P. 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.

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.

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.

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

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.

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.

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

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

GRASSI, F.; SPADACINI, G.; PIGNARI, S. A. Human exposure in arc-welding processes: current versus previous ICNIRP basic restrictions. **IEEE International symposium on electromagnetic compatibility (EMC)**, Pittsburgh, Pennsylvania, 2012.

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.

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.

ICNIRP. Guidelines on limits of exposure to static magnetic fields. **Health physics**, 96(4), 2009, pp. 504-514.

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.

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

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.

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.

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.

MONDENESI, P.J.; MARQUES, P.V. **Fontes de energia para a soldagem a arco**. Universidade Federal de Minas Gerais. Departamento de engenharia metalúrgica e de materiais, 37 p., 2009.

MONDENESI, P.J.; MARQUES, P.V. **Introdução aos processos de soldagem**. Universidade Federal de Minas Gerais. Departamento de engenharia metalúrgica e de materiais, 52 p., 2011.

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, 209 p., 2012.

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

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.

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

REIS, R. P. 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.

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.

SACHIKO, Y. S., et al. Measuring exposed magnetic fields of welders in working time. **Industrial health**, v. 49, p. 274 – 279, 2011.

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.

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

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.

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

STUCHLY, M.A.; LECUYER, D.W. Exposure to electromagnetic fields in arc welding, **Health physics**, v. 56, n. 3, 1989.

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.

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.