

LUIZ ALEXANDRE GUILHERME

**ESTUDO DO EFEITO DA GEOMETRIA DAS
EXTREMIDADES DO NÚCLEO DO ELETROÍMÃ
SOBRE A DEFLEXÃO DO ARCO DE SOLDAGEM**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

2012

LUIZ ALEXANDRE GUILHERME

**ESTUDO DO EFEITO DA GEOMETRIA DAS EXTREMIDADES DO
NÚCLEO DO ELETROÍMÃ SOBRE A DEFLEXÃO DO ARCO DE
SOLDAGEM**

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

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Américo Scotti

**UBERLÂNDIA – MG
2012**

AGRADECIMENTOS:

À Universidade Federal de Uberlândia e à Faculdade de Engenharia Mecânica pela oportunidade de realização do meu Curso de Pós-Graduação;

Ao meu Orientador Professor Doutor Américo Scotti pela orientação e profissionalismo demonstrado nesses anos de trabalho que contribuiu muito para minha formação intelectual;

Ao CNPq pelo apoio financeiro;

Ao Laprosolda/UFU pelo suporte técnico e laboratorial, sem os quais não seria possível a elaboração deste trabalho;

Aos professores do grupo Laprosolda, Prof. Dr. Valtair Ferraresi, Prof. Dr. Louriel Oliveira Vilarinho, Prof. Dr. Vladimir Ponomarev e Prof. Dr. Ruham Pablo Reis, pelos ensinamentos repassados durante o curso;

A minha esposa Renata Maria da Costa Guilherme pelo carinho, paciência e incentivo, para meu crescimento intelectual, acadêmico e profissional;

A meus pais Prof. Dr. Luiz Carlos Guilherme e a Graduanda em Serviço Social Darci Tomásia da Silva e meu irmão Doutorando em Educação Willian Douglas Guilherme, pelo incentivo constante e apoio moral para dedicação nos estudos e crescimento sempre;

Aos amigos do Laboratório que contribuíram diretamente na realização deste trabalho;

Ao Tio Mário, Tio João e Vovó Yolanda, primos, tios e familiares, a quem devo parte da minha formação.

GUILHERME, Luiz Alexandre. **Estudo do Efeito da Geometria das Ponteiros do Magneto Sobre a Deflexão do Arco de Soldagem**. 2012. 138f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia. 2012.

Resumo

A aplicação de campos magnéticos em soldagem pode ser feita de forma benéfica, melhorando o desempenho dos processos. Um dos objetivos de se utilizar campo magnético na soldagem é oscilar os arcos de soldagem, substituindo dispositivos mecânicos utilizados para essa finalidade. Esse trabalho busca melhorias do sistema de oscilação do arco de soldagem pela aplicação de campo magnético por meio do estudo das extremidades do núcleo do eletroímã (sistema de deflexão magnético do arco). Foram idealizados alguns tipos de extremidades do núcleo do eletroímã com diferentes geometrias, tanto em forma como em número de arestas. Inicialmente, foram desenvolvidas técnicas de visualização das linhas de campo, tanto num plano, como tridimensional, usando limalhas como agente identificador das linhas do campo. Aplicando-se os métodos de visualização em campos gerados com as diferentes extremidades do núcleo do eletroímã, procurou-se avaliar se estas técnicas seriam capazes de prever o comportamento do arco quando defletido. Numa segunda etapa, foi feita uma montagem para medição do campo em diversas regiões entre as extremidades do núcleo do eletroímã com uso de um teslâmetro. Para cada extremidade do núcleo do eletroímã foi levantada uma superfície de resposta, mostrando como as linhas de campo se comportam. Os resultados mostraram que ambas as metodologias de visualização são coerentes uma com a outra e que são capazes de mostrar comportamentos típicos, como os da concentração do campo em algumas regiões e de como o campo se direciona ao sair das arestas das extremidades do núcleo do eletroímã. Porém, a técnica de medição do campo mostrou-se mais informativa, pois quantificava o campo no espaço, em contraste com um caráter apenas indicativo e didático conseguido com as metodologias de visualização. Finalmente, os campos magnéticos gerados pelas diferentes extremidades do núcleo do eletroímã foram aplicados em arcos reais, inicialmente em um arco estacionário sobre uma placa plana de alumínio e, em seguida, sobre um arco em movimento, tanto sobre a chapa plana de aço como em uma junta de chapas sobrepostas. Os resultados mostram que existe uma boa correlação entre a distribuição e intensidade dos campos visualizados e mensurados com a deflexão e deslocamento do arco e entre a deflexão e deslocamento do arco com a geometria do cordão formado. Também mostrou que o estudo da geometria da extremidade do núcleo do eletroímã pode aumentar a eficiência da soldagem, seja quando na soldagem para união quanto para revestimentos.

Palavras Chaves: Arco de soldagem, Deflexão magnética, Geometria de extremidades do núcleo do eletroímã de eletroímã, Linhas de Indução Magnética, Intensidade de Campo Magnético.

GUILHERME, L.A. **A Study on the effect of the electromagnet core tip geometries over arc welding deflection.** 2012. 115 f. Master dissertation, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia. 2012.

Abstract

The application of a magnetic field in welding can be beneficially carried out, improving the processes. One of the objectives of using magnetic field in welding is to oscillate the welding arcs, replacing mechanic devices used for this purpose. This paper has the goal of searching for improvements in the oscillation of the welding arc by studying the tip geometries of a electromagnet core (magnetic deflection system of the arc) that imposes magnetic fields on the arcs. Some designs of tips with different geometries were designed, concerning both shape and number of edges. First of all, 2D and 3D visualization techniques of the field lines were developed e applied, using filings as identifier agents of the field lines. The objective was to verify if a field line visualization approach could predict the arc behavior when deflected by a magnetic. Second of all, an assembly to measure by a teslameter the field in several regions among the tips was employed. It was raised response surfaces to each tip, showing how the field lines distribution behaves. The results indicate that both visualization methodologies are consistent with each other and that they are capable of showing typical behaviors such as the field concentration in some regions and how the field directs itself when leaves the tips edges. However the field measurement technique proved to be more informative due to quantification of the field in the space, in contrast with an only indicative and didactic character achieved with the visualization methodologies. Finally, the generated magnetic fields from different tips were applied in actual arcs, initially in a stationary arc over an aluminum flat plane and, then, on an arc in movement, as much as in a flat plane steel as in a sheet overlap joint. The results showed that there is a good interconnection amongst distribution and intensity of visualized fields and measured with deflection and displacement of the arc and between the deflection and displacement of the arc with the geometry of the formed string. They also showed that the study of tip geometry can increase the welding efficiency such as when you want to weld joints or deposit overlays.

Keywords: Welding Arc, magnetic deflection, electromagnet tip geometry, magnetic lines of force, magnetic field intensity.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I	33
INTRODUÇÃO	33
 CAPÍTULO II	 35
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	35
2.1 – O Arco Voltaico	35
2.2 – Força Magnética	37
2.3 – Deflexão Magnética do Arco Voltaico	39
2.4 – Importância da Oscilação do Arco	43
2.5 – Vantagens e Aplicação da Deflexão Magnética do Arco	48
 CAPÍTULO III	 52
METODOLOGIA GERAL, FUNDAMENTOS E CONSTRUÇÃO DE UM ELETROÍMÃ	52
3.1 – Definições	52
3.2 – Metodologia Geral	53
3.3 - Fundamentos do uso de Partículas Magnéticas para Visualização de Linhas de indução	53
3.4 – Projeto e Construção do Eletroímã	58
 CAPÍTULO IV	 62
VISUALIZAÇÃO DAS LINHAS DE INDUÇÃO EM 2D	62
4.1 – Fabricação das Primeiras Ponteiras para Gerar Diferentes Linhas de indução	62
4.2 – Primeira Tentativa de Visualização de Linhas de indução em 2D	65
4.3 – Segunda Tentativa de Visualização de Linhas de indução em 2D	66
4.3.1 – Novo projeto de ponteira	66
4.3.2 – Novo material das partículas magnéticas para visualização das linhas de indução	68
4.3.3 – Novo projeto do plano de visualização	68
4.3.4 – Novo procedimento de depósito das partículas magnéticas sobre o plano de visualização	69
4.3.5 – Aplicação do novo sistema de visualização das linhas em 2D	70

4.4 – Conclusões Parciais	77
CAPÍTULO V	78
VISUALIZAÇÃO DAS LINHAS DE INDUÇÃO EM 3D	78
5.1 – Primeira Tentativa de Visualização das Linhas de Indução em 3D	78
5.2 – Segunda Tentativa para Visualização das Linhas de Indução em 3D	83
5.2.1 – Projeto, Fabricação e Montagem do Recipiente Volumétrico (“aquário”).....	83
5.2.2 – Primeira avaliação do sistema usando Agar Agar como meio de fixação da partícula de ferro.....	86
5.3 – Terceira Tentativa para Visualização das Linhas de indução em 3D.....	87
5.4 – Quarta Tentativa para Visualização das Linhas de Indução em 3D	89
5.5 – Visualização do Efeito da Geometria das Ponteiras em 3D Utilizando a Técnica Álcool Gel – Partículas Magnetizáveis em Forma de Pequenos Cilindros.....	91
5.6 - Técnica de Deposição Sobre as Faces das Ponteiras - Visualização Complementar das Linhas de indução em 3D.....	96
5.7 – Conclusões Parciais	100
CAPÍTULO VI	102
MAPEAMENTO DA INTENSIDADE DO CAMPO MAGNÉTICO ENTRE AS PONTEIRAS	102
6.1 – Equipamentos e Bancada	102
6.2 – Metodologia para quantificação do campo magnético.....	104
6.3 – Metodologia para Tratamento dos Dados	105
6.4 - Resultado e Discussão da Quantificação do Campo Magnético com a Utilização do Teslâmetro.....	108
6.5 – Discussão Geral das Superfícies de Respostas.....	116

CAPÍTULO VII	118
INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DAS PONTEIRAS NA DEFLEXÃO DE UM ARCO DE SOLDAGEM TIG	118
7.1 – Deflexão do Arco Estacionário Sobre Alumínio	118
7.1.1 – Equipamento e bancada	118
7.1.2 – Análise e resultado do efeito do tipo de ponteira sobre a deflexão do arco estacionário em soldagem de alumínio	122
7.2 – Deslocamento de Cordão sob o Efeito da Deflexão Magnética do Arco em Aço ao Carbono (arco não estacionário)	125
7.2.1 – Equipamentos e parâmetros	125
7.2.2 - Análise e resultados do efeito do tipo de ponteira sobre o deslocamento do cordão em soldagens sobre aço carbono (arco não estacionário)	126
7.3 – Discussão e Análise Comparativa dos Resultados dos Ensaios com Arco Estacionário e não Estacionário	130
7.3.1 – Comparação dos resultados	130
CAPÍTULO VIII	136
DISCUSSÃO GERAL	136
8.1 – Relacionando os Resultados da Visualização 2D com 3D	136
8.2 – Análise da Superfície de Resposta da Intensidade do Campo Magnético	138
8.3 - Comportamento Esperado para o Deslocamento do Cordão em Função da Deflexão do Arco	141
8.4 – Comportamento Esperado para a Soldagem da Junta Sobreposta em Função da Deflexão do Arco e Deslocamento do Cordão	143
CAPÍTULO IX	145
CONCLUSÃO	145
CAPÍTULO X	147
PROPOSTAS PARA TRABALHO FUTUROS	147
CAPÍTULO XI	149
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	149

ANEXO I	152
DADOS DIMENSIONAIS DAS PONTEIRAS	152
I - Ponteira de geometria Plana	152
II - Ponteira de geometria Torre	153
III - Ponteira de geometria Cunha Vertical	154
IV - Ponteira de geometria Cunha Horizontal	155
V - Ponteira de geometria Cônica	156
 ANEXO II	 157
ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO AGAR AGAR TYPE I	157
 ANEXO III	 159
LINHAS DE COMANDO DO MATLAB DESENVOLVIDA POR MOTA, C. P (2010)	159

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 -	As cargas positivas e negativas possuem uma determinada velocidade dentro do arco de soldagem ($v^- \gg v^+$) (SCOTTI; PONOMAREV, 2008)	36
Figura 2.2 -	Força sofrida por uma carga eletrizada positivamente, com velocidade v ao passar por um campo magnético B (ENCYDIA BETA, 2010)	37
Figura 2.3 -	Trajectoria da partícula eletrizada positivamente, com uma determinada velocidade, dentro de um Campo, submetida a uma Força Magnética, (MUNDIN, 2000)	37
Figura 2.4 -	Definição da regra da mão esquerda, para determinar o sentido da Força Magnética (InfoEscola, 2011)	38
Figura 2.5 -	Modelo patenteado por Greene (1960) para oscilar o arco voltaico ..	39
Figura 2.6 -	Eletroímã desenvolvido por Marques (1984) para defletir o arco de soldagem.....	40
Figura 2.7 -	Equipamento construído por Kang e Na (2003) para oscilação do arco em juntas estreitas (narrow groov)	40
Figura 2.8 -	Equipamentos atuais para oscilações de arco de soldagem (HANGIL, 2009)	41
Figura 2.9 -	(a) coluna de arco sem deflexão; (b) coluna de arco defletido por um campo magnético constante (KANG e NA, 2002)	42
Figura 2.10 -	Resultados experimentais e calculados para avaliação de efeitos sobre a magnitude da deflexão magnética: (a) influência da corrente; (b) efeito do comprimento de arco (KANG, 2002).....	42
Figura 2.11 -	Trinca de solidificação intergranular em alumínio 7075 (Kou e Kanevsky, 1980 apud Kou, 2003).....	43
Figura 2.12 -	Alinhamento dos contornos de grão na região central do cordão. (ARATA et al., 1973).....	44
Figura 2.13 -	Alguns exemplos de trajetórias que pode-se fazer com a técnica de tecimento	44
Figura 2.14 -	Estrutura dos grãos com oscilação do arco em alumínio: (a) arco oscilando transversalmente ao sentido da soldagem; (b) oscilação circular do arco (KOU e LE 1985, apud Kou 2003)	45
Figura 2.15 -	Representação do movimento da tocha fazendo Swith Back na soldagem.....	46
Figura 2.16 -	Cordão de solda desenvolvido por Kaneko (2007) utilizando MIG pulsado juntamente com a técnica Swith Back, com 12 mm de avanço e 7 mm de recuo: (a) Face do cordão; (b) Raiz do cordão.....	46

Figura 2.17 -	Combinação da técnica de tecimento e Switch Back, com raiz de 4 mm sem utilização de cobre-junta (YAMANE et al., 2007).....	47
Figura 2.18 -	O metal depositado na lateral da junta, diminuído a abertura de raiz (YAMANE et al., 2007).....	47
Figura 2.19 -	Distribuição do cordão dentro da junta (YAMANE et al., 2007).....	48
Figura 2.20 -	Visualização do cordão no lado oposto da chapa (back bead) (YAMANE et al., 2007).....	48
Figura 2.21 -	Tipos de eletroímãs para deflexão do arco encontrado no mercado (AP AUTOMATION, 2011)	49
Figura 2.22 -	Aplicação da oscilação magnética do arco para garantir boas qualidades de solda dentro de juntas estreitas (narrow groov) (KANG; NA, 2003)	50
Figura 2.23 -	Imagem do arco oscilando dentro do chanfro estreito (Narrow Groove) demonstrado no trabalho de Kang e Na (2003).....	51
Figura 3.1 -	Representação da orientação da bússola com o campo magnético do ímã (a parte clara da agulha representa a polaridade sul, que busca a polaridade norte do ímã).....	54
Figura 3.2 -	Comportamento dos domínios magnéticos em materiais ferromagnéticos: (a) agulha não-imantada, com desordem nos domínios magnéticos; (b) agulha imantada, com ordem nas orientações dos domínios magnéticos formando pólos definidos....	55
Figura 3.3 -	Orientação de sete agulhas em um campo magnético demonstrando uma linha de força.....	56
Figura 3.4 -	Visualização das linhas de indução geradas por um ímã, com utilização de limalhas de ferro (WIKIPÉDIA, 2011)	57
Figura 3.5 -	Campo Magnético Uniforme produzido por um ímã em forma de “U”	58
Figura 3.6 -	Proposta de construção de geometrias de ponteiros para gerarem diferentes distribuições de linhas de indução	59
Figura 3.7 -	Geometria e dimensões da Ponteira Calota, com detalhamento da junta de acoplamento.....	60
Figura 3.8 -	Fonte de alimentação, bobina e núcleo, formando o eletroímã utilizado para geração de linhas de indução	60
Figura 3.9 -	Ilustração da orientação do campo magnético gerado por duas bobinas ligadas em série (REIS, 2009).....	61
Figura 3.10 -	Diagrama elétrico de ligação do eletroímã formado por duas bobinas (REIS, 2009).....	61
Figura 4.1 -	Exemplo de ponteiros fabricadas a partir de lâminas de núcleo de transformador soldadas entre si e usinadas para dar a forma: (a) Cunha, fresada; (b) Cônica limada; (c) Torre, fresada e serrada	63

Figura 4.2 -	Suporte para o acoplamento de diferentes ponteiros no eletroímã...	64
Figura 4.3 -	Exemplo de acoplamento da ponteira no núcleo do eletroímã	64
Figura 4.4 -	Esquema de montagem experimental para primeira tentativa de visualização de Linhas de indução 2D	66
Figura 4.5 -	Resultado da primeira tentativa da visualização 2D, onde: a) geometria plana; b) geometria cunha; c) geometria calota	66
Figura 4.6 -	Ponteiras fabricadas para criar diferentes linhas de indução magnéticas.....	67
Figura 4.7 -	Demonstração da junta de acoplamento entre o núcleo e a ponteira	67
Figura 4.8 -	(a) plano construído de cartolina, com evidência das ondulações do plano; (b) plano construído de cartolina sobre papelão, reduzindo ondulação da superfície.....	68
Figura 4.9 -	Escoamento contínuo do pó de ferro entre somente alguns furos de um saleiro, dificultando a distribuição homogenia.....	69
Figura 4.10 -	Remodelagem do saleiro pelo uso de filme PVC, com furos de diâmetros de 0,5 mm	69
Figura 4.11 -	Deposição homogenia de pó de ferro sobre a superfície, utilizando a técnica do chuveiramento.....	70
Figura 4.12 -	Visualização 2D das linhas de indução geradas pela ponteira Plana	71
Figura 4.13 -	Visualização 2D das linhas de indução geradas pela ponteira Cunha Vertical	72
Figura 4.14 -	Visualização 2D das linhas de indução geradas pela ponteira Cunha Horizontal	73
Figura 4.15 -	Visualização 2D das linhas de indução geradas pela ponteira Calota	74
Figura 4.16 -	Visualização 2D das linhas de indução geradas pela ponteira Torre	75
Figura 4.17 -	Visualização 2D das linhas de indução geradas pela ponteira Cônica	76
Figura 5.1 -	Recipiente volumétrico construído a partir de um copo de vidro, com detalhe para o corte para encaixe do eletroímã e da fita de proteção	79
Figura 5.2 -	Gelatina Agar Agar, Type I para fixação das limalhas de ferro no espaço volumétrico	80
Figura 5.3 -	Opacidade e rigidez em diferentes concentrações de Agar Agar em água.....	80
Figura 5.4 -	Gelatina Agar Agar sem visualização das limalhas	81
Figura 5.5 -	Resultado obtido com a primeira tentativa de visualização 3D, utilizando gelatina a base de Agar Agar e cavacos de aço	82
Figura 5.6 -	Visualização da montagem do recipiente com eletroímã	83

Figura 5.7 -	Dimensões do Aquário.....	84
Figura 5.8 -	O “Aquário” para visualização em 3D das linhas de indução	84
Figura 5.9 -	Posição do eletroímã dentro do aquário, detalhe na região de selamento com silicone	85
Figura 5.10 -	Distribuição do pó de ferro na terceira tentativa de visualização das linhas de indução em 3D (de “a” até “i” foi girada 360° de forma não equidistante)	88
Figura 5.11 -	Exemplo de uma força resultante provocando deslocamento da partícula até o eletroímã	89
Figura 5.12 -	Visualização das partículas magnetizáveis suspensas em álcool em gel: a) eletroímã desligado; b) eletroímã ligado	91
Figura 5.13 -	Visualização em 3D das linhas de indução geradas pela ponteira Plana: de (a) até (i) se apresenta a vista por diferentes ângulos, durante um giro de 360°	92
Figura 5.14 -	Visualização em 3D das linhas de indução geradas pela ponteira Cunha: de (a) até (i) se apresenta a vista por diferentes ângulos, durante um giro de 360°	93
Figura 5.15 -	Visualização em 3D das linhas de indução geradas pela ponteira Calota: de (a) até (i) se apresenta a vista por diferentes ângulos, durante um giro de 360°	94
Figura 5.16 -	Visualização 3D das linhas de indução geradas pela ponteira Torre	95
Figura 5.17 -	Visualização em 3D das linhas de indução geradas pela ponteira Cônica: de (a) até (i) se apresenta a vista por diferentes ângulos, durante um giro de 360°	96
Figura 5.18 -	Montagem da técnica de deposição sobre a face das ponteiras: A - ponteira; B – Núcleo; C – Bobina; D – Plataforma de anteparo....	97
Figura 5.19 -	Aplicação da técnica de deposição sobre a face na ponteira Torre ..	98
Figura 5.20 -	Aplicação da técnica de deposição sobre a face na ponteira Plana..	98
Figura 5.21 -	Aplicação da técnica de deposição sobre a face na ponteira Cunha: A – aresta superior; B – quinas	99
Figura 5.22 -	Aplicação da técnica de deposição sobre a face na ponteira Calota	99
Figura 5.23 -	Aplicação da técnica de deposição sobre a face na ponteira Cônica	100
Figura 5.24 -	Perfil das linhas de indução num plano transversal entre as duas ponteiras Cônicas.....	101
Figura 5.25 -	Perfil das linhas de indução num plano transversal entre diferentes as ponteiras	101
Figura 6.1 -	Equipamento para medição do campo magnético: A) Teslâmetro; B) Sonda de efeito Hall.(PHYWE, 2011)	103

Figura 6.2 -	Bancada para medição do campo magnético: a – Teslâmetro; b – Braço da mesa de coordenadas; c – sonda hall; d – ponteiras 103
Figura 6.3 -	Planos de medição paralelos às ponteiras com três níveis de alturas 104
Figura 6.4 -	Superfície de resposta típica do campo magnético no plano A, B e C, detalhando a posição das ponteiras 106
Figura 6.5 -	Intensidade do campo magnético em forma de linhas topográficas nos planos A, B e C 107
Figura 6.6 -	Curva parabólica mostrando a distribuição da escala de cores 107
Figura 6.7 -	Superfície de resposta e linhas topográficas da intensidade do campo magnético resultante da aplicação da geometria Plana..... 108
Figura 6.8 -	Superfície de resposta e linhas topográficas da intensidade do campo magnético resultante da aplicação da geometria Calota 109
Figura 6.9 -	Superfície de resposta e linhas topográficas da intensidade do campo magnético resultante da aplicação da geometria Cônica 110
Figura 6.10 -	Superfície de resposta e linhas topográficas da intensidade do campo magnético resultante da aplicação da geometria Cunha Horizontal 112
Figura 6.11 -	Superfície de resposta e linhas topográficas da intensidade do campo magnético resultante da aplicação da geometria Cunha Vertical 114
Figura 6.12 -	Superfície de resposta e linhas topográficas da intensidade do campo magnético resultante da aplicação da geometria Torre 115
Figura 7.1 -	Bancada para deflexão do arco estacionário: a) tocha TIG; b) filmadora CCD; c) bobina do eletroímã; d) ponteira do eletroímã; e) suporte do metal de base a ser soldado de alumínio; f) fonte tensão contínua ajustável; g) Teslâmetro 119
Figura 7.2 -	Fonte de soldagem (IMC INVERSAL 300) utilizada para gerar o arco TIG 120
Figura 7.3 -	Suporte de alumínio mantendo o metal de base na altura 7,5 mm da ponta do eletrodo TIG até a peça 121
Figura 7.4 -	Arco defletido com linhas de referência para escalonar a imagem e para alinhar os catetos do triângulo de Kang e Na para obtenção do valor de δ 122
Figura 7.5 -	Deflexão δ em milímetros do arco de soldagem em regime estacionário 124
Figura 7.7 -	Posicionamento das ponteiras em relação a tocha e destaque no sentido do deslocamento da placa teste 126

Figura 7.8 -	Desvio no cordão de solda produzido pela deflexão magnética com as diferentes ponteiros	127
Figura 7.9 -	Ilustração do procedimento para medição do deslocamento do cordão por meio de duas linhas de centro	127
Figura 7.10 -	Deslocamento em milímetros do cordão de solda pela deflexão magnética (arco não estacionário).....	128
Figura 7.11 -	Percentual de variação da largura do cordão quando aplicado o campo magnético	129
Figura 7.12 -	Comparação dos resultados normalizados da deflexão do arco estacionário (δ) e o deslocamento do cordão (não estacionário)....	130
Figura 7.13 -	Posição da tocha em relação a junta sobreposta e dimensão das barras de aço.	132
Figura 7.14 -	Penetração linear em milímetros do cordão de solda na junta sobreposta.	134

LISTA DE TABELAS

Tabela 7.1 -	Visualização e qualificação das deflexões do arco estacionário.	123
Tabela 7.2 -	Deslocamento sofrido pelo cordão de solda sob efeito da deflexão magnética.	127
Tabela 7.3 -	Dados da média escalar e desvio padrão das larguras dos cordões com e sem deflexão.	129
Tabela 7.4 -	Vista de cima dos cordões realizados em juntas sobrepostas e corte transversal com indicação da penetração.....	132
Tabela 7.5 -	Penetração linear e concavidade da superfície do cordão de solda.....	134
Tabela 8.1 -	Comparação das visualizações em 2D e 3D	137
Tabela 8.2 -	Comparação dos resultados das visualizações 2D e das superfícies de respostas da intensidade do campo magnético.	139
Tabela 8.3 -	Resultados e Comportamento esperado para cada ponteira.	142
Tabela 8.4 -	Comportamento esperado e correlacionado com o comportamento real do arco na soldagem de uma junta sobreposta Erro! Indicador não definido.	

LISTA DE SÍMBOLOS

$\vec{B}$	Campo Magnético
$\vec{v}$	Velocidade da partícula
Θ	Ângulo
$\vec{F}_m$	Força Magnética
δ	Desvio do arco de soldagem
q^+	Carga elétrica positiva
q^-	Carga elétrica negativa
$ q $	Modulo da carga elétrica
dp/dz	Gradiente de pressão
η	Resistividade do Plasma
CC	Corrente contínua

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

De acordo com Messler (1999), foram encontrados vestígios de soldagens por forjamento em determinados objetos antigos, alguns com mais de 3000 anos. Segundo esse autor, em meados do século XIX, ocorreu um grande avanço na soldagem, quando Miossan, em 1881, desenvolveu o uso de arco a carbono para fusão dos metais, viabilizando o procedimento de junção desses materiais e permitindo aplicar a soldagem como um processo de produção. Essa nova técnica possibilitou um avanço no processo de construção, manutenção e restauração de peças. Mas o grande salto no desenvolvimento de novas tecnologias na área de soldagem ocorreu durante a Segunda Guerra Mundial, onde a soldagem foi muito utilizada nos processos de fabricação. Essa corrida incentivou a criação de novos processos e novas técnicas de soldagem, sempre visando melhorias na fabricação.

Hoje em dia, com a transformação na economia mundial, houve uma maior integração econômica, o que fez reduzir custos dos meios de transporte e comunicação facilitando a importação e exportação entre países. A consequência da maior competitividade global fez o mercado econômico ficar cada vez mais exigente, obrigando as indústrias a aperfeiçoarem seus processos constantemente. Essa disputa por produtos melhores e mais baratos é o que está alavancando e incentivando novas tecnologias; e a soldagem não fica de fora. Os processos e técnicas de soldagem estão sempre se aperfeiçoando, em busca de alta qualidade com baixo custo, fatores essenciais para que empresas tenham produtos mais competitivos.

Diante dessa perspectiva, técnicas de oscilação do arco foram desenvolvidas, criando diferentes trajetórias do arco sobre a junta a ser soldada. Técnicas como tecimento transversal e “switch back” são exemplos de oscilações de arco que visam melhorar a qualidade de uma solda, aumentando a produtividade, possibilitando as confecção de

revestimentos mais largos, permitindo o controle da raiz da solda em juntas de topo sem utilização de cobre-junta, melhorando a aparência do cordão, dentre outros diferenciais.

Existem dois tipos de oscilação de arco, a oscilação mecânica e a oscilação magnética. Oscilação mecânica consiste no movimento da tocha por meio de um sistema mecânico. Mas os mecanismos limitam a frequência em aproximadamente 10 Hz, por causa da inércia do sistema mecânico. Por outro lado, como citado por Kang e Na (2002), a oscilação magnética pode ser aplicada em altas velocidades, podendo oscilar o arco em até 200 Hz.

A oscilação do arco de soldagem já vem sendo utilizada comercialmente e podem ser encontrados equipamentos para este fim em empresas especializadas em automação em soldagem, como, por exemplo, HANGIL INDUSTRY (www.autowelding.com) e AP AUTOMATION (www.ap-automation.com). Apesar das empresas comerciais não revelarem se fazem estudos em relação à geometria da extremidade do eletroímã, ao observar os tipos de extremidades de seus osciladores, percebe-se que não existe um padrão geométrico para o formato da ponta dos núcleos dos eletroímãs.

Em literaturas científicas, encontram-se vários trabalhos a respeito da deflexão magnética, como, por exemplo, Kang e Na (2002), Sivaprasad e Raman (2007), Zhang e Zou (2010), dentre outros. Esses trabalhos mostram aplicabilidades, simulações e propriedades importantes para a soldagem com utilização da deflexão magnética. Porém, também se verifica não existir padronizações de osciladores magnéticos, pois cada autor utiliza eletroímãs extremidades de núcleos diferentes, cada um com características específicas para seus experimentos. Desse modo, não foi encontrado um estudo mostrando detalhes da relação das geometrias dos núcleos na deflexão do arco de soldagem.

Assim, a idéia deste trabalho é buscar melhoria nos sistemas de oscilação do arco ao procurar entender a influência exercida pelas configurações das linhas de indução geradas pelas extremidades dos eletroímãs sobre o arco de soldagem, propondo gerar uma deflexão com mais eficiência.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 – O Arco Voltaico

Um arco voltaico acontece na região entre o metal de base e a ponta do eletrodo de soldagem. Nessa região, ocorre passagem de altos valores de corrente por meio de um gás ionizado (plasma). Essa região recebe o nome de arco voltaico, e parte da energia embutida nessa quantidade de corrente é convertida em outras formas de energia, como calor, luz e som. Grande parte do calor gerado pelo plasma é transmitido de forma direta e localizada para o metal de base, sendo capaz de fundir o material, promovendo a soldagem.

Uma das características dos gases é de não serem condutores de eletricidade em condições normais. Mas se um gás estiver em uma região de baixa pressão, alta temperatura ou sob um alto potencial elétrico, o mesmo pode se ionizar. Quando essa ionização acontece, os seus átomos adotam características distintas. Para um gás se ionizar e passar a conduzir eletricidade (carga elétrica), seus átomos têm que liberar ou receber elétrons. Quando liberam elétrons, geram íons com carga positiva, denominados cátions, e quando ganham elétrons, geram íons com carga negativa, denominados ânions. Segundo Kang (2002) e Scotti e Ponomarev (2008), o arco de soldagem como um todo pode ser considerado de carga neutra.

Para manutenção do arco de soldagem é preciso existir uma DDP (diferença de potencial) entre o eletrodo de soldagem e o metal de base. Assim, as cargas elétricas (ânions e cátions) são transportados de uma região à outra pelo plasma. Assim sendo, estes átomos carregados (íons) se movimentam entre o eletrodo e a chapa com certa velocidade, em busca do equilíbrio elétrico (que não é alcançado devido a DDP). A Figura 2.1 ilustra esse processo, onde a chapa está carregada negativamente, os elétrons saem da chapa em busca da carga positiva do eletrodo e os anions (cargas positivas) saem do eletrodo e vão

em busca da carga negativa da chapa. Entretanto, Scotti e Ponomarev (2008) acreditam que a movimentação de cargas se dá primordialmente por elétrons. Essas partículas carregadas eletricamente atravessam a distância do eletrodo até a chapa em alta velocidade, em um único sentido.

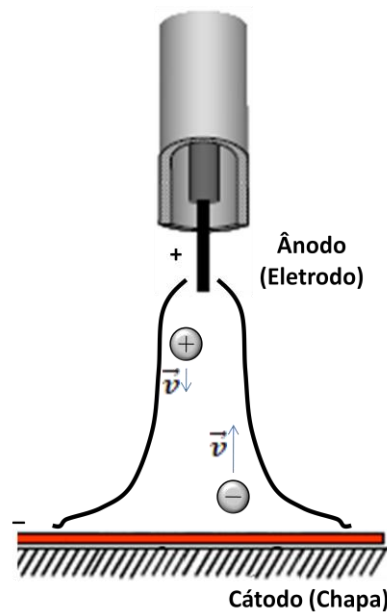


Figura 2.1 - As cargas positivas e negativas possuem uma determinada velocidade dentro do arco de soldagem ($\vec{v}_- \gg \vec{v}_+$) (SCOTTI; PONOMAREV, 2008)

2.2 – Força Magnética

Como mostrado na Figura 2.2, e também descrito em várias fontes, como por exemplo, em Biscuola e Maiali (1996), uma partícula eletrizada com carga q que possuir uma velocidade $\vec{v}$ com um ângulo θ em relação a um referencial onde exista um campo magnético imposto $\vec{B}$, ficará submetida a uma força magnética $\vec{F}_m$, que atinge valor máximo quando o campo estiver atuando ortogonalmente à $\vec{v}$. A Figura 2.3 representa a trajetória circular de uma partícula carregada positivamente, quando submetida ao campo magnético.

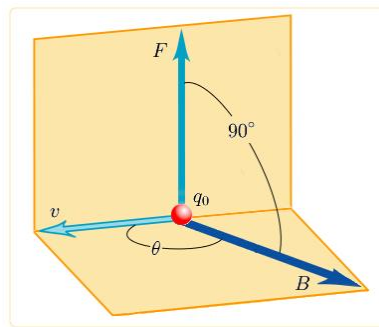


Figura 2.2 - Força sofrida por uma carga eletrizada positivamente, com velocidade $\vec{v}$ ao passar por um campo magnético $\vec{B}$ (ENCYDIA BETA, 2010)

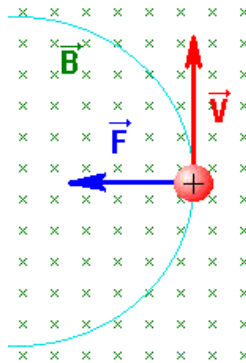


Figura 2.3 - Trajetória da partícula eletrizada positivamente, com uma determinada velocidade, dentro de um Campo, submetida a uma Força Magnética, (MUNDIN, 2000)

As características dessa força foram descritas pelo físico Holandês Hendrick Antoon Lorentz (1853-1920), na forma da eq. 2.1

$$F_m = |q|.v.B.\text{sen}\theta \quad (2.1)$$

A eq. 2.1 demonstra que o campo magnético não atua em partículas em repouso ou eletricamente neutras. Já para valores de θ iguais a 0° (zero) ou 180° (trajetórias paralelas ao campo), têm-se $\sin \theta = 0$, significando que a força magnética é nula em trajetórias paralelas ao campo. Já para valores de θ iguais a 90° ou 270° (trajetórias perpendiculares ao campo), têm-se $\sin \theta = 1$, e o módulo da força atinge o valor máximo.

Considerando $\sin \theta = 1$, é possível apresentar uma interpretação da unidade tesla (T) do campo magnético, a saber:

B é igual a 1 T se uma carga hipotética de 1 C (coulomb), movendo-se perpendicularmente ao campo, com velocidade de 1m/s, ficar submetida a uma força de 1N.

$$\begin{array}{ccccccc} F_m & = & |q| & \cdot & v & \cdot & B \\ | & & | & & | & & | \\ 1N & = & 1C & \cdot & 1m/s & \cdot & 1T \end{array}$$

É importante observar que $\vec{F}_m$ é sempre perpendicular a $\vec{v}$. Sendo assim, a $\vec{F}_m$ exerce um papel de força centrípeta, Figura 2.3, não realizando trabalho, ou seja, não modifica a energia cinética da partícula, nem altera o valor de sua velocidade. $\vec{F}_m$ somente muda a direção da velocidade.

Uma maneira de ilustrar o sentido da força magnética é usando a regra da mão esquerda, Figura 2.4. Para usar essa regra, considera-se uma carga q positiva. Se o dedo médio apontar para o sentido da velocidade da carga q^+ e o indicador apontar para o sentido do campo $\vec{B}$, a força $\vec{F}_m$ ficará no sentido do dedo polegar. É importante ressaltar que esta regra foi desenvolvida tendo os elétrons como cargas, que inverte o sentido da força, mas na época o sentido da velocidade da carga era considerado como o sentido convencional da corrente, ou seja da carga positiva para a negativa.

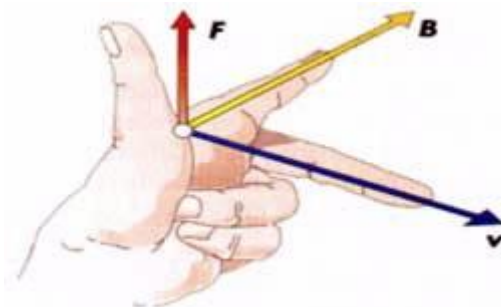


Figura 2.4 - Definição da regra da mão esquerda, para determinar o sentido da Força Magnética (InfoEscola, 2011)

2.3 – Deflexão Magnética do Arco Voltaico

Ao observar o movimento das cargas elétricas dentro de um arco, o pesquisador Greene (1960) propôs uma maneira de impor um campo magnético no arco para gerar uma força magnética capaz de alterar a trajetória linear do jato de plasma (deflexão do arco voltaico).

O mesmo autor desenvolveu um dispositivo para impor campo magnético no arco de soldagem. Seu equipamento (Figura 2.5) foi patenteado e consistia de duas bobinas em torno de dois núcleos ferrosos, inclinados 45° em relação ao eixo da tocha. Os eletroímãs eram ligados de maneira que as duas extremidades gerassem polaridades opostas, conseguindo fazer as linhas de indução alcançarem uma orientação, saindo de um núcleo do eletroímã, polarizado como Norte, e indo para o outro núcleo, polarizado como Sul. Os eletroímãs ficam ligados a uma fonte de energia de corrente variável, que era responsável em regular a frequência e a intensidade da corrente aplicadas à bobina. Com a alternância na polarização das extremidades do núcleo do eletroímã era possível controlar a velocidade de oscilação e ângulo de inclinação do arco voltaico. Na prática, esse dispositivo é ainda hoje usado para realizar soldagem com oscilação de arco.

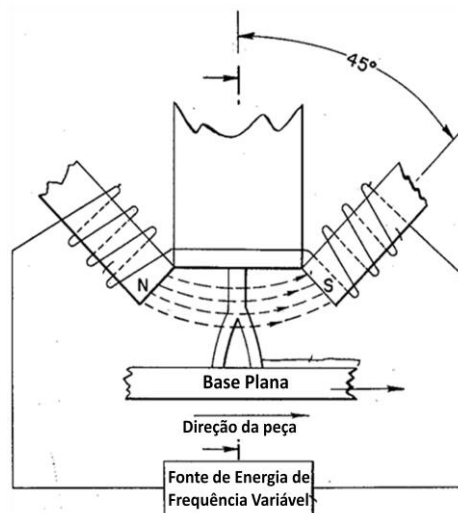


Figura 2.5 - Modelo patenteado por Greene (1960) para oscilar o arco voltaico

Depois de Greene, outros pesquisadores continuaram a propor novas idéias para defletir o arco de soldagem por meio de campo magnético. Por exemplo, Marques (1984) desenvolveu um modelo que utilizava somente uma bobina para o eletroímã e seus núcleos foram orientados de maneira a gerar um campo magnético uniforme e perpendicular ao

caminho do arco voltaico até a peça, como mostrado na Figura 2.6. Esta bobina é ligada em uma fonte de energia de frequência variável, que controla a frequência e intensidade da oscilação do arco.

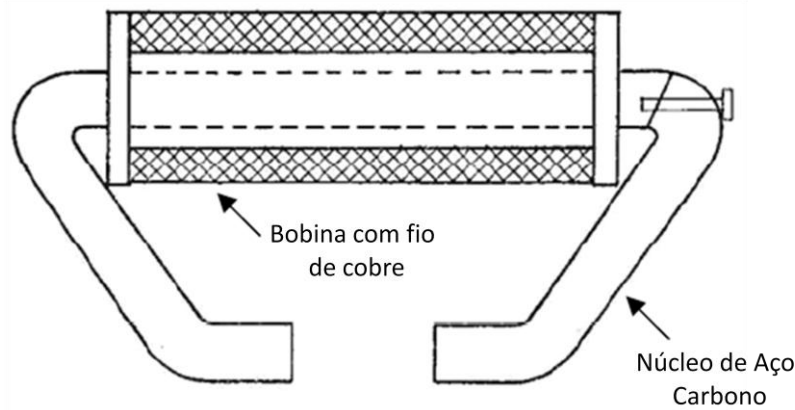


Figura 2.6 - Eletroímã desenvolvido por Marques (1984) para defletir o arco de soldagem

Outros pesquisadores que desenvolveram um eletroímã para defletir o arco foram Kang e Na (2003). Eles colocaram as extremidades do eletroímã de forma não perpendicular ao caminho do arco (Figura 2.7), para garantir máxima intensidade de fluxo magnético na área a ser soldada.

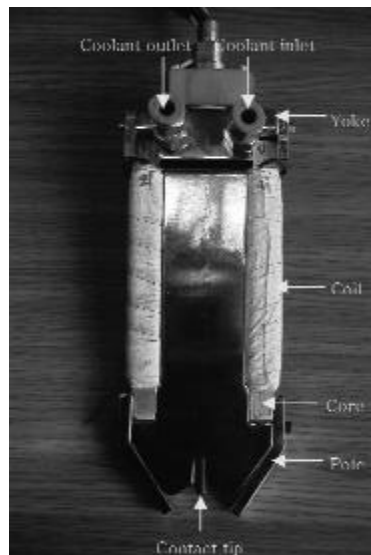


Figura 2.7 - Equipamento construído por Kang e Na (2003) para oscilação do arco em juntas estreitas (narrow groove)

Existem até mesmo equipamentos comerciais para defletir o arco magneticamente e fontes de correntes alternadas para controlar o modo de oscilação do arco, como mostrado

na Figura 2.8. Mas isso, não significa que a técnica seja totalmente dominada, pois vários pesquisadores ainda estudam o comportamento do arco dentro do campo.



Figura 2.8 - Equipamentos atuais para oscilações de arco de soldagem (HANGIL, 2009)

No trabalho de Kang e Na (2002) é apresentada uma modelagem matemática da deflexão magnética do arco. Partindo-se do princípio de que o arco é eletricamente neutro (exceto quando muito próximos dos eletrodos) e que no plasma fortemente ionizado ocorrem colisões predominantemente entre íons, Kang demonstra que a amplitude da deflexão do arco δ sob um campo magnético B_x (somente na direção de x), campo elétrico E_z , gradiente de pressão dp/dz e resistividade do plasma η , é dada pela equação 2.3.

$$\delta = \frac{u_y}{u_z} = \frac{E_z - \frac{1}{2nq} \frac{dp}{dz}}{-\eta \frac{dp}{dz}} \cdot B_x \cdot z \quad (2.3)$$

onde nq é o número de cargas elétricas e u_y e u_z são as velocidades dos íons na direção y e z, respectivamente. Kang e Na (2002) ainda compararam os resultados da equação medindo experimentalmente a amplitude da deflexão do arco voltaico, como mostrado na Figura 2.9. Esta figura mostra à esquerda a imagem do arco sem campo magnético e na direita a deflexão do arco quando submetido a um campo magnético constante de aproximadamente 3 mT (mili Tesla). É possível observar por essas figuras que para quantificar a amplitude, Kang e Na montaram um triângulo retângulo sendo um de seus catetos a metade da base do arco e o outro a altura do arco.

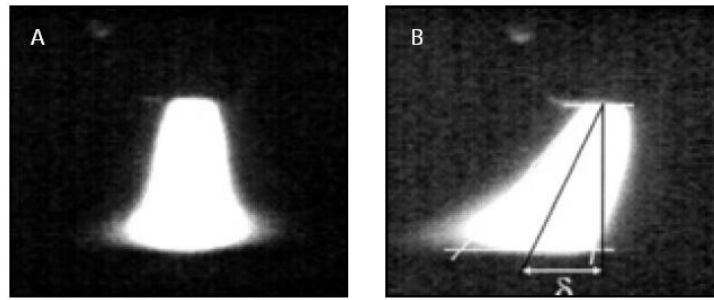


Figura 2.9 - (a) coluna de arco sem deflexão; (b) coluna de arco defletido por um campo magnético constante (KANG e NA, 2002)

Kang e Na (2002) demonstraram nesse trabalho dois resultados comparativos, os quais são mostrados nas Figura 2.10 (a) e (b). Foram estudados o efeito da corrente em três níveis (100, 200 e 300 A) e do comprimento de arco (5, 7,5, 10 mm) sobre a deflexão do arco.

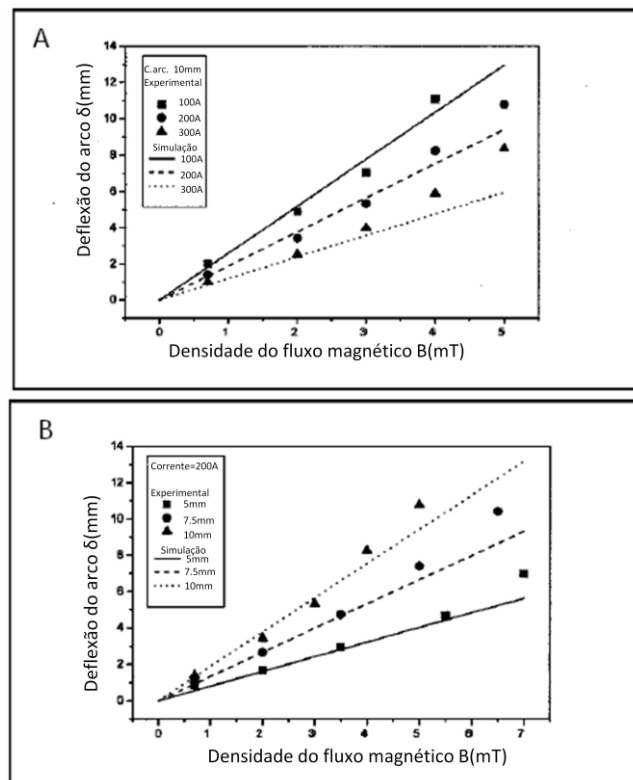


Figura 2.10 - Resultados experimentais e calculados para avaliação de efeitos sobre a magnitude da deflexão magnética: (a) influência da corrente; (b) efeito do comprimento de arco (KANG, 2002)

A Figura 2.10 revela que o aumento da corrente de soldagem faz a deflexão δ do arco diminuir, mas esta deflexão aumenta com acréscimo no comprimento do arco. Esse fenômeno ocorre porque o aumento do comprimento do arco e a diminuição da corrente

provocam uma redução na rigidez do arco. Os resultados calculados revelam um comportamento linear, enquanto os experimentais mostraram um comportamento não linear. A razão para esta divergência, segundo os autores, é que o modelo proposto considera um deslocamento linear da linha central do triângulo proposto na Figura 2.10(b). Assim, o modelo matemático demonstra o comportamento da deflexão muito bem para pequenos valores de fluxo magnético, mas não consegue obter grandes precisões para valores mais elevados do fluxo.

2.4 – Importância da Oscilação do Arco

Tecimento é a denominação da técnica de oscilação do arco no sentido transversal ao sentido da soldagem. Oscilar o arco de soldagem, mecanicamente ou magneticamente promove uma série de melhorias no cordão.

Kou (2003) relata que esta oscilação causa uma agitação mecânica na poça, promovendo uma certa desordem no sentido de crescimento dos grão, dificultando o aparecimento de trincas do tipo intergranulares. A Figura 2.11, mostra uma trincas intergranulares que poderia ter sido evitado com a oscilação do arco.

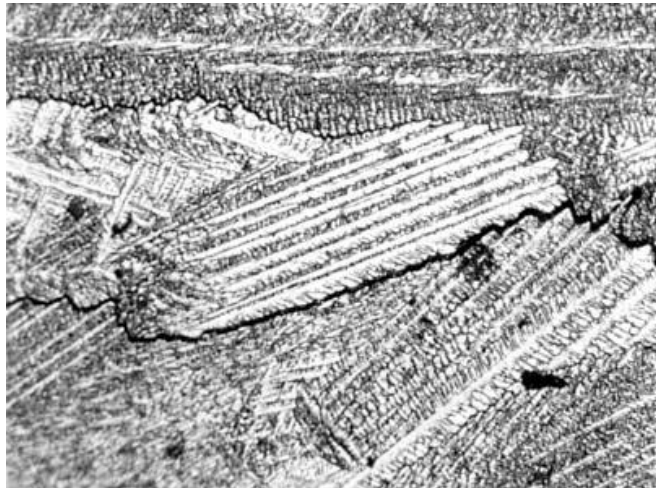


Figura 2.11 - Trinca de solidificação intergranular em alumínio 7075 (Kou e Kanevsky, 1980 apud Kou, 2003)

Arata et al (1973 apud Kou, 2003), realizaram uma solda em alumínio com o processo TIG a uma velocidade de soldagem de 250 mm/min, demonstrando que na solidificação os grãos crescem para o centro do cordão, fazendo uma curva no sentido da soldagem. Como consequência, ocorre um alinhamento dos contornos de grãos no centro do cordão, facilitando a propagação da trinca intergranulares, como mostra na Figura 2.12.

Uma das maneiras de solucionar esse problema é com a técnica de tecimento do arco, pois consegue-se manipular a orientação dos crescimentos dos grãos durante a solidificação. Existem vários tipos de trajetórias que se pode fazer (Figura 2.13) e cada uma delas promove uma orientação dos grãos diferentes. Por exemplo, pela Figura 2.14, Kou e Le (1985, apud Kou, 2003) mostram os resultados das estruturas granulares do alumínio quando aplica uma oscilação de arco de 1 Hz.

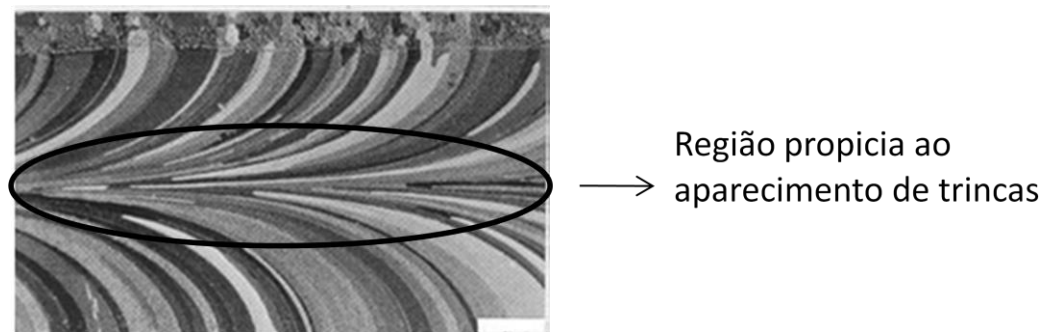


Figura 2.12 - Alinhamento dos contornos de grão na região central do cordão. (ARATA et al., 1973)

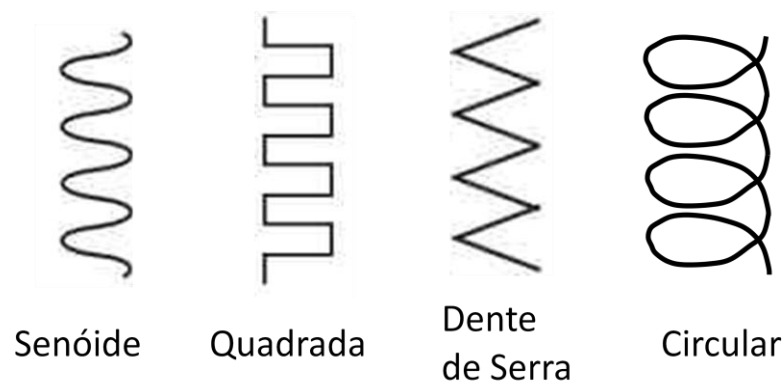


Figura 2.13 - Alguns exemplos de trajetórias que pode-se fazer com a técnica de tecimento

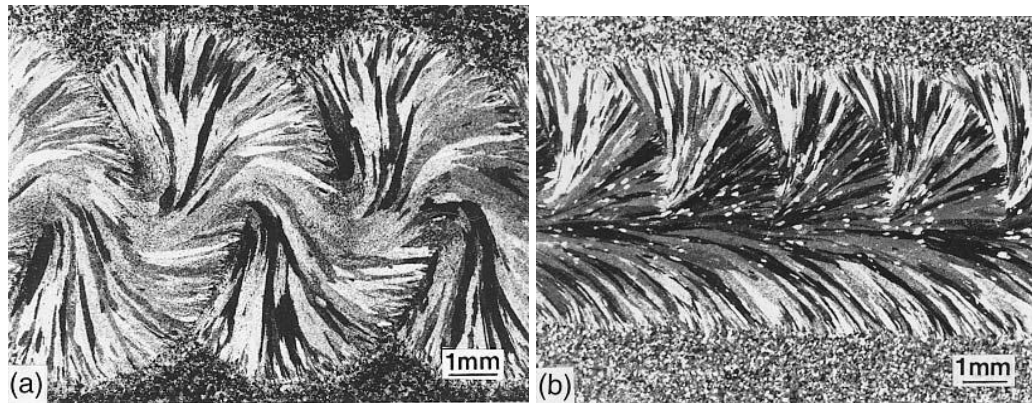


Figura 2.14 - Estrutura dos grãos com oscilação do arco em alumínio: (a) arco oscilando transversalmente ao sentido da soldagem; (b) oscilação circular do arco (KOU e LE 1985, apud Kou 2003)

Sivaprasad e Raman (2006) misturaram duas técnicas de refinamento de grão, tecimento e arco pulsado, para soldar ligas de alumínio 718. Eles conseguiram promover refinamento dos grãos de maneira mais eficiente, fazendo a Fase Laves diminuir, sendo que as Fases Laves permanentes ficaram mais espaçadas e menos interligadas. A Fase Laves diminui a quantidade de elementos que fortalece as ligas e propicia o surgimento e propagação de trincas devido a sua natureza quebradiça, de acordo com SCHIRRA et al (1991).

Existe também a técnica conhecida como Switch Back Welding, que consiste em mover a tocha para frente em um determinado comprimento e, em seguida, deslocar para trás a metade do comprimento anterior. Estes movimentos se repetem ciclicamente com o avanço da tocha durante a soldagem, como mostrado na Figura 2.15. A velocidade de avanço e a de recuo podem ser iguais ou diferentes. Esta técnica é utilizada para controlar melhor a poça de fusão e o controle da raiz da junta. Nos trabalhos de Kaneko et al. (2007) e Yamane et al. (2009) foi investigado o potencial dessa técnica no controle da raiz da solda MIG, com sincronismo do movimento da tocha no Switch Back e uso da corrente pulsada (usada para controlar transferência metálica). Foi possível a elaboração de cordões de solda com ótimas aparências, boa regularidade, sem ocorrer perfuração da junta e sem utilização de cobre-junta. O cordão obtido por Kaneko (2007) é mostrado na Figura 2.16.

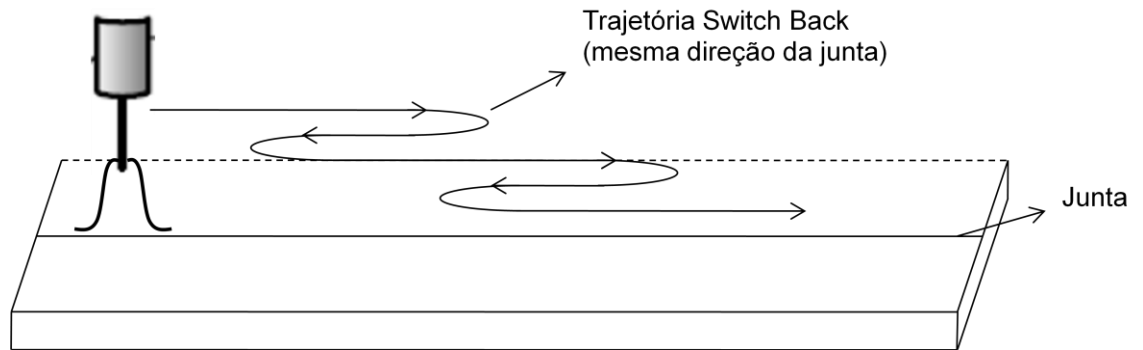
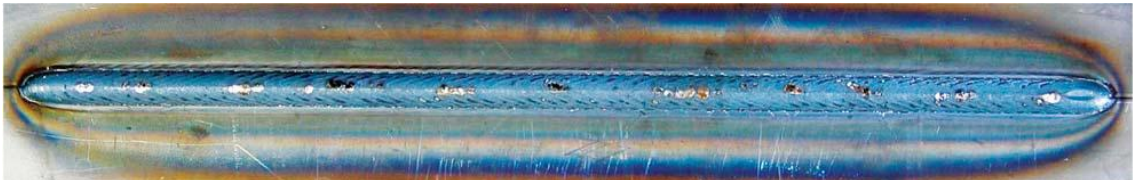


Figura 2.15 - Representação do movimento da tocha fazendo Switch Back na soldagem

(a)



(b)

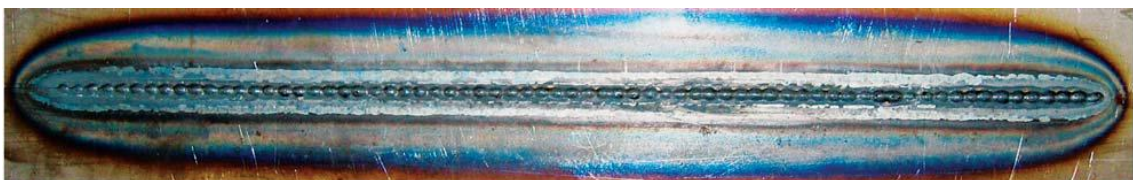


Figura 2.16 - Cordão de solda desenvolvido por Kaneko (2007) utilizando MIG pulsado juntamente com a técnica Switch Back, com 12 mm de avanço e 7 mm de recuo: (a) Face do cordão; (b) Raiz da junta

Pesquisa desenvolvida por Bruecker e Scotti (2007) mostrou que a utilização da técnica de Switch Back aplicado ao processo MIG/MAG pulsado permite um aumento da velocidade de soldagem em até 60% (sem a utilização da técnica, eles conseguiram uma velocidade de soldagem de 35 cm/min para obter cordões com penetração pré-estabelecida, enquanto, que com a utilização da técnica, a velocidade máxima alcançada foi de 57 cm/min para a mesma penetração).

Yamane et al. (2007) desenvolveram uma técnica que consiste em combinar a técnica de tecimento juntamente com Switch Back (mais corrente pulsada para controlar a transferência metálica), como mostra a Figura 2.17. Eles conseguiram construir um cordão

MIG em uma junta de topo com chanfro em V de 45°, com 12 mm de espessura e 4 mm de abertura de raiz sem a utilização de cobre-junta.

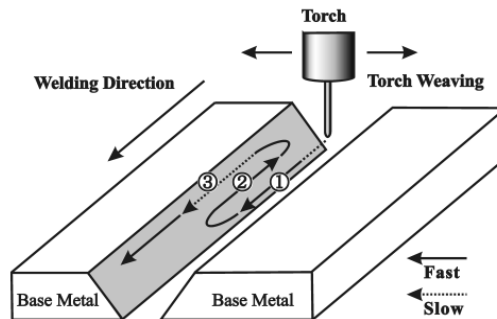


Figura 2.17 - Combinação da técnica de tecimento e Switch Back, com raiz de 4 mm sem utilização de cobre-junta (YAMANE et al., 2007)

Para que os autores conseguissem esta soldagem, eles basearam-se em dois princípios: primeiro, diminuir o tamanho da junta com o próprio cordão para evitar perfuração ou destruição da raiz; em seguida, preencher a junta. Para isto, eles descreveram a técnica como sendo: (a) avançavam a tocha fazendo tecimento por 9 mm em uma velocidade alta (68 cm/min), retornando a distância percorrida ainda mantendo o tecimento e a velocidade (depositavam pouco material na lateral da junta, fazendo os espaços entre elas diminuir), como ilustra a Figura 2.18; (b) como a raiz nesse momento é menor, a tocha volta a avançar por 9 mm mantendo o tecimento, mas agora com uma velocidade bem menor (11 cm/min), que permite refundir o material depositado anteriormente nas bordas e adicionar mais material para promover a união das juntas. A Figura 2.19 mostra a soldagem na raiz sem perfuração e a Figura 2.20 a distribuição do cordão dentro da junta.

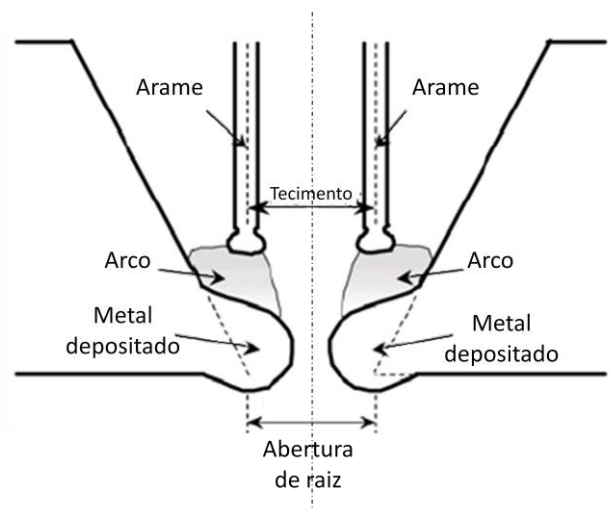


Figura 2.18 - O metal depositado na lateral da junta, diminuindo a abertura de raiz (YAMANE et al., 2007)

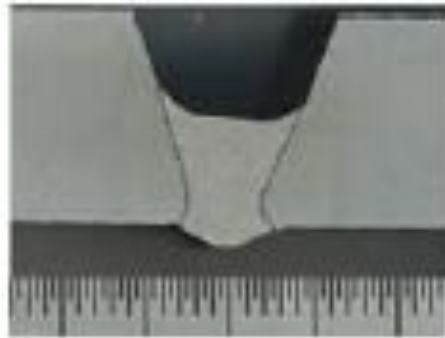


Figura 2.19 - Distribuição do cordão dentro da junta (YAMANE et al., 2007)



Figura 2.20 - Visualização do cordão no lado oposto da chapa (back bead) (YAMANE et al., 2007)

2.5 – Vantagens e Aplicação da Deflexão Magnética do Arco

Oscilar o arco de forma perpendicular ou paralela à trajetória da solda é muito importante, como visto no item anterior. Oscilar o arco magneticamente apresenta algumas facilidades para criar padrões de oscilações, seja de um lado para o outro ou para frente e para traz, em relação a junta de soldagem, bastando apenas posicionar os eletroímãs e definir o formato de onda da corrente aplicada ao eletroímã. Um exemplo da aplicação da deflexão magnética é o controle do tempo de desvio do arco de soldagem por meio de uma forma de onda de corrente aplicada aos eletroímãs (com esse controle gera-se facilidades em soldar juntas formadas por peças de diferentes espessura). Outra facilidade é que para controlar a amplitude da deflexão basta aumentar a corrente fornecida aos eletroímãs ou a altura do arco. Mas é importante ressaltar que a amplitude de oscilação possui limites, pois campos magnéticos muito altos podem desestabilizar o arco e até mesmo apagá-lo (Reis, 2009). A frequência de oscilação mecânica feita por um braço robótico é limitada a aproximadamente 10 Hz (depende do modelo e do tamanho do braço) devido à inércia do robô juntamente com a tocha (há instabilidade no movimento de oscilação em frequências

altas). Mas, segundo Hughes e Walduck (1987, apud Kang e Na, 2002) ao se aplicar oscilação magnética, o arco pode ser oscilado em frequências que podem atingir até 200 Hz. Portanto, é importante ressaltar que a corrente que passa pelas bobinas diminui com o aumento da frequência devido a indutância na bobina, ocasionando a diminuição do campo magnético gerado por elas.

No trabalho apresentado de Yamane et al. (2007), poderia ser utilizado uma oscilação magnética do arco para fazer o movimento de tecimento que tem uma frequência maior para levar o arco até as faces da junta. Dessa forma, conseguir-se-ia obter os resultados de forma mais simples, pois o movimento do braço robótico ficaria apenas para fazer o Switch Back, que é um movimento mais lento.

Para ilustrar a versatilidade alcançada pelos osciladores magnéticos, a Figura 2.21 mostra alguns tipos de osciladores magnéticos comerciais fornecidos por AP Automation. O tipo I é um eletroímã com apenas uma extremidade que é utilizado para fazer tecimentos ou para dar estabilidade ao arco. O eletroímã II tem duas extremidades, que podem ser usados para fazer tecimentos e Switch Back, mas depende da direção em que se coloca as extremidades. O eletroímã III possui um sistema de controle mais sofisticado, pois possui quatro extremidades, cada uma com uma bobina controlada independentemente, com isso permitido soldar (fazendo tecimento e Switch Back ao mesmo tempo), criar formas de arcos variados e criar trajetória para tecimento diferente de perpendicular (por exemplo, circular, triangular, meia lua, etc.). O oscilador IV é parecido com o primeiro, mas possui ajuste de posição das extremidades do eletroímã, não precisando de refrigeração a água podendo oscilar arcos de até 350 A CC. O tipo V é o mais potente fornecido por esse fabricante, alcançando até 600 gauss (60 mT) na área de soldagem, podendo ser refrigerado a água ou a ar. (AP AUTOMATION, 2011)

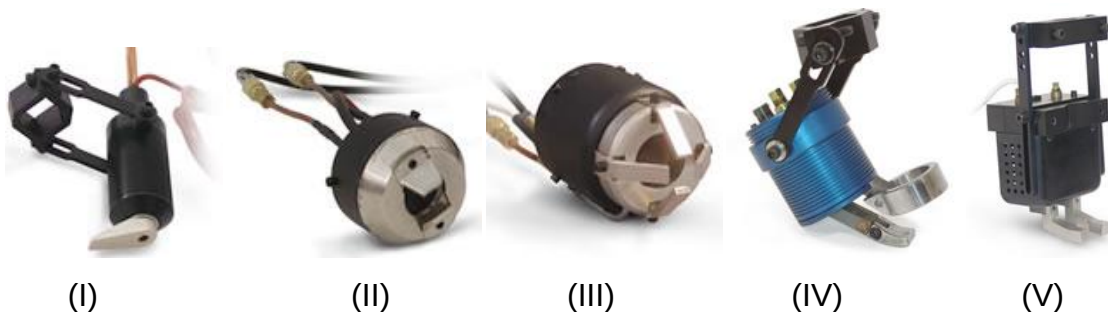


Figura 2.21 - Tipos de eletroímãs para deflexão do arco encontrado no mercado (AP AUTOMATION, 2011)

Uma aplicação importante da deflexão magnética do arco foi o trabalho desenvolvido pelos pesquisadores coreanos Kang e Na (2003). Neste trabalho, foi aplicada oscilação para garantir uma boa qualidade de soldagem dentro de uma junta estreita (narrow groove), como mostrado na Figura 2.22. Segundo os autores, a dificuldade de soldar esse tipo de juntas é manter uma penetração uniforme em ambas as faces da junta. Ao analisarem algumas técnicas que tentam melhorar a homogeneidade nas faces de soldagem, como GMAW com arame dobrado (bending wire) e método de arame em rotação (wire rotating method), constataram que essas técnicas não apresentaram resultados tão bons quanto os resultados obtidos com a deflexão magnética do arco dentro da junta.

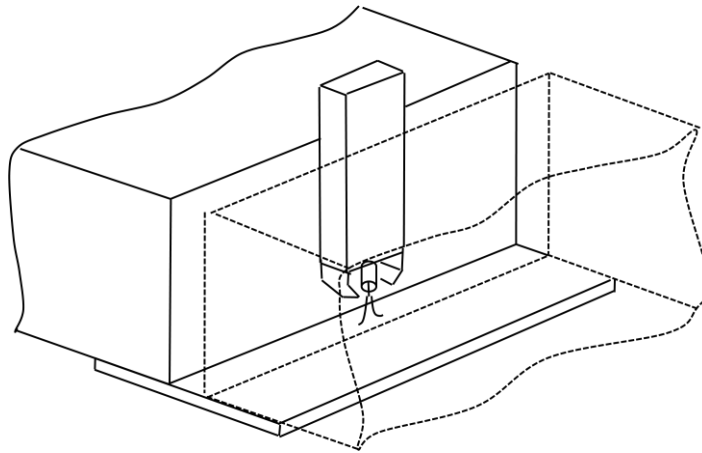


Figura 2.22 - Aplicação da oscilação magnética do arco para garantir boas qualidades de solda dentro de juntas estreitas (narrow groove) (KANG; NA, 2003)

Nesse trabalho, Kang e Na utilizaram o espaçamento entre as paredes de 10 mm e estudaram a penetração nas laterais e no centro quando se varia a frequência de oscilação e quando se aumenta a intensidade do campo magnético. A Figura 2.23 foi obtida por uma câmera de alta velocidade e mostra como o arco se desloca dentro da junta a uma frequência de 30 Hz, quando são aplicados campos magnéticos de 25, 50 e 75 gauss (equivalente a 2,5, 5 e 7,5 mT). Observa-se que com um campo magnético de 25 gauss a oscilação foi pequena e com 75 gauss a oscilação foi grande, fazendo o arco fundir em excesso as paredes da junta e fundir pouco o metal de base (atrapalhando o resultado da solda).

Já um campo de 50 gauss, teve o resultado esperado, pois o arco durante a oscilação percorre toda a superfície da junta formada entre as paredes dos metais a serem soldados.

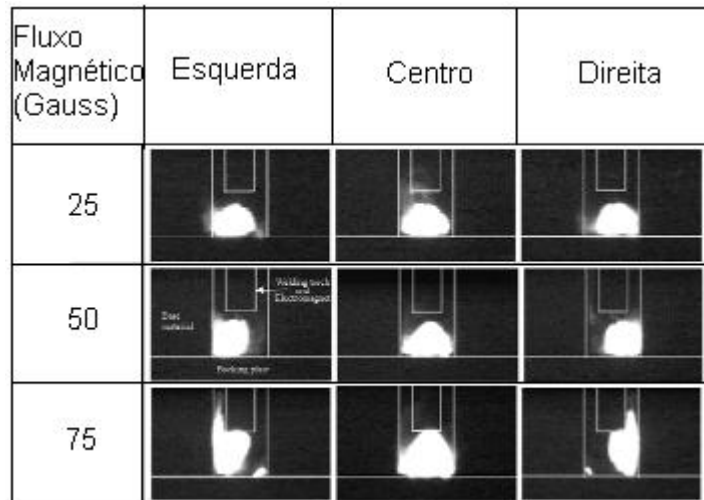


Figura 2.23 - Imagem do arco oscilando dentro do chanfro estreito (Narrow Groove) demonstrado no trabalho de Kang e Na (2003)

C A P Í T U L O I I I

METODOLOGIA GERAL, FUNDAMENTOS E CONSTRUÇÃO DE UM ELETROÍMÃ

Neste capítulo é apresentada a metodologia geral adotada para a realização dos estudos de efeito do campo magnético gerado por diferentes geometrias de extremidades de eletroímã sobre a deflexão de um arco de soldagem, explicando o comportamento de partículas imantadas próximas ao campo magnético, e o projeto de algumas geometrias de extremidades de eletroímã para manipulação das linhas de indução.

3.1 – Definições

Para fins desse trabalho, as seguintes definições serão adotadas:

- Eletroímã – O conjunto total contendo fonte de alimentação, bobinas, magneto e ponteiras;
- Magneto ou núcleo – Metal de alta permeabilidade magnética que atravessa o centro da bobina e tem a finalidade concentrar o campo magnético;
- Extremidade do eletroímã, doravante denominado de PONTEIRA – Parte do núcleo direcionada à trajetória do arco de soldagem;
- Geometria de Ponteira – Geometria da face da ponteira apontada para trajetória do arco de soldagem;
- Partícula magnetizada – Partículas de ferro em forma de cavaco, pó ou mini-tubos, utilizados no trabalho para visualizar as linhas de indução.

3.2 – Metodologia Geral

Como este trabalho propõe otimizar as linhas de indução geradas pelo eletroímã em utilização na deflexão magnética do arco de soldagem, procurou-se desenvolver uma metodologia que fosse baseada inicialmente na visualização das linhas de indução causada por diferentes geometrias de ponteiros, passando pela quantificação dos campos entre as ponteiros, verificação da distância e formato do arco de soldagem defletido e finalizando na análise da eficiência da deflexão na fusão lateral das faces de uma junta. Para tal, são propostas as seguintes etapas:

- Fabricação de seis geometrias de ponteiro diferentes, para acoplar ao eletroímã e gerar linhas de indução diferentes;
- Desenvolvimento de um método de visualização das linhas de indução em uma superfície, visando alto detalhamento;
- Criação um método de visualização espacial das linhas de indução, para observar o comportamento tridimensional das mesmas;
- Desenvolvimento de um método para fazer mapeamento de intensidade do campo magnético entre duas geometrias de ponteiros do eletroímã, para fornecer dados quantitativos e ajudar nas interpretações dos resultados;
- Aplicação da deflexão magnética no arco sobre um metal de base de alumínio, para analisar o grau e a forma do arco defletido;
- Soldagens em chapa de aço ao carbono para comparar os cordões produzidos e fazer soldagens em junta com chapas sobrepostas para comparar a fusão lateral das faces da junta.

3.3 – Fundamentos do uso de Partículas Magnéticas para Visualização de Linhas de Indução do Campo

Para entender como é o comportamento das partículas de ferro sob a ação de um campo magnético, primeiramente é preciso esclarecer vetor campo magnética. Da mesma maneira que as grandezas físicas, como campo gravitacional, campo elétrico, força e aceleração são representadas pelos vetores $\vec{g}$, $\vec{E}$, $\vec{F}$ e $\vec{a}$, respectivamente, o campo magnético também é representado por um vetor, que é simbolizado por $\vec{B}$ e é denominado vetor indução magnética.

O vetor indução magnética $\vec{B}$ (também é chamado de vetor campo magnético) possui direção, sentido e módulo, como todos os vetores. Ao considerar uma região pontual qualquer do campo magnético, esse terá as seguintes definições:

- Direção: reta tangente à linha de força do campo magnético.
- Sentido: mesmo sentido das linhas de indução do campo magnético, saindo do pólo norte e chegando ao pólo sul (externamente).
- Módulo: é a intensidade do campo magnético.

Pelo Sistema Internacional, a unidade do campo magnético é Tesla, simbolizado por T, mas como a unidade T é muito grande, usualmente é utilizado militesla (mT) ou a unidade Gauss, simbolizado por G.

$$1\text{T} = 10\,000\text{ G}$$

$$1\text{mT} = 10\text{ G}$$

Quando se coloca uma agulha imantada próximo de um ímã, observa-se que a mesma vai apontar seu pólo norte em direção ao pólo sul do ímã. Ao se levar a agulha para o outro lado do ímã, o pólo sul da agulha apontará para o norte do ímã. Ou seja, o pólo norte da agulha busca o pólo sul do ímã, como ilustrado na Figura 3.1. Para que o material se oriente dessa maneira, primeiramente ele precisa ser carregado eletricamente ou magnetizado.

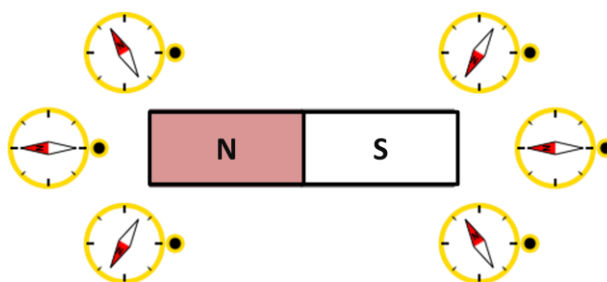


Figura 3.1 - Representação da orientação da bússola com o campo magnético do ímã (a parte clara da agulha representa a polaridade sul, que busca a polaridade norte do ímã)

Nos materiais ferromagnéticos, os elétrons de valência dos átomos que formam o cristal possuem spins paralelos, dando origem a um momento de dipolo magnético atômico. Por sua vez, esses momentos de dipolo magnético dos átomos próximos interagem, de forma a produzir uma distribuição atômica com orientações paralelas de seus momentos

magnéticos em uma pequena região do material, denominada de domínio magnético. Essa magnetização espontânea persiste mesmo na ausência de um campo externo (EISBERG, RESNICK, 1979), como ilustrado na Figura 3.2(a). O cristal como um todo exibe uma grande quantidade de domínios magnéticos. Entretanto, na ausência de campo magnético externo, a magnetização de cada domínio está orientada aleatoriamente no material, de forma que o mesmo não apresenta uma magnetização resultante.

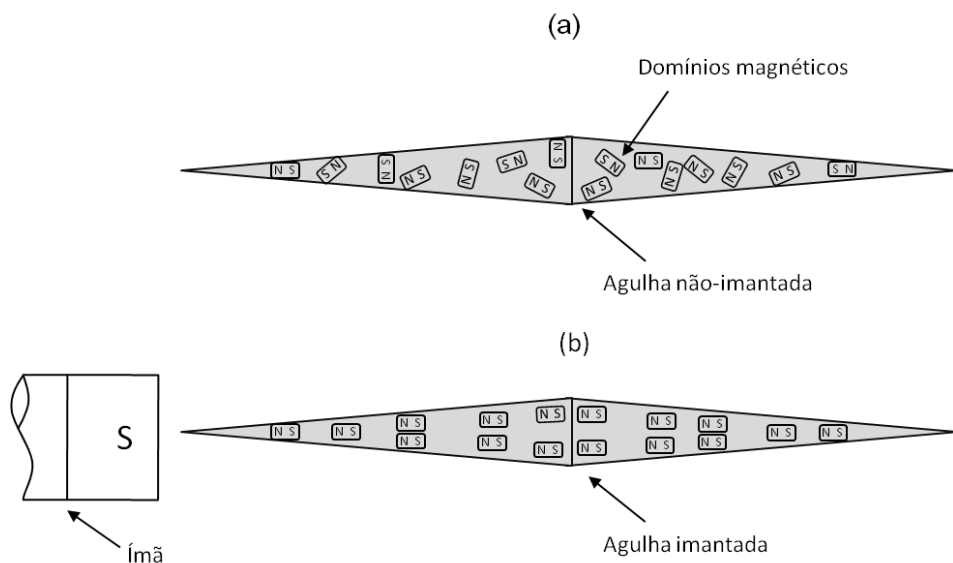


Figura 3.2 – Comportamento dos domínios magnéticos em materiais ferromagnéticos: (a) agulha não-ímantada, com desordem nos domínios magnéticos; (b) agulha ímã, com ordem nas orientações dos domínios magnéticos formando pólos definidos

Ao se aplicar um campo externo de intensidade gradualmente crescente nessa amostra de ferro, ocorrerão dois efeitos (HALLIDAY et al., 2003): o primeiro é o crescimento do tamanho dos domínios devido à orientação comum ao longo do campo magnético externo; O segundo é uma orientação dos domínios, de tal forma a se nortearem o mais próximos da direção do campo externo (Figura 3.2(b)).

Esses dois fenômenos acarretam o seguinte resultado:

- Um material ferro magnético colocado em um campo magnético externo desenvolve um forte momento de dipolo magnético na direção desse campo externo. Se o campo for não-uniforme, o material ferromagnético é atraído de uma região de campo magnético menor em direção a uma região de campo magnético maior.

Analisando a Figura 3.1, onde agulhas ímãs são colocadas próximas do ímã (campo magnético externo), observa-se que o lado norte da agulha busca o lado sul do ímã. Entretanto, ao colocar sete agulhas alinhadas como na Figura 3.3, observa-se que as

mesmas criam uma direção e um sentido determinado. Essa linha formada pelo alinhamento das agulhas é uma maneira de representar a de linha de indução ou linha de força que possui algumas características típicas:

- Linhas de indução magnética existe em todos os pontos no espaço externo e interno ao ímã, independentemente da colocação ou não de um elemento de prova;
- No espaço externo ao ímã, as linhas de indução assumem o sentido do norte para o sul;
- No espaço interno do ímã, as linhas de indução tem sentido do sul para o norte;
- As linhas de indução do campo magnético são sempre fechadas (diferente do que acontece com as linhas de indução do campo elétrico, que são abertas);
- As linhas de indução nunca se cruzam (não se pode ter mais de uma direção possível para o vetor $\vec{B}$ num ponto);
- A direção do vetor $\vec{B}$ é mostrada por uma reta tangente à linha de indução, como ilustrado nos pontos “a” e “b” da Figura 3.3;
- Quanto mais concentradas são as linhas de indução, maior é a intensidade do campo magnético $\vec{B}$, logo o ponto “a” tem intensidade $\vec{B}$ maior que no ponto “b”.

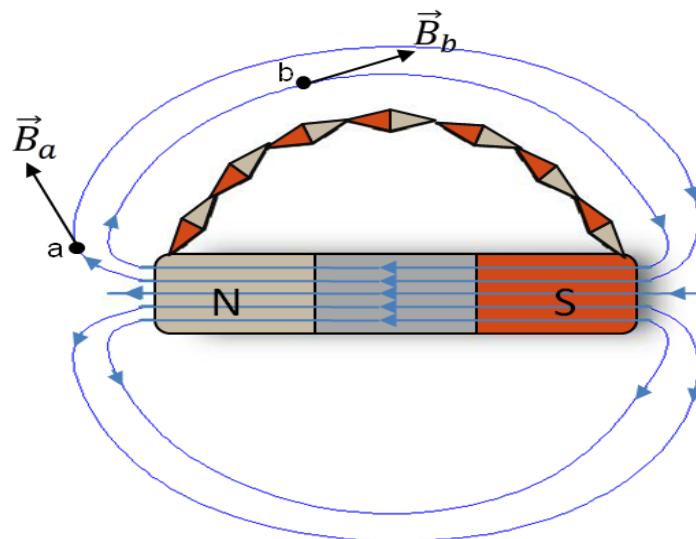


Figura 3.3 - Orientação de sete agulhas em um campo magnético demonstrando uma linha de força

Utilizando o modelo de sete agulhas, é possível visualizar apenas uma linha de força saindo do pólo norte em sentido ao pólo sul. Já para visualizar mais linhas de indução, seriam necessárias mais agulhas. Porém, como elas são muito grandes, poder-se-ia utilizar partículas de ferro simulando agulhas minúsculas. Como as limalhas de ferro se imantariam

com o próprio campo magnético e são leves, elas se orientam paralelamente às linhas de indução, ficando possível visualizar várias linhas, como mostrado na Figura 3.4.

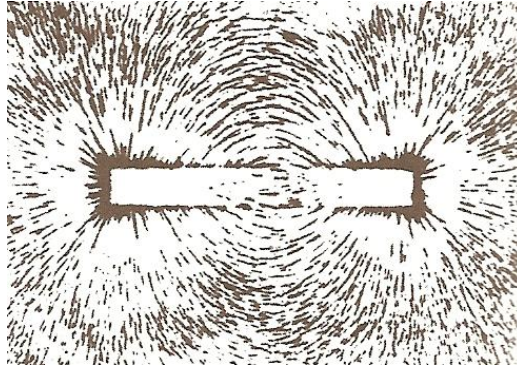


Figura 3.4 - Visualização das linhas de indução geradas por um ímã, com utilização de limalhas de ferro (WIKIPÉDIA, 2011)

3.4 – Projeto e Construção do Eletroímã

Um campo magnético uniforme ideal é aquele onde o campo magnético $\vec{B}$ tem o mesmo sentido, direção e módulo em todos os pontos entre os polos do ímã. As linhas de indução ficam representadas com linhas equidistantes e paralelas entre si (colimadas). Campo magnético uniforme ideal não existe na natureza, mas é bem aproximado quando se observa a região mediana entre os pólos de um ímã em forma de “U”, Figura 3.5. Pode-se observar que todas as linhas que saem do polo norte apontam para o polo sul com a mesma intensidade, pois elas percorrem as mesmas distâncias. É importante frisar que esta figura é apenas uma simplificação, pois desconsiderou-se as linhas de indução que saem das arestas das ponteiros; se fossem considerar as arestas, o comportamento das linhas não seria uniforme, pois nessa região seus comportamentos são diferentes.

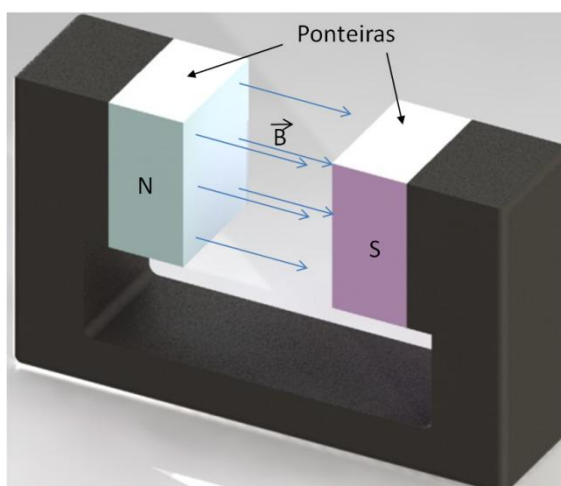


Figura 3.5 - Campo Magnético Uniforme produzido por um ímã em forma de “U”

Ao analisar um sistema real (não ideal), tem-se que levar em conta as arestas dos ímãs. Ao se modificar essas arestas, modifica-se também a forma com que as linhas de indução se acomodam no espaço. Para entender essa distribuição das linhas, foi proposto neste trabalho variar o número de arestas, fabricando algumas geometrias de ponteiros diferentes para serem acoplados a um eletroímã.

Dessa forma, foi proposta a construção de seis diferentes geometrias como mostradas na Figura 3.6, a justificativa de cada ponteira é listada abaixo.

- Plana – para produzir linhas de indução o mais paralelas e homogêneas possíveis;
- Cunha Horizontal – para produzir linhas de indução com maior intensidade sobre um plano perpendicular ao arco voltaico;

- Cunha Vertical – para produzir linhas de indução com maior intensidade em um plano paralelo ao arco voltaico;
- Cônica – para produzir linhas de indução com maior intensidade em uma linha que cruza a trajetória do arco;
- Calota Convexa – para entender o comportamento da distribuição das linhas sobre uma superfície sem arestas;
- Torre – para aumentar o número de arestas, região onde ocorre um acúmulo maior de linhas de indução e analisar como as linhas se comportam.

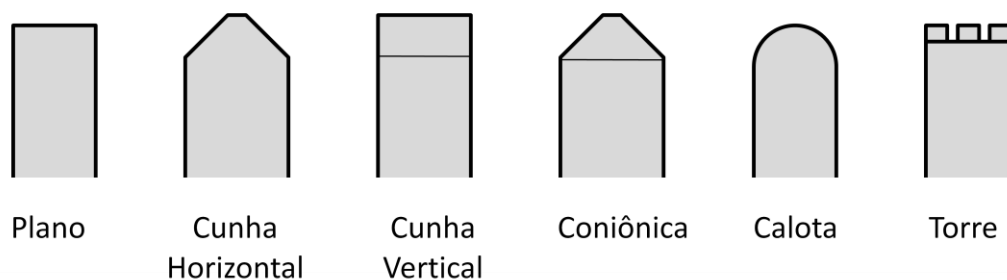


Figura 3.6 - Proposta de construção de geometrias de ponteiros para gerarem diferentes distribuições de linhas de indução

Para a construção final das ponteiros, foram seguidas as dimensões básicas apresentadas na Figura 3.7, que exemplifica as dimensões da ponteira Calota e detalha a junta de acoplamento. Os desenhos e cotas das demais geometrias encontram-se no anexo I.

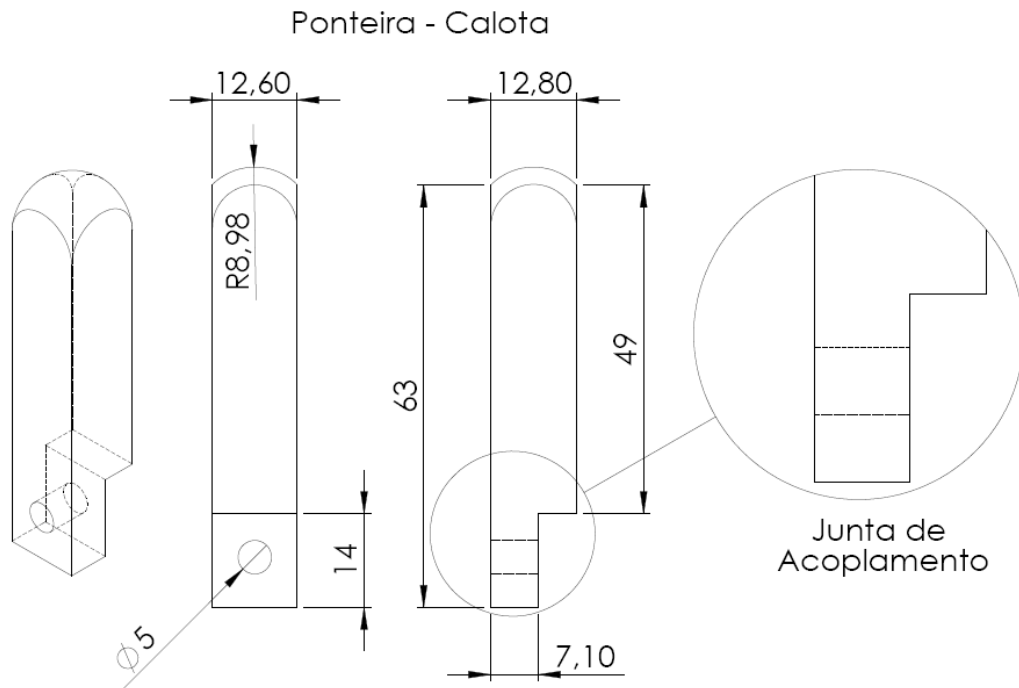


Figura 3.7 - Geometria e dimensões da Ponteira Calota, com detalhamento da junta de acoplamento

Para criar as linhas de indução, foi projetado e construído um gerador de campo magnético que consiste de duas bobinas de contator. No centro de cada bobina, foi colocado um núcleo de transformador em formato de “L”, como demonstrado pela Figura 3.8. As bobinas foram ligadas em série, pois, como ilustra a Figura 3.9 e Figura 3.10, a ligação de duas bobinas em série e alimentadas por uma fonte de tensão contínua permite criar nos núcleos de cada bobina campos magnéticos com orientações opostas. A fonte de alimentação de potência utilizada (POWER SUPPLY EMG 18134) possui regulagem de tensão de 0 a 30 V, permitindo a regulagem da intensidade dos campos gerados por elas.



Figura 3.8 - Fonte de alimentação, bobina e núcleo, formando o eletroímã utilizado para geração de linhas de indução

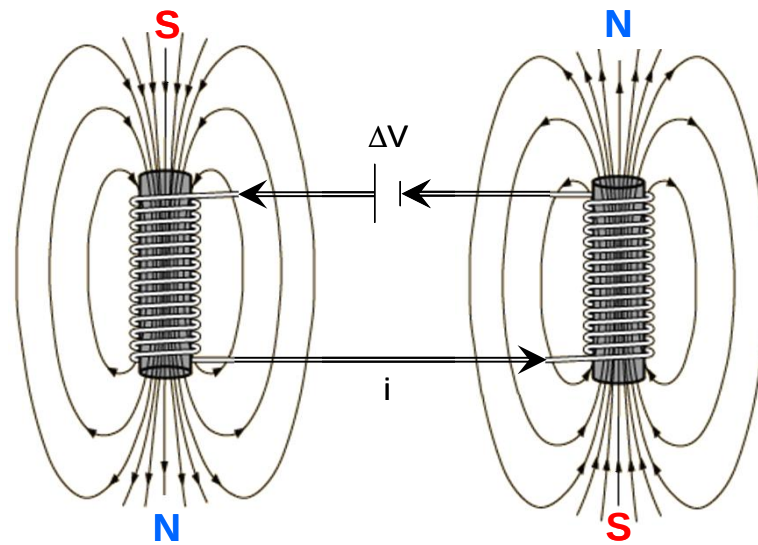


Figura 3.9 - Ilustração da orientação do campo magnético gerado por duas bobinas ligadas em série (REIS, 2009)

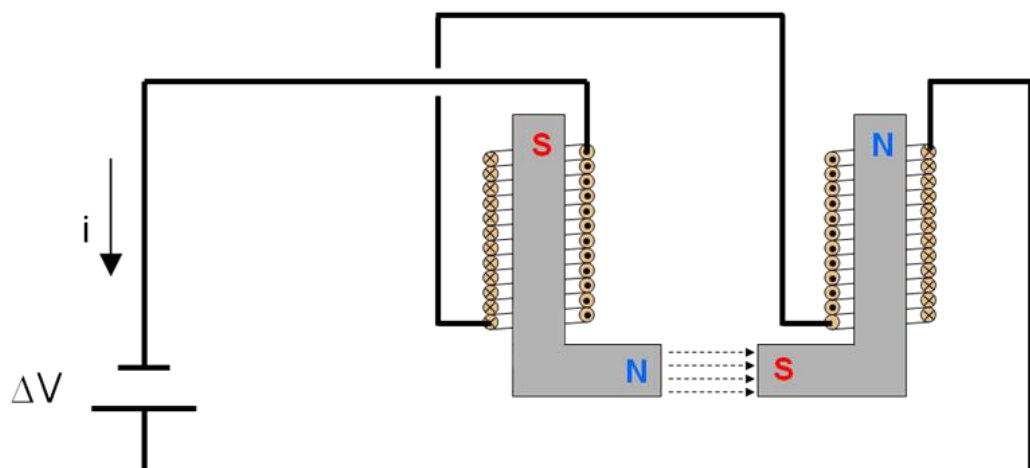


Figura 3.10 - Diagrama elétrico de ligação do eletroímã formado por duas bobinas (REIS, 2009)

CAPÍTULO IV

VISUALIZAÇÃO DAS LINHAS DE INDUÇÃO EM 2D

Neste capítulo são apresentados a montagem do eletroímã e os procedimentos para a visualização das linhas de indução 2D geradas por diferentes geometrias de ponteiras, com objetivo de verificar a influência das superfícies das ponteiras na distribuição das linhas de indução (resultados qualitativos). Serão descritos os equipamentos, os acessórios e os materiais de consumo empregados, bem como a montagem geral dos experimentos para a realização dos ensaios.

4.1 – Fabricação das Primeiras Ponteiras para Gerar Diferentes Linhas de indução

Como mostrado no Capítulo 3 (item 3.4), a ideia básica é avaliar o efeito da geometria das ponteiras de um eletroímã na deflexão do arco. Para isso foram propostos tipos diferentes de ponteiras.

Inicialmente, as ponteiras foram fabricadas com lâminas de uma sucata de transformador, porque elas são fabricadas em processo de laminação com alongamento dos grãos em um único sentido e sua liga possui elevado teor de silício, duas características que aumentam a permeabilidade magnética do aço, melhorando suas propriedades para utilização em núcleos de bobinas magnéticas.

Para usinar as lâminas nos formatos desejados, foi necessário fixá-las entre si. Para isso, foi utilizada soldagem manual por TIG a 60 A, fundindo-se as arestas das lâminas umas nas outras, fazendo delas um único sólido, como ilustra a Figura 4.1. No caso

das ponteiros Plana e Cunha (Figura 4.1(a)) as pontas foram fresadas a partir desse bloco, enquanto se usinou o bloco manualmente com limas para se conseguir as geometrias Cônica (Figura 4.1(b)) e Calota. Finalmente, para confecção da geometria Torre, fez-se o mesmo processo da Plana, mas no final realizaram-se cortes na superfície fresada em forma de “#” com uma seguela, aumentando o número de arestas, como ilustra Figura 4.1(c).

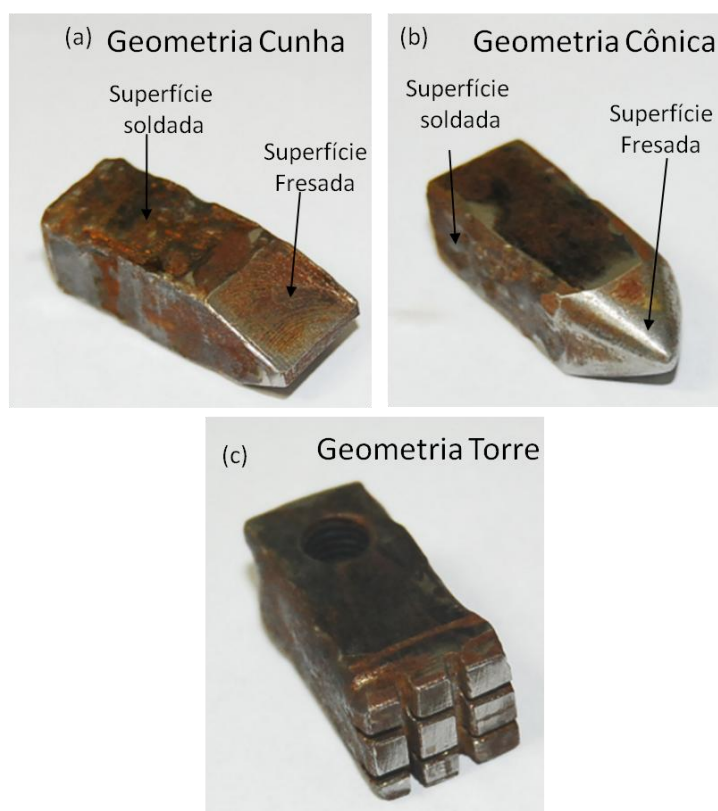


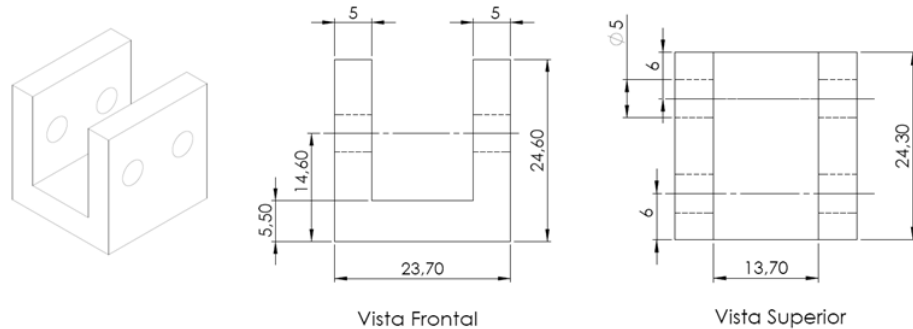
Figura 4.1 - Exemplo de ponteiros fabricados a partir de lâminas de núcleo de transformador soldadas entre si e usinadas para dar a forma: (a) Cunha, fresada; (b) Cônica limada; (c) Torre, fresada e serrada

Apesar de ter funcionado o método de fabricação, é importante ressaltar alguns problemas. A superfície do bloco era irregular devido a soldagem e a união das lâminas de baixa profundidade, dificultando a usinagem (quando as ferramentas da fresadora ou do torno desgastava as peças além das superfície soldada, as lâminas amassavam ou se soltavam em pequenos pedaços, formando arestas que podiam interferir no comportamento das linhas de indução).

O próximo passo foi a elaboração de um suporte para fixar as ponteiros ao eletroímã de maneira simples, sem que precisasse retirar o núcleo da bobina cada vez que fosse necessário trocar as ponteiros. O material escolhido foi aço inoxidável austenítico, pois o mesmo tem baixa permeabilidade magnética e não é imantável. A peça ilustrada na Figura

4.2 foi fresada a partir de uma barra chata de aço inoxidável. A Figura 4.3 mostra a montagem completa do eletroímã com o suporte e a ponteira acoplada. É importante ressaltar que com o suporte foi possível manter o alinhamento das ponteiras com o núcleo do eletroímã.

(a)



(b)

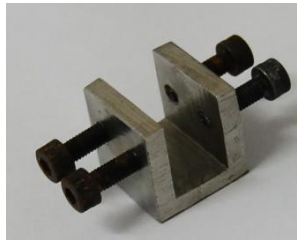


Figura 4.2 - Suporte para o acoplamento de diferentes ponteiras no eletroímã

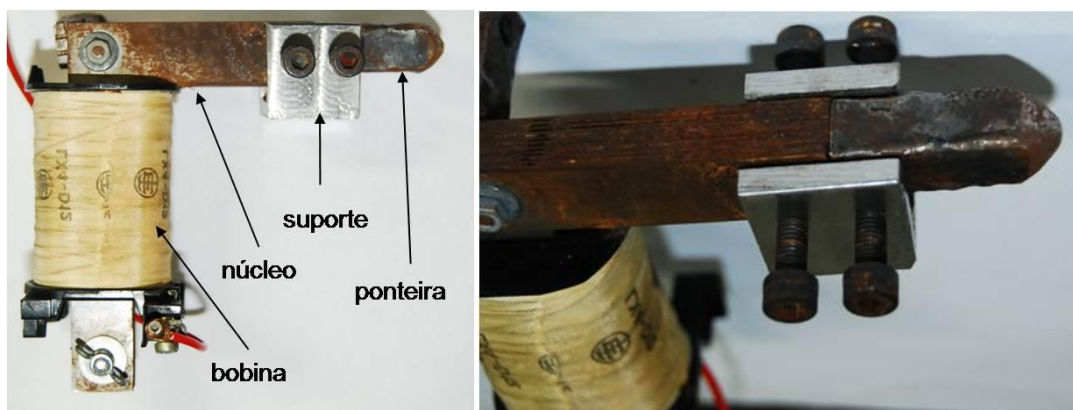


Figura 4.3 - Exemplo de acoplamento da ponteira no núcleo do eletroímã

4.2 – Primeira Tentativa de Visualização de Linhas de indução em 2D

Para visualização das linhas de indução, utilizou-se como partículas magnéticas cavacos quebradiços, de pequenas dimensões, recolhidos no torno do laboratório de usinagem.

Para criar-se um plano de visualização 2D, utilizou-se um vidro plano para formar uma superfície firme, recoberto com um papel branco (folha de papel sulfite) para dar contraste entre o plano e os pequenos cavacos. Como ilustra a Figura 4.4, o eletroímã foi posicionado sob o plano, de maneira que o núcleo e a ponteira encostassem no vidro. Dessa maneira, o campo magnético gerado pela bobina passaria o mais próximo possível da superfície onde estariam depositados os cavacos.

No primeiro teste, foi colocada em um dos núcleos do eletroímã a ponteira Calota, deixando na outra bobina a geometria plana do próprio núcleo. Quando os cavacos foram depositados sobre o papel e acionado o eletroímã, os mesmos não se alinharam totalmente. Houve alinhamento apenas na região mais intensa, ou seja, entre as duas ponteiras. Isso ocorreu porque a força magnética foi inferior ao atrito estático dos cavacos com a superfície. Para solucionar o problema, procurou-se impor uma pequena vibração sobre a superfície do plano, fazendo, com os pequenos movimentos, diminuir o atrito (passou a dinâmico) permitindo que os cavacos se alinhassem melhor com o vetor $\vec{B}$.

Mesmo assim, o resultado da primeira tentativa de visualização 2D não foi satisfatório, como pode ser observado na Figura 4.5. Não foi possível observar as regiões de concentração das linhas de indução e nem a diferença entre ponteiras. Os motivos levantados para o insucesso foram: sensibilidade prejudicada pelo tamanho grande dos cavacos de ferro; o fato das ponteiras serem posicionadas abaixo da superfície de deposição das partículas (as linhas de indução estavam mais concentradas entre as ponteiras, e não sobre as ponteiras); a quantidade de cavacos de ferro e a distribuição depositado sobre a superfície foi aleatória, perda de intensidade de campo no acoplamento núcleo-ponteiras.

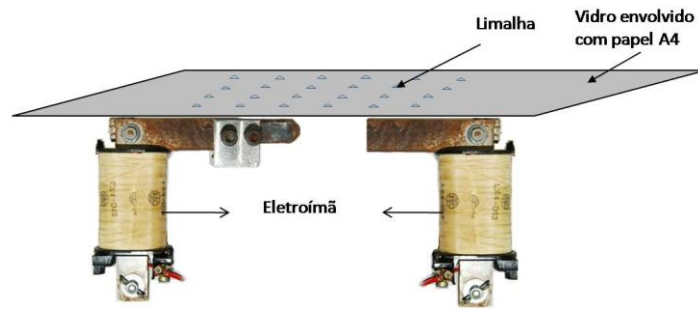


Figura 4.4 - Esquema de montagem experimental para primeira tentativa de visualização de Linhas de indução 2D

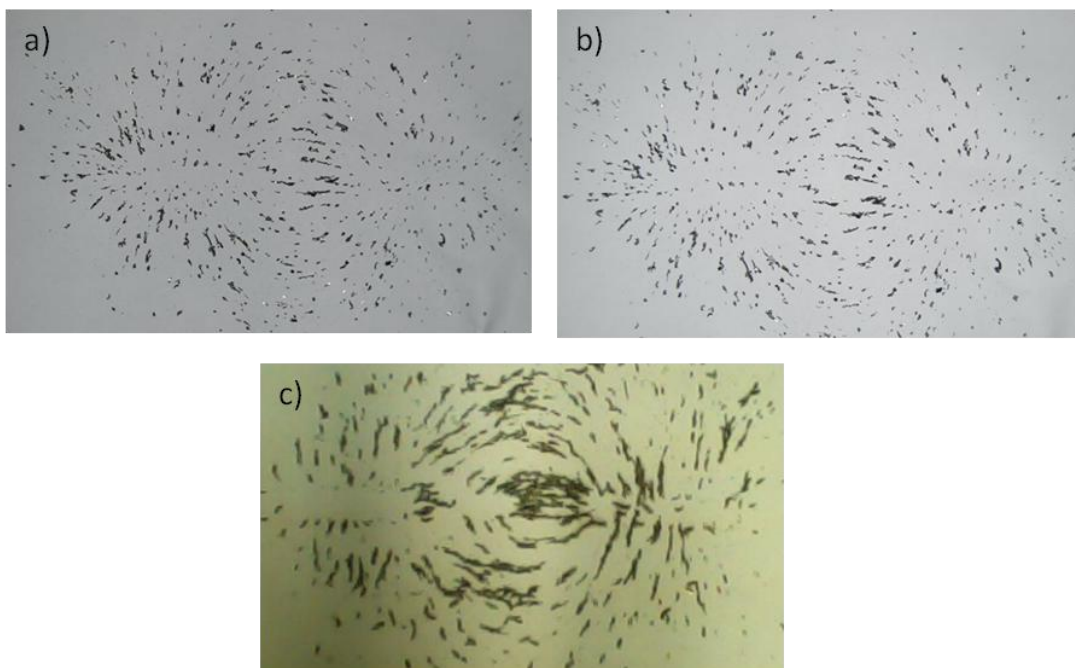


Figura 4.5 - Resultado da primeira tentativa da visualização 2D, onde: a) geometria plana; b) geometria cunha; c) geometria calota

4.3 – Segunda Tentativa de Visualização de Linhas de indução em 2D

4.3.1 – Novo projeto de ponteira

Para melhorar o sistema, outro modelo de ponteiras foi sugerido e fabricado, onde a peça em forma de “U” utilizada para fixar a ponteira ao núcleo não foi mais utilizada (eliminando o engate “U” diminui-se a possibilidade de interferência nas linhas de indução perto das geometrias). No novo projeto procurou-se manter a idéia de se conseguir um acoplamento fácil e rápido para as trocas de ponteiras. Para sua construção foram utilizadas as dimensões dos desenhos do anexo I.

As novas ponteiras foram construídas a partir de uma barra de aço 1020 quadrada de 1/2 polegada (conferindo a medida com paquímetro, a mesma apresentou lados de 12,60 x 12,80 mm). Para permitir melhor usinagem no acoplamento, núcleo dos eletroímãs também foram trocados por aço 1020 de mesma dimensão. A troca do material naturalmente reduz a permeabilidade magnética dos núcleos e nas ponteiras, por não ser mais um aço ao silício (alta permeabilidade), mas essa perda foi compensada com um pequeno aumento da corrente na alimentação das bobinas do eletroímã. Quando o material foi trocado para a barra de aço 1020, a usinabilidade foi melhor, sendo possível criar as formas desejadas sem criar irregularidades nas ponteiras. A Figura 4.6 mostra como ficaram as novas ponteiras depois de fabricadas.

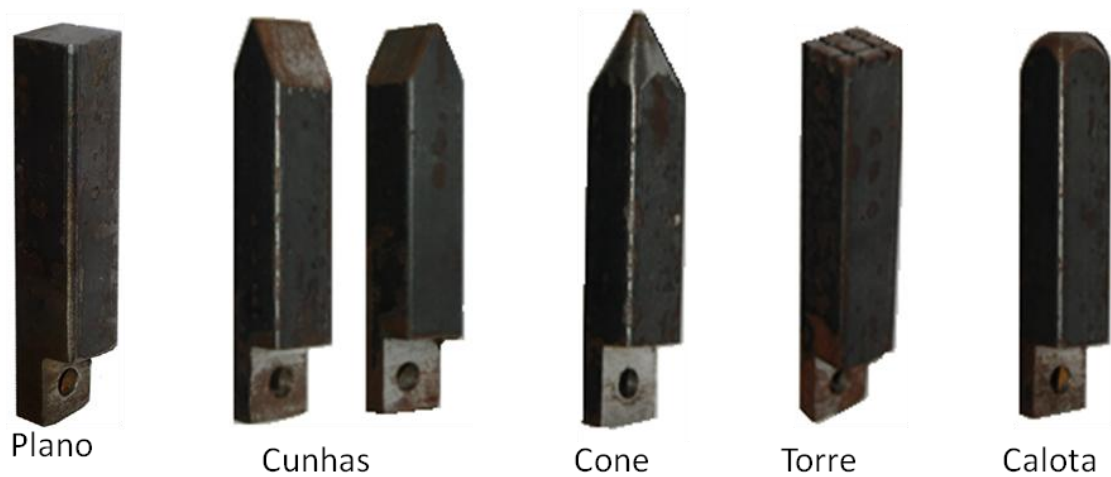


Figura 4.6 - Ponteiras fabricadas para criar diferentes linhas de indução magnéticas

A junta de acoplamento construída permite que a geometria da ponteira fique longe da parte de acoplamento, fazendo com que perturbações que podem ser produzidas nessa região não atinjam a extremidade do núcleo. A Figura 4.7 mostra o acoplamento citado.



Figura 4.7 - Demonstração da junta de acoplamento entre o núcleo e a ponteira

4.3.2 – Novo material das partículas magnéticas para visualização das linhas de indução

Para uma melhor resolução das linhas de indução, fez-se a substituição dos cavacos utilizados no experimento anterior por pó de ferro utilizado em ensaio de partícula magnética. O pó de ferro utilizado tem as seguintes características, segundo o fabricante: partícula magnética via seca colorida, cor vermelha e composição básica de pó de ferro e pigmentos não tóxicos.

Com partículas menores, foi possível aumentar a densidade de partículas de ferro sobre o plano, facilitando, pela proximidade, a formação do desenho das linhas de indução. O resultado dessa troca foi uma grande melhora na resolução das linhas de indução, podendo-se observar o comportamento delas com mais detalhes na superfície e entre cada ponteira.

4.3.3 – Novo projeto do plano de visualização

Outra mudança importante foi a modificação do material do plano, que deixou de ser de vidro recoberto com papel sulfite para ser de cartolina. Nesta, foi possível realizar recortes no formato exato das ponteiras, para que fosse possível fixar o plano na linha de centro das ponteiras. No entanto, durante a fixação das cartolinas, elas não permaneciam totalmente planas, como mostrado na Figura 4.8(a). A solução foi usar junto com a cartolina um papelão mais rígido, como mostrado na Figura 4.8(b) (as dimensões dos cortes na cartolina para ajustá-las nas ponteiras tiveram uma tolerância maior, deixando o ajuste entre o papelão e as ponteiras com interferência menor, garantindo a fixação)

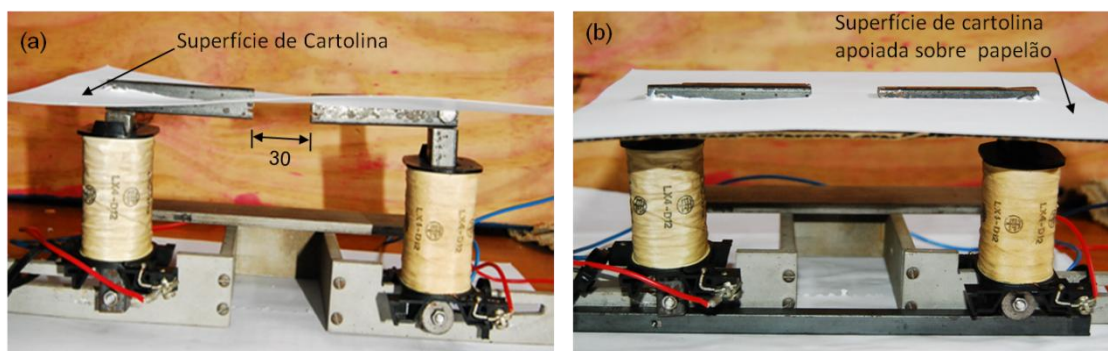


Figura 4.8 - (a) plano construído de cartolina, com evidência das ondulações do plano; (b) plano construído de cartolina sobre papelão, reduzindo ondulação da superfície

4.3.4 – Novo procedimento de depósito das partículas magnéticas sobre o plano de visualização

Para efetuar a deposição do pó de ferro de maneira homogênea foi adaptado um saleiro para esta função, da mesma forma que distribui o sal em uma salada. Mas esse processo (denominado aqui de técnica do chuveiramento) não foi tão simples, já que ocorreram alguns problemas durante a utilização do saleiro para distribuição homogênea do pó de ferro. O primeiro foi em relação ao tamanho dos furos (muitos grandes), fazendo pó de ferro sair do saleiro de forma contínua, impossibilitando a deposição homogênea do pó (Figura 4.9). A solução encontra foi cobrir os furos do saleiro com filme de PVC de uso doméstico e fazer novos furos de menores dimensões usando grafite de lapiseira de 0,5 mm, concêntricos aos furos do saleiro, como mostrado na Figura 4.10



Figura 4.9 - Escoamento contínuo do pó de ferro entre somente alguns furos de um saleiro, dificultando a distribuição homogeneia

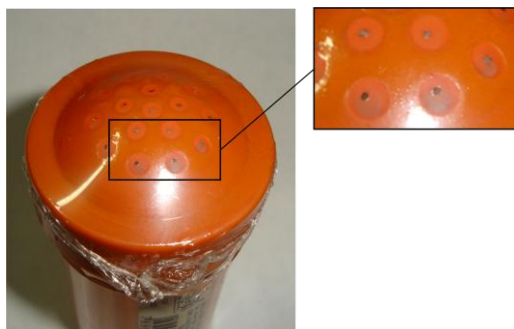


Figura 4.10 - Remodelagem do saleiro pelo uso de filme PVC, com furos de diâmetros de 0,5 mm

O segundo problema observado foi a distribuição desigual da quantidade de material em cada teste. Inicialmente pensou-se apenas em manter o mesmo número de sacudidas impostas ao saleiro. Para avaliar esta abordagem, realizou-se vinte agitadas no saleiro sobre uma balança de precisão. Repetindo-se cinco vezes, observou-se que os valores de

massa fornecida pela balança eram diferentes. Outra observação foi de que uma pequena quantidade deste pó de ferro caía entre as rosas da tampa e do pote fazendo aumentar o erro durante o teste de comparação.

A solução do problema para a técnica do chuveiramento foi pesar previamente a quantidade de pó de ferro a ser usada. Para impedir que pó de ferro continuasse a cair entre as rosas, descartou-se o pote do saleiro e trabalhou-se somente com a tampa virada para baixo, adicionando-se a quantidade padronizada de pó de ferro no seu interior (com pequenas oscilações imposta na tampa, o pó passa pelos furos e é espalhado homogeneamente sobre a superfície). O resultado final da deposição do pó de ferro sobre a superfície é mostrada na Figura 4.11.



Figura 4.11 - Deposição homogênea de pó de ferro sobre a superfície, utilizando a técnica do chuveiramento

4.3.5 – Aplicação do novo sistema de visualização das linhas em 2D

Para os resultados a seguir adotaram-se os seguintes procedimentos:

- Montagem do plano de visualização na linha de cetro das ponteiras, e paralelamente ao plano das mesmas, mantendo-se uma distância de 30 mm entre os extremos das ponteiras;
- Distribuição homogênea de 0,3 gramas de pó de ferro sobre a superfície, usando o pulverizador final;
- Fonte de corrente elétrica ligada e regulada em 5 V;
- Pequenas batidas com um bastão na lateral do plano de visualização, para que os pós se alinhassem;
- Fotos das superfícies para registrar os resultados.

As imagens mostradas nas Figura 4.12 até Figura 4.17 mostram os resultados obtidos com visualização 2D, os quais são comentados no texto após a cada figura.

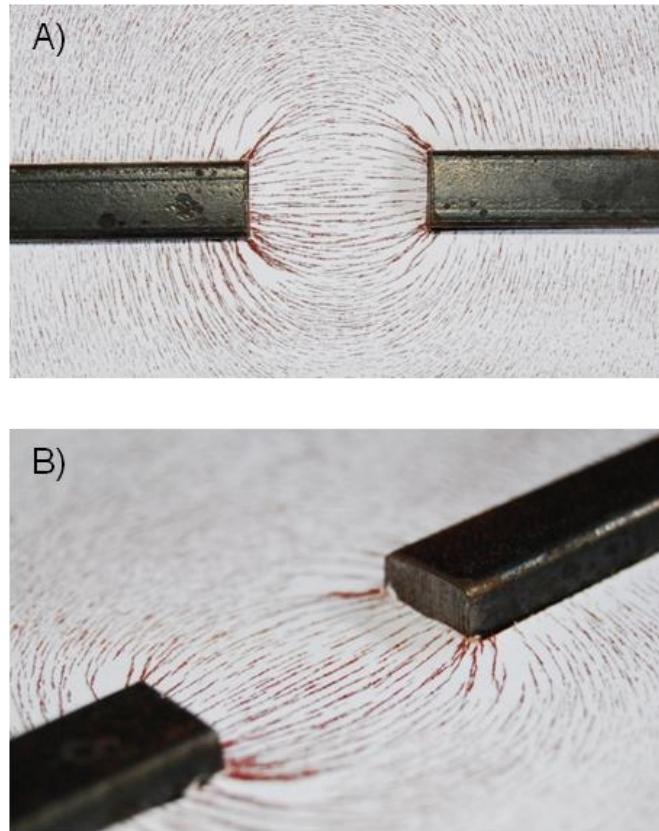


Figura 4.12 - Visualização 2D das linhas de indução geradas pela ponteira Plana

Na geometria plana, é possível observar que as linhas de indução são bem homogêneas. Entre as faces das geometrias, as linhas têm uma tendência em formar retas paralelas e equidistantes entre si, mostrando que no meio das faces ocorre um campo magnético que pode ser considerado como campo uniforme, bem aproximado ao esquema mostrado na Figura 3.5 (ímã em “U”). Entretanto, diferente do modelo, no sistema real é possível observar que nas arestas das superfícies ocorre uma pequena concentração de linhas de indução, esse comportamento mostra que a intensidade do campo magnético é maior nessa região do que na parte plana da geometria. Mais afastado das faces, ou seja, nas faces laterais das ponteiras, as linhas se apresentam como linhas em forma de arcos, mostrando a validade do vetor $\vec{B}$. Por gerar um campo magnético bem uniforme, a ponteira plana foi escolhida como parâmetro de comparação para as outras ponteiras.

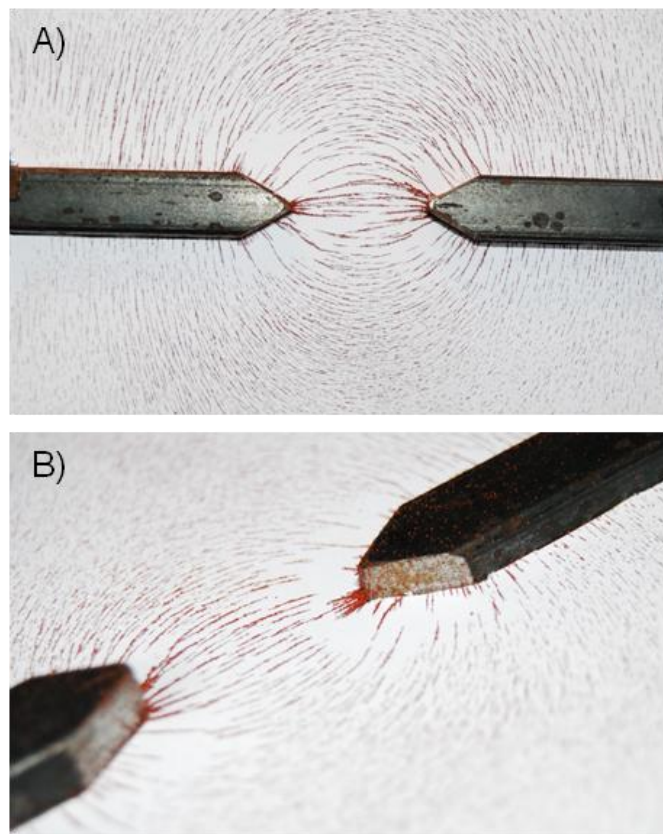


Figura 4.13 - Visualização 2D das linhas de indução geradas pela ponteira Cunha Vertical

A ponteira Cunha poderia ser colocada em dois planos diferentes. A ponteira Cunha Vertical ganhou esse nome porque sua cunha é colocada de maneira perpendicular ao plano de visualização como a Figura 4.13 mostra, ocorre um acúmulo de pó de ferro na ponta da cunha. Esse acúmulo caracteriza várias linhas de indução saindo de uma região muito pequena, ou seja, concentração das linhas na ponta da cunha, indicando que a intensidade do campo magnético é maior nessa região. Se for analisado o número de linhas dentro de uma área quadrada entre as geometrias e comparar o número de linhas numa área mais afastada das ponteiros, percebe-se que a área mais afastada tem mais linhas, mas isso não significa que a intensidade do campo em regiões mais afastadas é maior. Na verdade, o que ocorre é que a intensidade do campo magnético no centro é bem maior. Sendo assim, o campo é capaz de imantar mais fortemente os pó de ferro, fazendo com que a força magnética gerada nas partículas seja também maior, causando atrações mais fortes entre as partículas na região entre as ponteiros. Essa atração faz com que os pó se juntem, formando uma linha mais grossa e com mais partículas, surgindo espaços vazios entre as linhas formadas, como se pode observar na Figura 4.13 (as linhas de indução são mais grossas na região entre as ponteiros do que na região mais afastada).

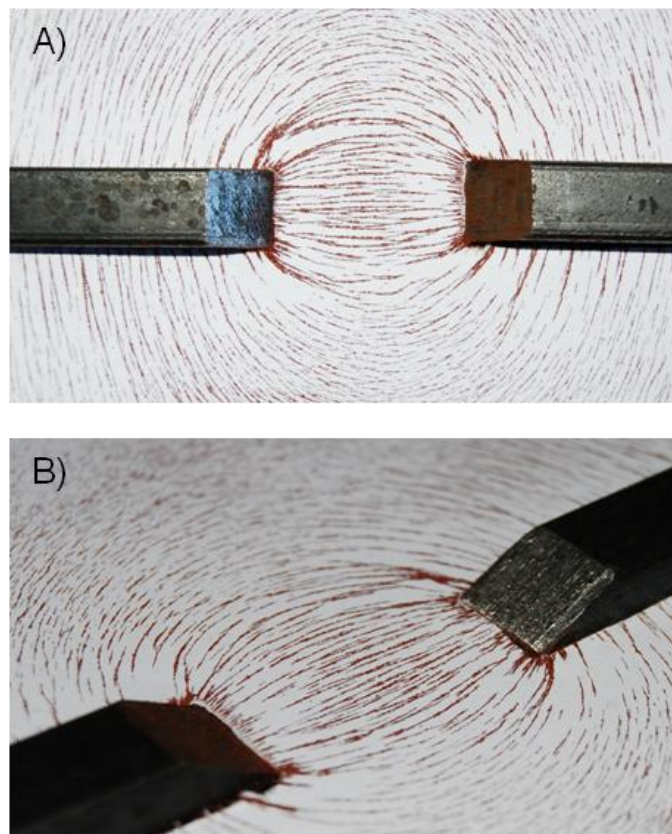


Figura 4.14 - Visualização 2D das linhas de indução geradas pela ponteira Cunha Horizontal

A Cunha Horizontal é a segunda forma de posicionamento da cunha, com sua face em forma de cunha paralela à superfície do papel (plano de visualização). Nesse posicionamento, se observa a concentração das linhas em toda a extensão da cunha.

Na Cunha Vertical houve grande concentração das linhas na ponta da cunha, mas na geometria Cunha horizontal, com toda quina paralela à superfície, as concentrações das linhas de indução na ponta da cunha ficaram distribuídas na superfície. Ao analisar o resultado da Figura 4.14, percebe-se que o formato das linhas de indução entre as ponteiras, excluindo as arestas, teve comportamento semelhante à geometria Plana, ou seja, as linhas tem uma tendência de se apresentarem em forma de retas paralelas e equidistantes entre si. Logo se pode afirmar que a cunha horizontal produz campos uniformes próximos aqueles produzidos pela geometria Plana, mas essa uniformidade só ocorre quando o plano analisado é coincidente com as extremidades das cunhas, pois fora dela ocorre uma reorganização das linhas nos chanfros das cunhas. Outra observação importante é a quantidade de linhas formadas bem perto das faces e a espessura das linhas na região entre as ponteiras, comportamento este não notado na geometria plana. De fato, a intensidade do campo uniforme gerado é mais intenso que o campo gerado pela geometria plana. Observa-se também que a concentração das linhas nas arestas das geometrias é

mais intensa do que na geometria plana, pois além de formar uma quina no plano da superfície, ela também forma quina no plano perpendicular à superfície, mostrando que quanto mais característica de ponta tem a geometria, mais linhas se concentram e mais intenso é o campo.

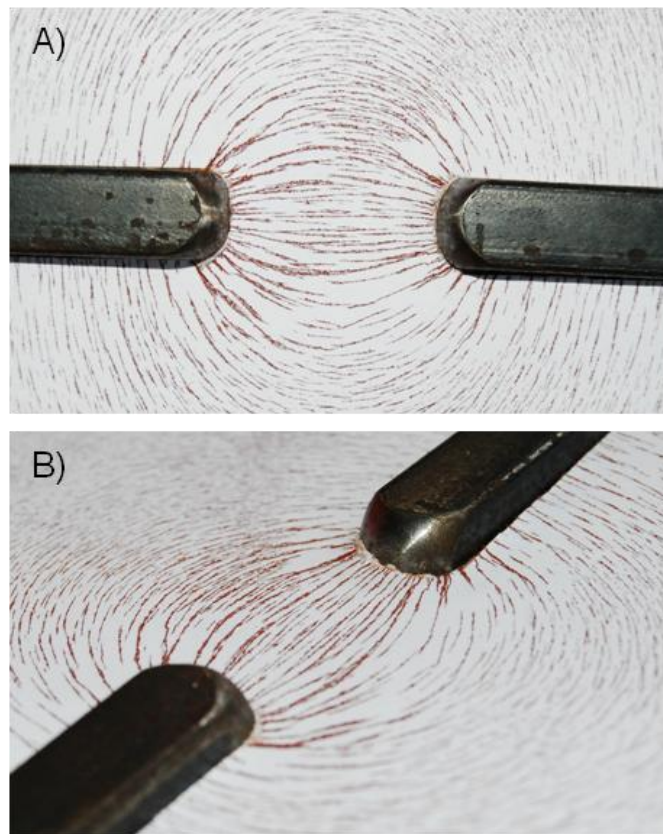


Figura 4.15 - Visualização 2D das linhas de indução geradas pela ponteira Calota

A geometria Calota permite verificar, em contraste à geometria plana, o efeito de uma superfície sem aresta sobre a distribuição das linhas de indução. Ao observar a Figura 4.15, é notada uma característica importante, ou seja, as linhas de indução geradas tendem a ser perpendiculares à superfície da peça. Na região mediana, as linhas tendem a se comportar como retas equidistantes, mas ao se afastar do centro elas se apresentam como arcos de raio grande, que vai diminuindo à medida que se afasta do centro. A espessura das linhas é mais intensa próximo das superfícies. Como não tem arestas, não houve pontos de concentração de linhas de indução. As linhas ficaram bem distribuídas nas superfícies, cumprindo seu objetivo de construção.

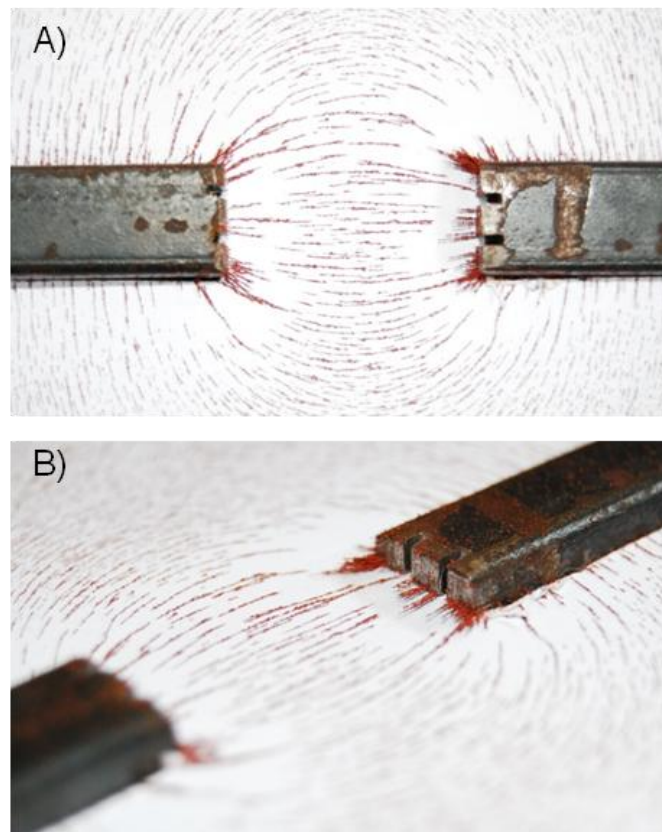


Figura 4.16 - Visualização 2D das linhas de indução geradas pela ponteira Torre

A idéia da geometria Torre é de aumentar o número de arestas, visto que nas geometrias Plana e Cunhas, ocorre maiores concentrações nas arestas. Assim, a geometria torre vai fazer o papel inverso da geometria Calota, enquanto esta elimina as arestas, a geometria Torre aumenta as arestas.

Ao observar a Figura 4.16 da geometria torre, pode-se observar uma concentração elevada nas arestas externas e uma concentração de intensidade menor na superfície central da geometria. Dentro da fenda não ocorreu formação de linha de força entre as superfícies internas à geometria, isso porque cada ponteira está polarizada com um pólo distinto. Sendo assim, ao observar uma ponteira, na qual sua superfície está com a polarização norte, logo, não tendo diferença de polaridade dentro da fenda (pode ocorrer uma pequena diferença de intensidade de campo magnético), não ocorrerá formação de linhas de indução, pois essa tem como propriedade de formação de sair do pólo norte e ir na direção do pólo sul. O pó de ferro que foi depositado dentro da fenda antes de ligar o eletroímã poderia orientar-se com os pó de ferro dentro da fenda da outra ponteira. Mas, ao ligar o eletroímã, o comportamento desse pó foi de migrar para as arestas mais próximas, uma vez que, nelas a intensidade do campo é maior. Na parte média entre as ponteiras, ocorreu formação de linhas mais grossas.

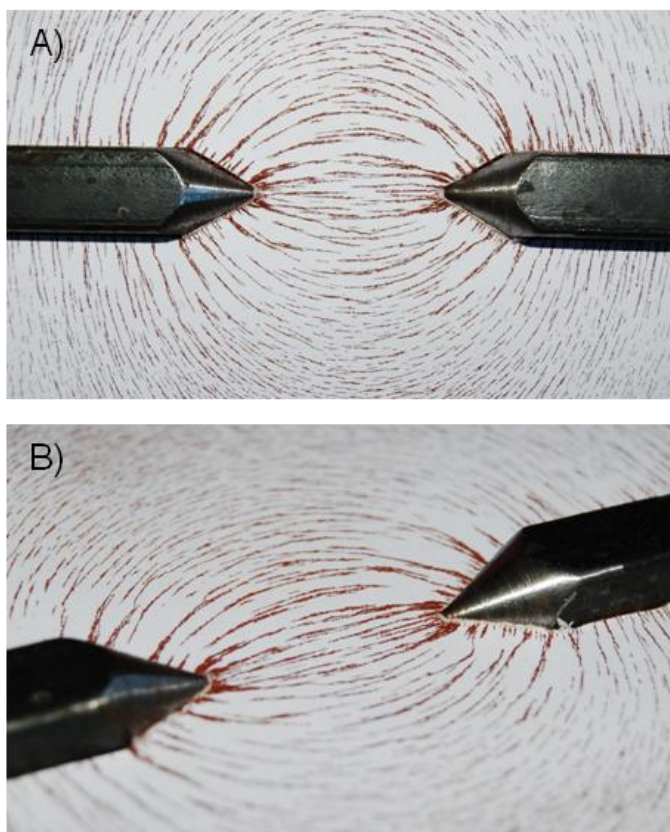


Figura 4.17 - Visualização 2D das linhas de indução geradas pela ponteira Cônica

A ponteira de geometria Cônica foi desenvolvida para observar o comportamento das linhas de indução em uma ponta projetada para frente da superfície da ponteira, formando um único ponto para concentração das linhas de indução.

Ao observar o comportamento da Cunha Vertical, é possível verificar que ocorreu concentração das linhas de indução na ponta da cunha. Na geometria Cônica, o comportamento foi similar, mas aqui a superfície é simétrica em torno do próprio eixo. Sendo assim, teoricamente, ao girar essa superfície ao redor desse eixo paralelo à superfície, a distribuição das linhas de indução não é alterada. A Figura 4.17 mostra que ocorreu alta concentração das linhas na ponta da superfície, revelando seu poder de gerar intensidades de campo magnético maiores nessa região. As partes que não contem pó de ferro na superfície, próximo à ponta do cone, revelam que as partículas migraram para região de intensidade maior como as pontas das geometrias. É possível observar que as linhas entre as pontas estão mais grossas. Esse comportamento mostra que se as partículas em torno da geometria migraram para o centro, então essa região está com maior intensidade do campo magnético do que ao seu redor, logo essa geometria formou uma região linear de maior concentração. Se esse comportamento for confirmado nos outros testes, com essa geometria será possível mirar as linhas de campo de maior intensidade, para que passe perpendicular ao caminho do arco de soldagem.

4.4 – Conclusões Parciais

- As geometrias das ponteiras realmente são capazes de influenciar o formato das linhas de indução, ou seja, as linhas de indução se distribuem de maneiras diferentes em cada par de geometrias;
- Um comportamento comum é que elas tendem a se concentrar mais onde os perfis formam quinas, como nas arestas das geometrias Plana, Cunhas e Torre, ou onde forma ponta, como a geometria Cônica (o comportamento do campo magnético é similar ao campo elétrico no que diz respeito ao poder das pontas).
- As linhas de indução sempre estão saindo ou chegando das geometrias de maneira perpendicular à superfícies e esse comportamento é notado em todas as ponteiras, mas é mais destacado na geometria Calota.

CAPÍTULO V

VISUALIZAÇÃO DAS LINHAS DE INDUÇÃO EM 3D

Neste capítulo são apresentadas as metodologias para visualização tridimensional das linhas de indução geradas por diferentes geometrias de ponteiras, com objetivo de analisar a distribuição das linhas de indução em ponteiras sem eixo de simetria, buscando resultados qualitativos. Serão descritos os equipamentos, os acessórios e os materiais de consumo empregados, bem como a montagem geral dos experimentos para a realização dos ensaios e a discussão dos resultados.

5.1 – Primeira Tentativa de Visualização das Linhas de Indução em 3D

Uma meta proposta nesse trabalho foi tentar desenvolver uma técnica capaz de fazer com que as limalhas ou pó de ferro representassem as linhas de indução em 3D, ou seja, em todo o espaço contido em um volume, e assim observar realmente o comportamento do campo em todas as direções próximas às geometrias.

Para execução desse experimento foram necessários:

- Construção de um recipiente volumétrico;
- Estudar alguma forma de fixar as limalhas, sem que elas caíssem no fundo do recipiente;
- Encaixar e vedar o eletroímã ao recipiente volumétrico, impedindo vazamento.

A primeira idéia para construção do recipiente volumétrico foi a de utilizar um copo grande de vidro, do qual foi retirado o fundo, deixando-o vazado nos dois lados. Foram feitos chanfros retangulares nas faces das duas estremindades do copo (cilindro) para facilitar o encaixe das ponteiros do eletroímã dentro do copo, deixando a distância pré-fixada das faces das geometrias de 30 mm uma da outra. Os cortes feitos no copo foram realizados utilizando-se uma maquina (fitas foram colocadas nas superfícies das arestas cortadas para proteção). A Figura 5.1 mostra como o primeiro recipiente volumétrico ficou depois de produzido.

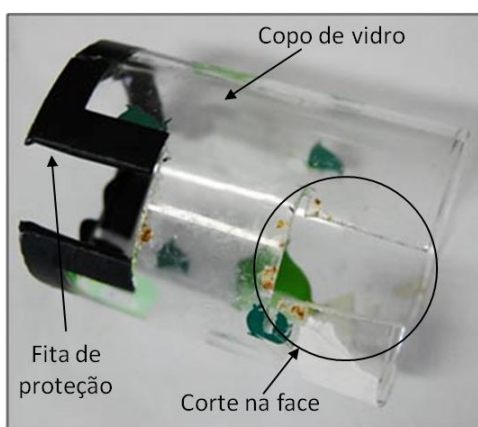


Figura 5.1 - Recipiente volumétrico construído a partir de um copo de vidro, com detalhe para o corte para encaixe do eletroímã e da fita de proteção

A parte mais difícil da visualização em 3D foi a fixação das limalhas de ferro no espaço ao redor das ponteiros. A idéia foi utilizar a gelatina especial Agar Agar, Type I, mostrada na Figura 5.2, (especificações técnicas estão no anexo II). Essa gelatina é muito utilizada na Biologia para cultivo de fungos e foi escolhida por sua consistência e transparência rígida depois de solidificada.

O modo de preparo do Agar Agar consiste em ferver certa quantidade de água, adicionar a quantidade desejada de Agar Agar, misturando até dissolver. Após esfriar o Agar Agar transforma-se em gelatina. Para o trabalho foram realizados três testes de concentração, para observar a opacidade e a rigidez da gelatina:

- a) 0,75 g de Agar Agar para 75 ml de água;
- b) 1,00 g de Agar Agar para 75 ml de água;
- c) 1,25 g de Agar Agar para 75 ml de água.

Na Figura 5.3 é possível observar as duas características. As fotos foram tiradas contra luz para mostrar sua opacidade. Os detalhes de rugosidade na superfície demonstram sua rigidez: quando lisas representa que está rígida e quando rugosa mostra que está quebradiça.



Figura 5.2 - Gelatina Agar Agar, Type I para fixação das limalhas de ferro no espaço volumétrico



Figura 5.3 - Opacidade e rigidez em diferentes concentrações de Agar Agar em água: em A) com concentração de 0,75 g, em B) concentração de 1,00 g e em C) concentração de 1,25 g.

Na concentração de 0,75g de Agar Agar para 75 ml de água, a gelatina ficou transparente, bom para visualizar as linhas, porém não ficou consistente (ela desmanchava ao manuseá-la, tornando imprópria para trabalhar). Na concentração de 1,00g de Agar Agar para 75 ml de água, a gelatina ficou mais opaca que com a menor concentração, dificultando a visualização. A consistência melhorou um pouco, mas seu manuseio tem de ser com cuidado. Na maior concentração de 1,25g de Agar Agar para 75 ml de água, a gelatina ficou opaca, leitosa, ruim para visualização, mas a consistência ficou firme, que seria boa para manuseá-la.

A solução foi produzir a gelatina a uma concentração intermediária entre as duas primeiras condições com 0,80 g de Agar Agar para 75 ml de água, procurando-se manter

um nível de transparência bom para se observar as limalhas dentro da gelatina. A consistência ficou razoável, mesmo que para manuseá-la fosse preciso ter cuidado para não desmanchar nas mãos. Portanto a concentração de 0,80 g de Agar Agar para 75 ml de água foi fixada para todos os experimentos.

A vedação do recipiente foi realizada com borracha de látex. A boca do copo foi selada com esse material, formando uma parede tipo membrana na boca do copo. Em seguida, a ponteira plana (utilizada na primeira tentativa de visualização 2D – Fig. 3.8) foi posicionada na parede da membrana e pressionada de fora para dentro do volume, fazendo com que a membrana envolvesse a ponteira e ficasse isolada de contato direto com a parte interna do copo (Figura 5.6). Dessa forma, pode-se despejar a gelatina líquida ao recipiente para que a mesma ficasse contida dentro do recipiente e moldada pelas ponteiras.

O recipiente foi colocado na posição horizontal, a gelatina ainda na fase líquida e os cavacos foram despejados dentro do recipiente através do corte feito para encaixe do eletroímã. O recipiente é colocado na horizontal e uma parte do recipiente não é preenchida com Agar Agar, formando uma superfície plana na gelatina. No entanto, observou-se que os cavacos, por serem muito densos, decantaram-se imediatamente. O experimento foi repetido, mas somente quando a gelatina começou a enrijecer dentro do recipiente que foi depositado cavacos e misturados, ligando-se o eletroímã, visando o alinhamento. O resultado obtido é mostrado na Figura 5.4.



Figura 5.4 - Gelatina Agar Agar sem visualização das limalhas

A Figura 5.4 está com os cavacos de ferro alinhados. Contudo, a visualização dos cavacos só é possível com iluminação adequada. Para tal, coloca-se um refletor por trás da massa de gelatina, de modo que as imagens capturadas por uma câmera fotográfica posicionada do outro lado fossem a da sombra das limalhas (elas impedem a trajetória da luz), revelando a posição das linhas em forma de sombra, como é mostrado na Figura 5.5. Pela Figura 5.5, pode-se observar que ocorreu uma pequena concentração de cavacos nas arestas da geometria plana. Entretanto, a resolução é muito baixa e as partículas não ficaram bem distribuídas sendo concentradas nas duas extremidades, mesmo que as

partículas tenham sido colocadas com o eletroímã ligado (ao atravessar as duas ponteiras as partículas eram puxadas para ponteira mais próxima).



Figura 5.5 - Resultado obtido com a primeira tentativa de visualização 3D, utilizando gelatina a base de Agar Agar e cavacos de aço

O experimento foi conduzido para se testar o comportamento e a distribuição das limalhas dentro do recipiente com Agar-Agar e verificar se seria possível demonstrar esse comportamento de forma tridimensional.

O objetivo de se fazer as partículas pararem no meio do volume foi alcançado.

O experimento foi realizado de maneira simples, como pode ser visto na Figura 5.6. Contudo, para aperfeiçoar as visualizações das linhas em 3D, foi proposta a construção de outro recipiente.

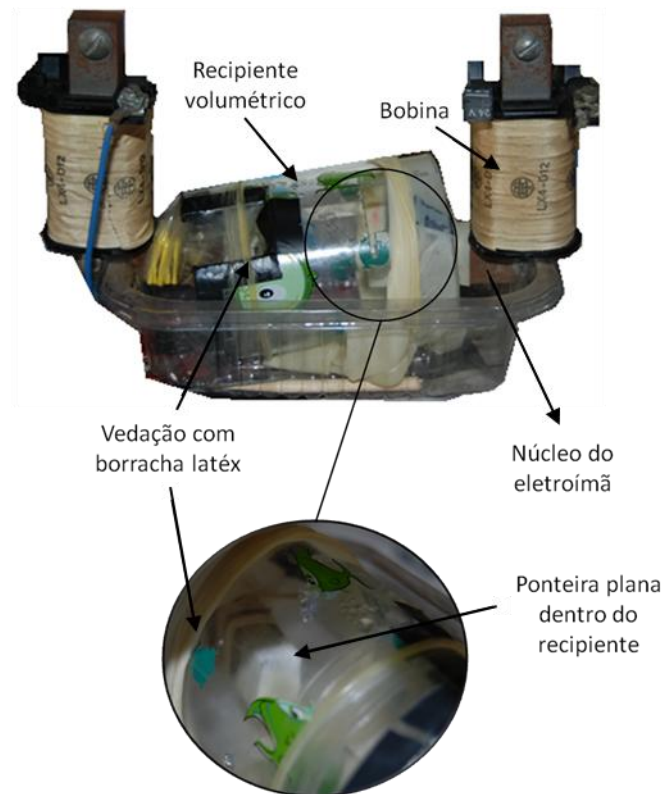


Figura 5.6 - Visualização da montagem do recipiente com eletroímã

5.2 – Segunda Tentativa para Visualização das Linhas de indução em 3D

5.2.1 – Projeto, Fabricação e Montagem do Recipiente Volumétrico (“aquário”)

O primeiro passo no sentido de aperfeiçoar a técnica foi construir outro recipiente volumétrico. Em substituição ao copo de vidro, foi usado um tubo de acrílico transparente com diâmetro de 50 mm, comprimento de 112 mm e paredes de 3,5 mm de espessura. Na face externa do cilindro foi realizado um furo para despejar o fluido e as partículas de ferro (foi fabricada uma tampa para permitir agitação do tubo sem que ocorresse vazamento do fluido com partículas de ferro). Para tampar as duas extremidades do tubo, foram ainda confeccionadas duas placas quadradas do mesmo (77 x 77 mm e 3,5 mm de espessura). Detalhes na Figura 5.7. As placas receberam um furo quadrado no centro, com dimensões mais próximas possível da seção transversal das ponteiras. Na borda do cilindro foi fixado um o’ring para fazer a vedação com as placas. E em cada vértice um furo de 5 mm. A Figura 5.8 dá os detalhes destes componentes.

A montagem do recipiente volumétrico, que doravante vai ser referenciado como “aquário”, se dá pelo posicionamento das placas laterais nas extremidades do tubo e uma compressão delas ao tubo por meio de 4 barras rosqueadas interligando os furos do vértice

das placas. Anéis do tipo “o’ring” interpõem as placas laterais e o tubo para evitar vazamento.

Veja detalhes na Figura 5.8 do aquário depois de fabricado.

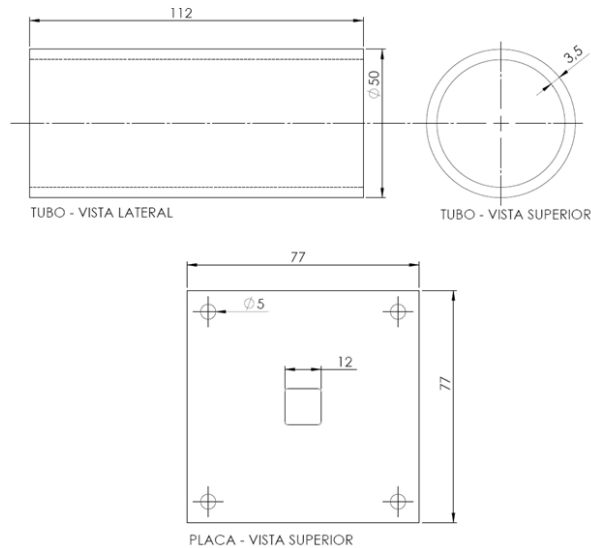


Figura 5.7 - Dimensões do Aquário

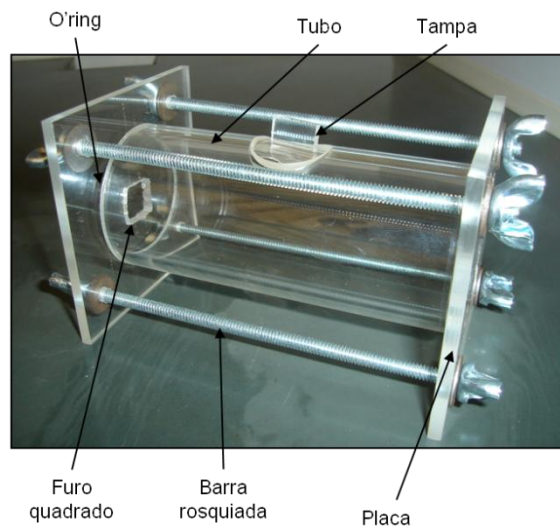


Figura 5.8 - O “Aquário” para visualização em 3D das linhas de indução

As ponteiros foram inseridas dentro do aquário através dos furos quadrados nas placas, como ilustrado na Figura 5.9. A primeira tentativa de selar contra vazamento foi com cola quente, mas devido à falta de aderência com a superfície lisa do acrílico, a cola se soltava e ocorria vazamento, atrapalhando o experimento. Trocou-se a cola quente por cola de silicone, mas antes da aplicação, lixou-se a região em torno do furo quadrado criando rugosidade para melhor aderência do silicone.

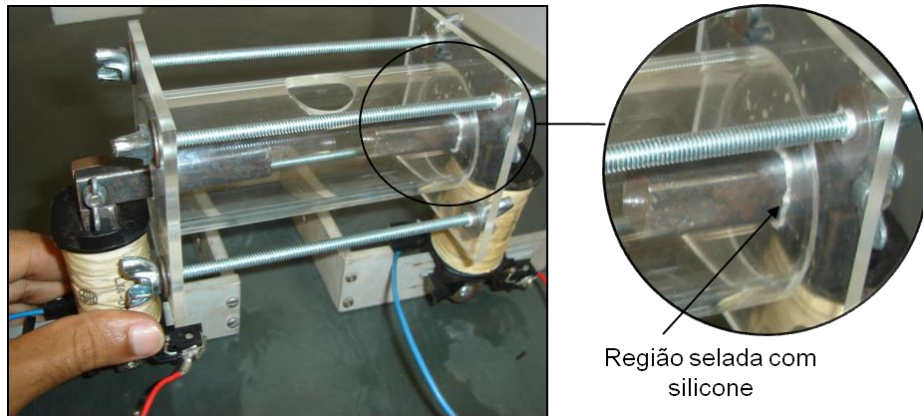


Figura 5.9 - Posição do eletroímã dentro do aquário, detalhe na região de selamento com silicone

5.2.2 – Primeira avaliação do sistema usando Agar Agar como meio de fixação da partícula de ferro

O primeiro passo para realizar o experimento da segunda tentativa de visualização foi repetir o mesmo processo utilizado na primeira tentativa de visualização 3D, com as mesmas concentrações de Agar Agar. Porém, passou-se a utilizar pó de ferro no lugar da limalha para melhorar a resolução das linhas. Além disso, passou-se a usar sempre uma mesma quantidade de pó de ferro para todas as visualizações, misturando-se o pó à gelatina de Agar Agar sempre em uma mesma temperatura e observando-se o início do enrijecimento da gelatina para ligar o eletroímã.

Para monitoramento da temperatura do Agar Agar em sua transformação em gelatina foram avaliados o uso de dois equipamentos, termopar e pirômetro. A vantagem do termopar é que ele fica em contato direto com o material, sendo possível verificar a temperatura dentro da gelatina. Porém, essa vantagem se transforma em desvantagem na hora de retirá-lo de dentro do aquário, pois ao esbarrar nas partículas magnetizadas altera a direção das mesmas. O pirômetro mede a temperatura opticamente, e a dúvida seria se este método sofre interferência de medida devido à, reflexão, refração ou difração do raio óptico do pirômetro quando apontado para uma superfície translúcida.

Alguns testes comparativos da eficiência dos dois métodos foram feitos. Inicialmente colocou-se água refrigerada no aquário e mediu-se a temperatura com o pirômetro, apontando para a superfície de água, e com o termopar, colocado dentro do aquário. A leitura do pirômetro foi de 10 °C e a leitura do termopar foi de 11 °C. Em seguida, apontou-se o pirômetro para a superfície externa do tubo do aquário, quando o valor medido foi de 20 °C. Observando-se que o valor medido da água refrigerada foi muito próximo, conclui-se que os dois instrumentos mediram corretamente a temperatura dentro de um erro admissível (ao medir a temperatura externa do aquário provou-se que, mesmo sendo a superfície do aquário translúcida para o olho humano, ao mesmo tempo ela é opaca para o comprimento de onda de trabalho do pirômetro, portanto medindo a temperatura externa do aquário). Em função desses testes e da praticidade, optou-se pelo uso do pirômetro, mas apontando-se para a gelatina e não para o recipiente.

Uma vez definida a metodologia de preparo da gelatina, foram realizados alguns pré-testes no aquário, seguindo-se os seguintes passos:

- Foram colocados 150 ml de água para ferver;
- Durante a fervura da água, foi colocado 1,6 g de Agar Agar, misturando-se por aproximadamente 1 minuto;
- Retirou-se do fogo e continuou-se misturando até atingir 50°C, adicionando-se em seguida 1,5 g de pó de ferro;
- Agitou-se bem a mistura e despejou-se a mesma no aquário;
- Adicionou-se mais um pouco de pó de ferro diretamente no aquário (o motivo será explicado mais a frente);
- Ao atingir 30°C (quando a gelatina começava a enrijecer), agitava-se o aquário contendo a solução e ligava-se o eletroímã.

O resultado do pré-teste, após a gelatina ter se enrijecido, foi que uma grande quantidade de pó aderiu às ponteiros de forma a cobrir completamente suas superfícies, outra grande quantidade de pó ficou no fundo do aquário e apenas uma pequena quantidade forneceu o resultado desejado, que era permanecer entre e ao redor das duas ponteiros. Alguns limitantes foram observados durante o teste, a saber: a) visualização dos pós dentro da gelatina devido à coloração da mesma (o pó de ferro utilizado foi fabricado para realizar ensaio não destrutivo de partículas magnéticas, possuindo um corante para dar contraste com a peça a ser analisada, que durante o teste tingiu a água formando uma gelatina vermelha). Portanto, para a realização dos próximos testes, o pó de ferro teve que ser lavado até que se retirasse todo seu pigmento; b) decantação do pó de ferro por ser muito denso, mesmo sob muita agitação da solução. Como solução, o pó de ferro (1,5 g) passou a ser despejado diretamente dentro do aquário e não misturado com a gelatina; c) preenchimento incompleto do aquário (evaporação de uma quantidade apreciável da água, aproximadamente 50 ml, durante o processo de fervura). Para resolver o problema, passou-se a preparar a gelatina com 200 ml de água.

5.3 – Terceira Tentativa para Visualização das Linhas de indução em 3D

As seguintes condições foram utilizadas na terceira tentativa: 200 ml de água para preparação do Agar Agar 1,6 g (mantendo-se os mesmos tempos de fervura e mistura do produto) para preencher completamente o aquário (persistiu apenas uma pequena bolha de ar devido ao furo lateral no cilindro do aquário); O pó de ferro foi previamente despigmentado e despejado diretamente no aquário (e não já misturado), evitando decantação no fundo do recipiente de fervura da água;

O resultado da terceira tentativa de teste é mostrado na Figura 5.10. Pode-se observar que ocorreram melhorias em algumas condições, pois conseguiu-se a quantidade exata de pó de ferro desejado, obteve-se o preenchimento completo do aquário, e o pó não soltou pigmento na gelatina. Entretanto, o acomodamento do pó de ferro dentro da gelatina ainda não ocorrera de forma desejada, pois, como observado na Figura 5.10, grande parte do pó grudou nas ponteiras, uma pequena quantidade decantou-se, e só uma pequena parte ficou entre as ponteiras (nas imagens (e), (f), e (g) pode-se observar uma pequena quantidade de pó de ferro entre as ponteiras, formando uma linha em forma de arco, que é desejado no experimento, pois com várias linhas, seria possível observar o local onde ocorre a maior concentração no espaço). Nesse teste não foi possível tirar conclusões da concentração das linhas no espaço entre as ponteiras, somente nas superfícies das mesmas onde houve mais concentração nas arestas das geometrias.

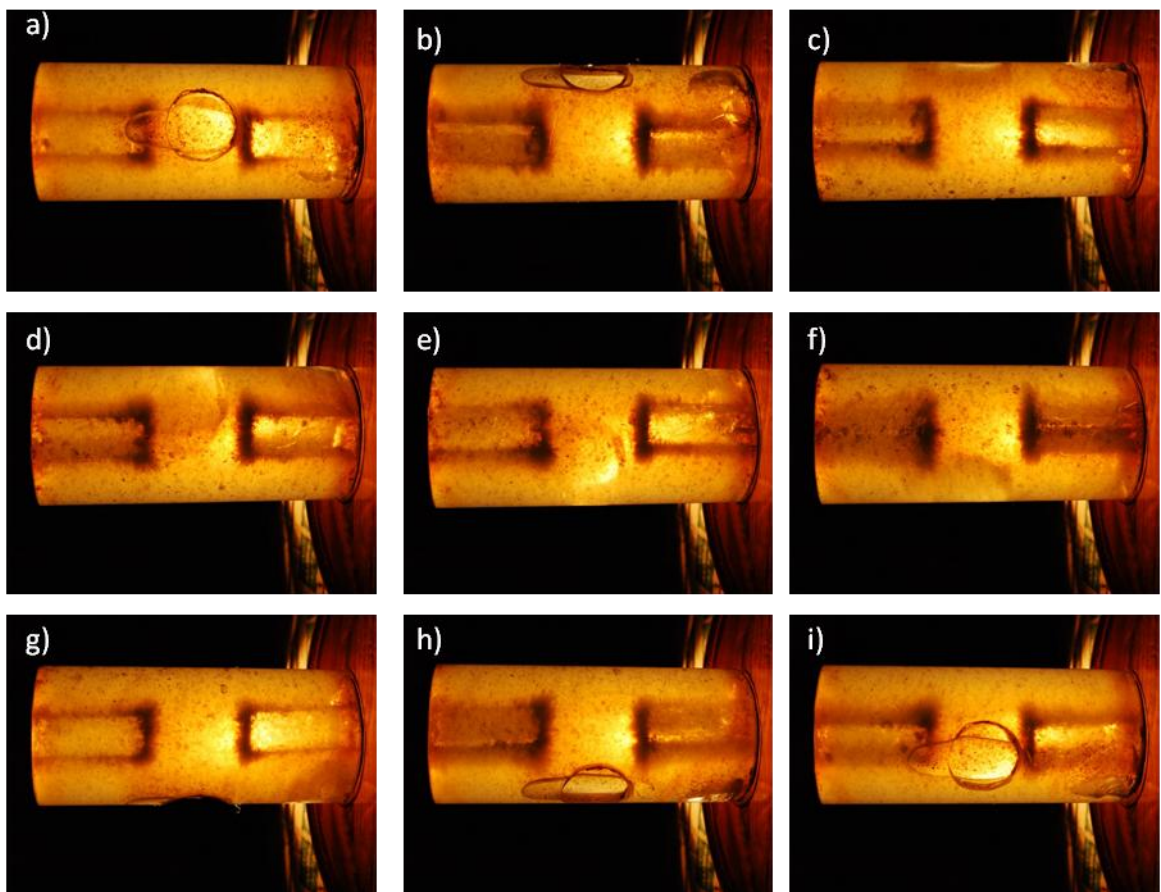


Figura 5.10 - Distribuição do pó de ferro na terceira tentativa de visualização das linhas de indução em 3D (de “a” até “i” foi girada 360° de forma não equidistante)

5.4 – Quarta Tentativa para Visualização das Linhas de indução em 3D

Na tentativa de melhorar o resultado da visualização, foram propostas e testadas várias substâncias para substituir a gelatina de Agar Agar, visto que era impossível ligar o eletroímã na hora exata que ela enrijecesse, pois esse processo de enrijecimento gastava aproximadamente 10 min (impossibilitando fixar as partículas entre as ponteiras).

Foi proposto substituir o Agar Agar por um líquido viscoso, com intenção de que o movimento das partículas de ferro fosse lento suficiente para observar a orientação das partículas antes que elas aderissem à superfície do eletroímã. Tentou-se primeiramente preencher todo o volume do aquário com detergente neutro. Ao ligar o eletroímã e despejar a quantidade de pó de ferro desejado, observou-se que todo o pó de ferro deslocava rapidamente em direção às ponteiras, não formando linhas de indução. Ou seja, o detergente não funcionou como esperado.

Tentou-se, então, utilizar resina epóxi. Esta resina sem o catalisador é um líquido mais viscoso que o detergente neutro. Mas o resultado foi similar ao com detergente, mas com um pequeno progresso, pois foi possível observar a formação de algumas linhas durante a trajetória das partículas na direção da superfície das ponteiras. Este resultado, mesmo que ainda insuficiente para os objetivos, mostraram que a idéia de aumentar a viscosidade do fluido era correta. Porém, observou-se que só a viscosidade não seria capaz de fazer as partículas de ferro parar entre as ponteiras, pois sempre a partícula de ferro estaria submetida a uma força magnética maior quanto mais próximo do eletroímã, como na demonstrado na situação hipotética ilustrada Figura 5.11. Desta forma, um líquido mais viscoso só seria capaz de retardar o movimento da partícula até a superfície do eletroímã, mas não de impedi-lo de estacionar entre duas ponteiras, pois a força resultante maior junto às ponteiras continua existindo ao longo do tempo.

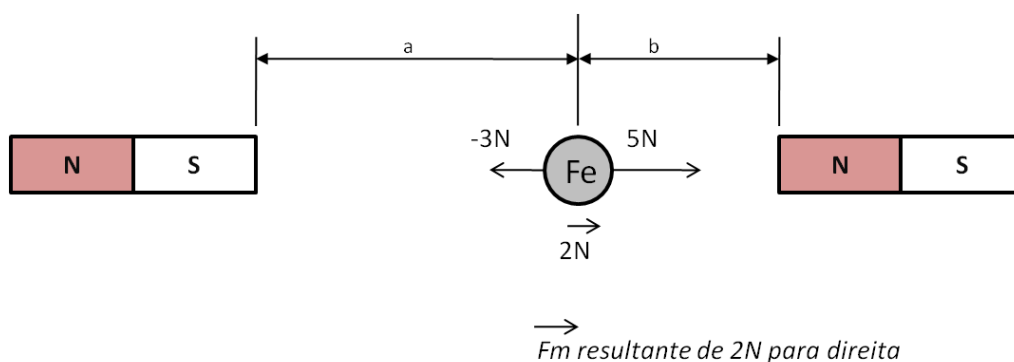


Figura 5.11 - Exemplo de uma força resultante provocando deslocamento da partícula até o eletroímã

A solução proposta foi a de encontrar uma substância capaz de impor uma resistência maior ao movimento, da mesma forma de que o atrito estático impede o movimento de um elemento sob ação de uma determinada força. A substância deveria restringir o movimento quando a partícula fosse submetida a uma força resultante pequena. Com essa idéia, foi testado preencher o aquário com colóide em forma de gel. O produto testado para tal foi o álcool etílico em gel, pela sua consistência e disponibilidade.

Além da troca do líquido, para aperfeiçoar a visualização das linhas de indução, substituiu-se o pó de ferro por pequenos filamentos de aço (ferromagnéticos) como partículas magnetizáveis. Para tal, cortou-se fio de 0.5 mm de diâmetro em tamanhos de aproximadamente 2 mm cada. A intenção seria de esses pequenos cilindros, além de não se moverem até os pólos do eletroímã, eles deveriam alinhar-se às linhas de indução.

Em termos experimentais, primeiramente despejou-se o álcool em gel dentro do aquário até completar seu volume. Em seguida, adicionou-se 1 grama dos pequenos cilindros magnetizáveis, usando um bastão de madeira para dispersá-los no líquido antes de se ligar o eletroímã. O resultado mostrado na Figura 5.12, nos apresenta que:

- a) as partículas ficaram suspensas no colóide antes do acionamento do eletroímã;
- b) ao se ligar o eletroímã, as partículas se alinharam paralelamente as linhas de indução;
- c) o álcool em gel mostrou-se translúcido suficiente para a visualização das partículas de ferro;
- d) as partículas magnetizáveis podem ser recuperadas ao se separá-las do álcool em gel, lavadas e secadas (retira-se o álcool do aquário e deposita-se o mesmo sobre uma flanela para agir como uma peneira fina ao utilizar água corrente).

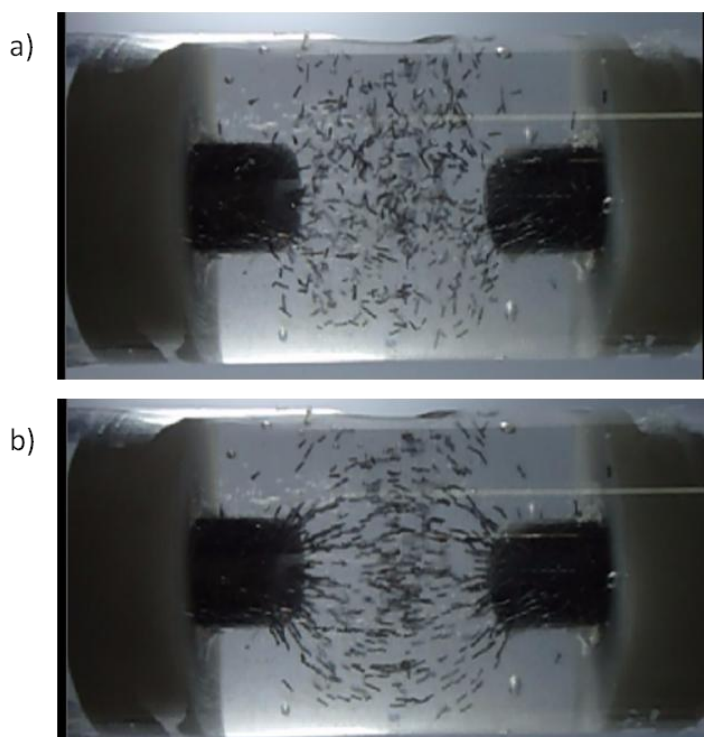


Figura 5.12 - Visualização das partículas magnetizáveis suspensas em álcool em gel: a) eletroímã desligado; b) eletroímã ligado

É importante ressaltar que as partículas magnetizáveis também ficaram sujeitas à força gravitacional e à força magnética resultante com sentido à ponteira mais próxima, mas estes efeitos não foram capazes de vencer o atrito gerado pelo álcool em gel (somente as partículas que estavam entre uma distância de aproximadamente 0 a 10 mm das ponteiros foram arrastadas para a superfície da ponteira mais próxima). Dessa forma, considerou-se que o procedimento da quarta tentativa mostrou-se adequado para se visualizar o campo magnético em 3D.

5.5 – Visualização do Efeito da Geometria das Ponteiros em 3D Utilizando a Técnica Álcool Gel – Partículas Magnetizáveis em Forma de Pequenos Cilindros

As Figura 5.13 a Figura 5.17. apresentam distribuição das linhas de indução de forma 3D, pela técnica desenvolvida neste trabalho. Em cada figura, é apresentada uma sequência de fotos mostrando o aquário sendo girado em 360°, permitindo verificar as alterações espaciais das linhas de indução para as diferentes ponteiros.

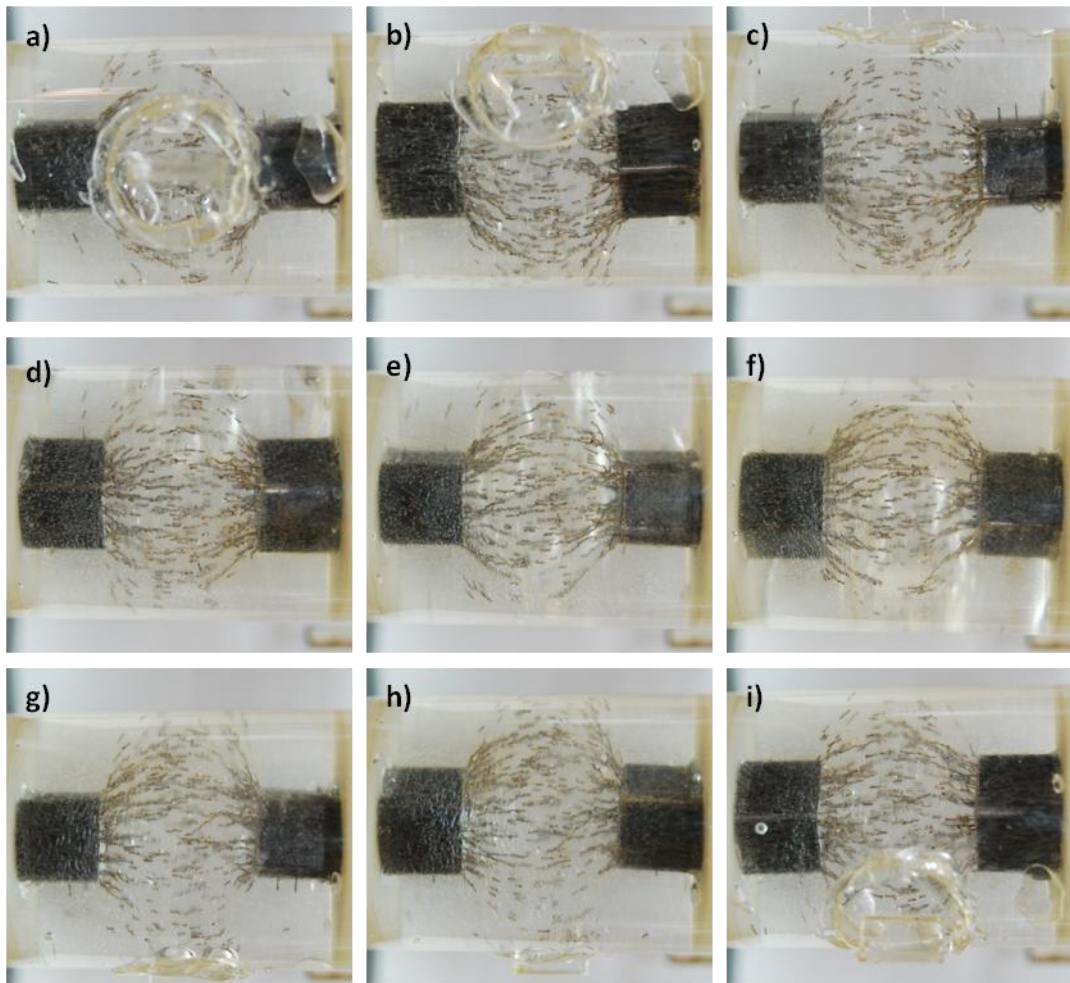


Figura 5.13 - Visualização em 3D das linhas de indução geradas pela ponteira Plana: de (a) até (i) se apresenta a vista por diferentes ângulos, durante um giro de 360°

A ponteira plana demonstrou manter de todos os ângulos de visão o comportamento da visualização em 2D, ou seja, a tendência das linhas ficarem paralelas e eqüidistantes em regiões centrais das superfícies das ponteiras e ocorrendo uma pequena concentração das linhas nas arestas das geometrias. Também fica possível observar que, pelas posições (b) (parte inferior da ponteira direita), (e) (parte superior da ponteira esquerda) e (f) (parte superior da ponteira esquerda), que ocorre uma concentração de linhas de indução nas quinas das ponteiras, um pouco maior que nas suas arestas, relativo ao poder das pontas.

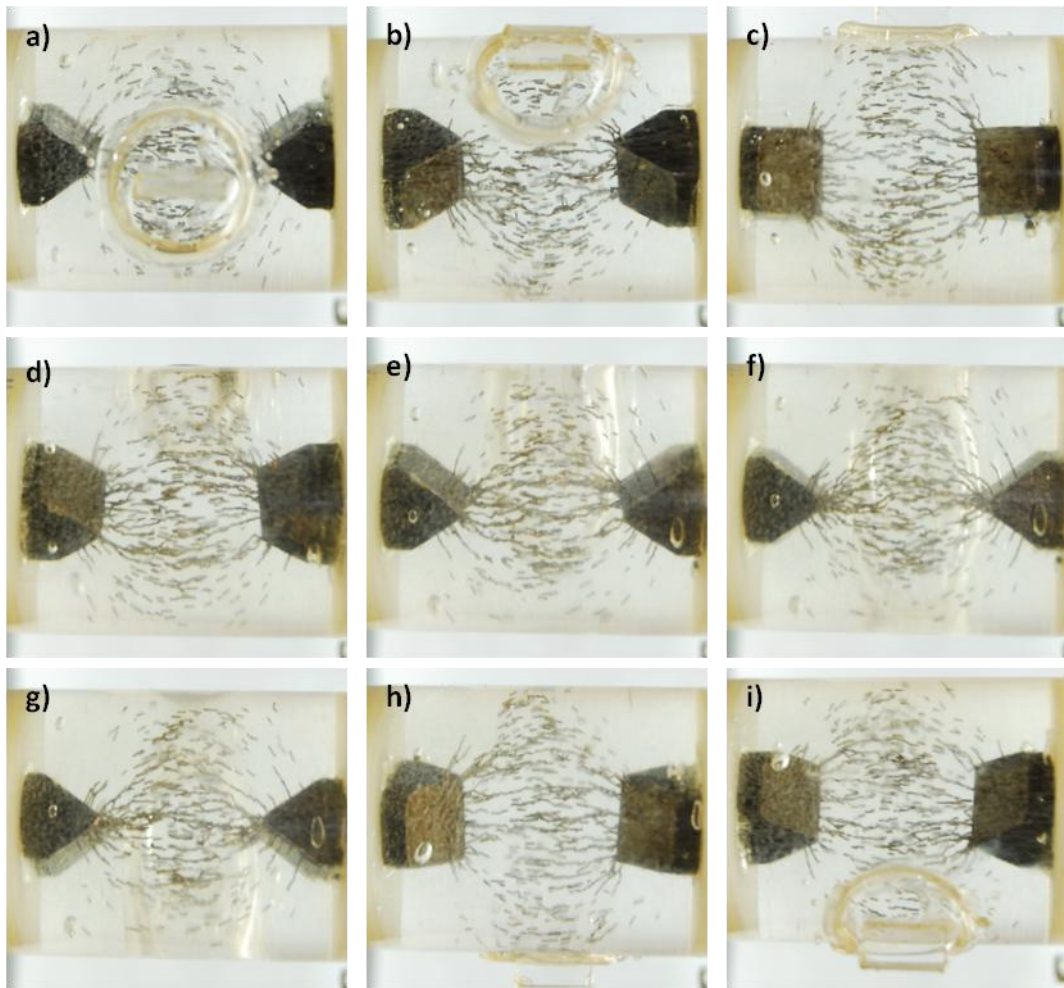


Figura 5.14 - Visualização em 3D das linhas de indução geradas pela ponteira Cunha: de (a) até (i) se apresenta a vista por diferentes ângulos, durante um giro de 360°

Ao utilizar a técnica de visualização em 3D com o uso da ponteira Cunha, esta geometria de ponteira demonstrou comportamentos importantes da distribuição das linhas, como é observado nas posições (c) e (h) (linha da cunha paralela ao plano de visão), onde as linhas se encontram bem distribuídas, seguindo a tendência de paralelismo entre as faces e em forma de arco ao se afastarem das ponteiras. Entretanto, à medida que as ponteiras vão girando e as arestas das cunhas ficam perpendiculares ao plano de visão (posições (e), (f) e (g)), percebe-se uma concentração de linhas de indução no plano da cunha. Nas posições (c) (parte inferior direita) e (h) (parte superior direita), nota-se o comportamento de maior concentração das linhas nas quinas da cunha, também notada na visualização em 2D, mostrando a concentração das linhas de indução nas regiões de quinas.

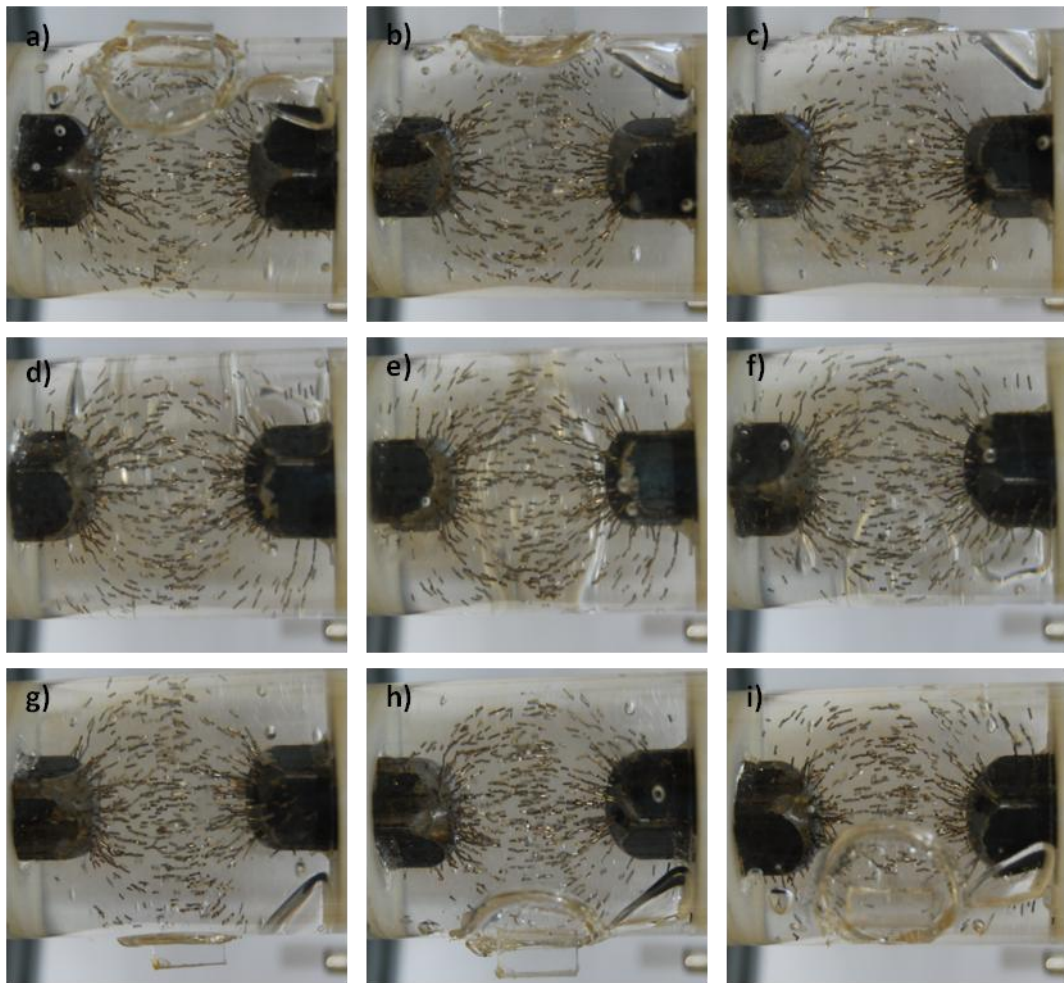


Figura 5.15 - Visualização em 3D das linhas de indução geradas pela ponteira Calota: de (a) até (i) se apresenta a vista por diferentes ângulos, durante um giro de 360°

Na Figura 5.15 têm-se a impressão de que há mais partículas magnetizáveis do que nas ponteiros plana e calota (na verdade, foi utilizada a mesma quantidade de partículas em todas os experimentos). Por essa geometria possuir simetria, os resultados obtidos são semelhantes à visualização em 2D, mas em 3D foi possível perceber que as partículas mais próximas se deslocaram em direção às ponteiros mais próximas, formando um amontoado de partículas junto à superfície. Na região de separação das duas ponteiros, percebe-se que as partículas apenas sofreram um giro, mas que não saíram de seu lugar, comportamento bem visível na posição (c).

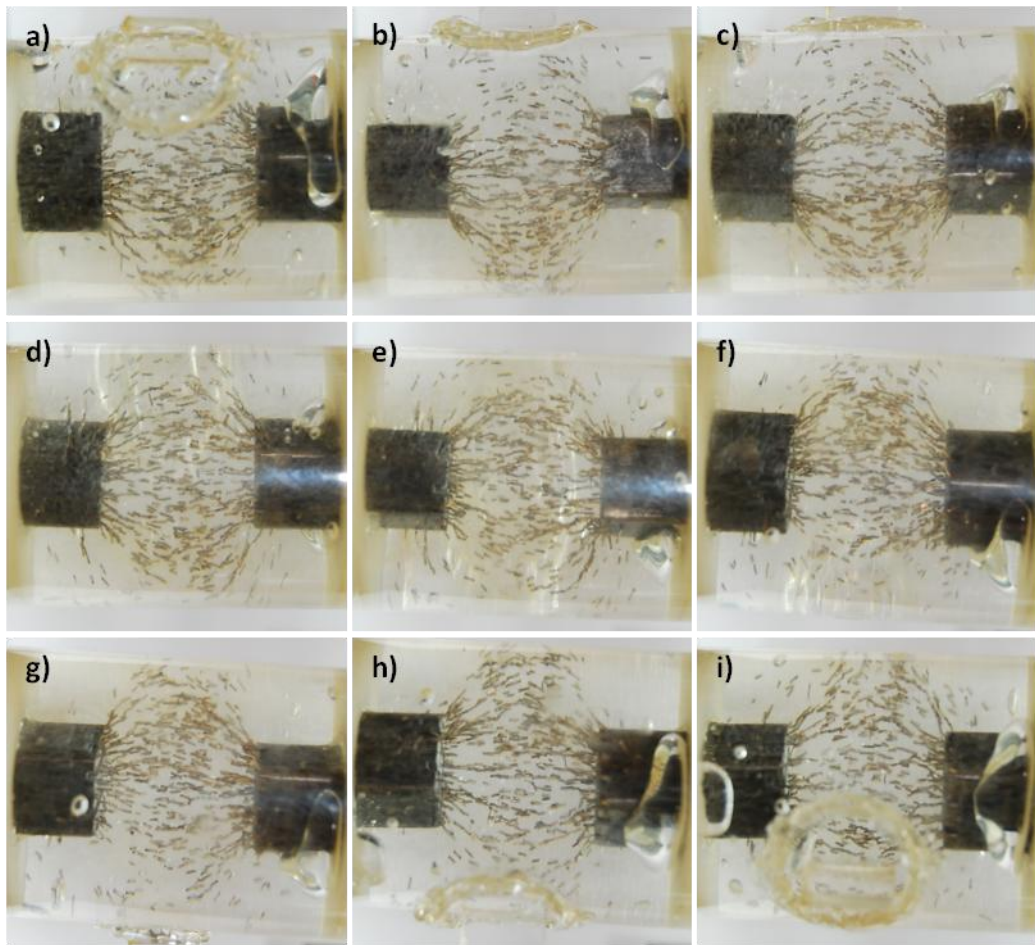


Figura 5.16 - Visualização 3D das linhas de indução geradas pela ponteira Torre

Para a ponteira Torre, a distribuição de linhas em 3D mostra muita semelhança com a ponteira plana, também ocorrendo a formação de linhas paralelas e equidistantes presentes entre as ponteiras, linhas em forma de arco (onde o raio vai diminuindo a medida que se distancia do centro) e também uma leve concentração de linhas nas arestas e nas quinas externas da ponteira. Essa técnica não forneceu detalhe suficiente para uma análise ideal da face chanfrada da geometria Torre, pois o tamanho das partículas magnetizáveis são da mesma ordem de grandeza que os chanfros (o resultado obtido ficou similar ao conseguido com a geometria Plana).

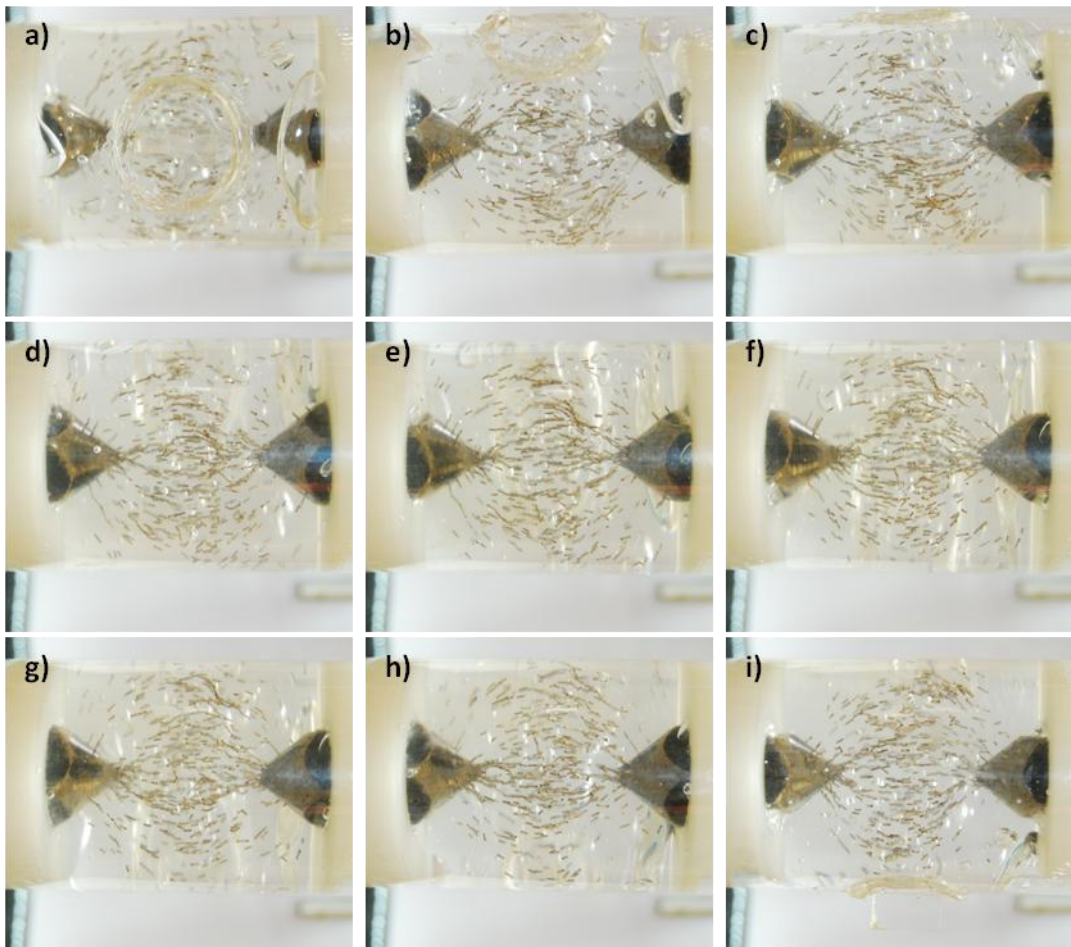


Figura 5.17 - Visualização em 3D das linhas de indução geradas pela ponteira Cônica: de (a) até (i) se apresenta a vista por diferentes ângulos, durante um giro de 360°

Como a ponteira de geometria Cônica possui simetria com o eixo de rotação das posições, o resultado obtido foi similar ao conseguido na visualização 2D. Na ponta da superfície Cônica ocorre um agrupamento das partículas, demonstrando que a intensidade do campo magnético próximo a ponta é maior que no restante da superfície. Na região central entre as duas pontas acontece a formação de uma linha central com maior número de partículas de ferro do que nas regiões ao seu redor (posição D e H).

5.6 – Técnica de Deposição Sobre as Faces das Ponteiras - Visualização Complementar das Linhas de indução em 3D

A técnica de deposição sobre as faces de geometria foi desenvolvida com o objetivo de detalhar e complementar os resultados obtidos no experimento de visualização 2D e 3D, ajudando na interpretação dos resultados em regiões não detalhadas nessas técnicas de

visualização. Essa técnica consiste na deposição de pó de ferro diretamente sobre a superfície das geometrias das ponteiras, usando-se como anteparo para o excesso de pó uma plataforma, como ilustrado na Figura 5.18. Esta plataforma foi construída de cartolina branca nas dimensões de 150 x 150 mm, com um recorte quadrado no centro nas dimensões das ponteiras (12,6 x 12,8 mm aproximadamente). A posição da ponteira teve que ser alterada para realização dessa técnica, ficando a mesma na posição vertical e colinearmente com o núcleo do eletroímã (a 15 mm para cima da superfície da plataforma de anteparo). O uso de pó de ferro se justifica pela pequena granulometria, aumentando a resolução de visualização das linhas.

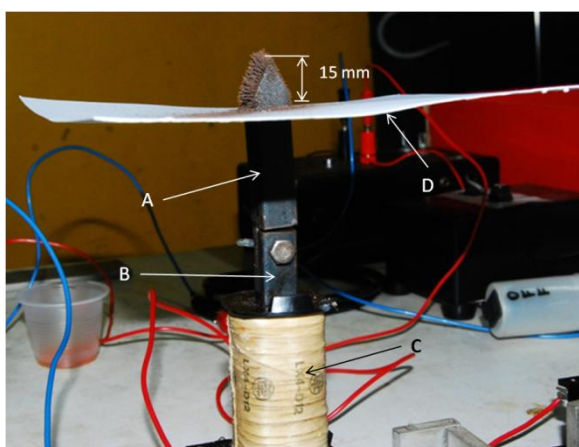


Figura 5.18 - Montagem da técnica de deposição sobre a face das ponteiras:
A - ponteira; B – Núcleo; C – Bobina; D – Plataforma de anteparo

Para efetuar a deposição de forma homogênea do pó de ferro, foi utilizada a técnica do chuveiramento, a mesma utilizada na distribuição do pó na visualização em 2D. Depois de depositada a quantidade de 0,3 gramas de pó de ferro sobre as superfícies das geometrias, foi possível observar com detalhe os locais de acúmulo de pó de ferro, regiões de formação de linhas de indução com maior intensidade de campo magnético.

Essa técnica foi desenvolvida primeiramente para melhorar a visualização das linhas na geometria torre, mas devido o detalhamento alcançado, foi aplicada para todas as superfícies. Os resultados da aplicação da técnica em todas as geometrias de ponteiras são mostrados nas Figura 5.19 a Figura 5.23.

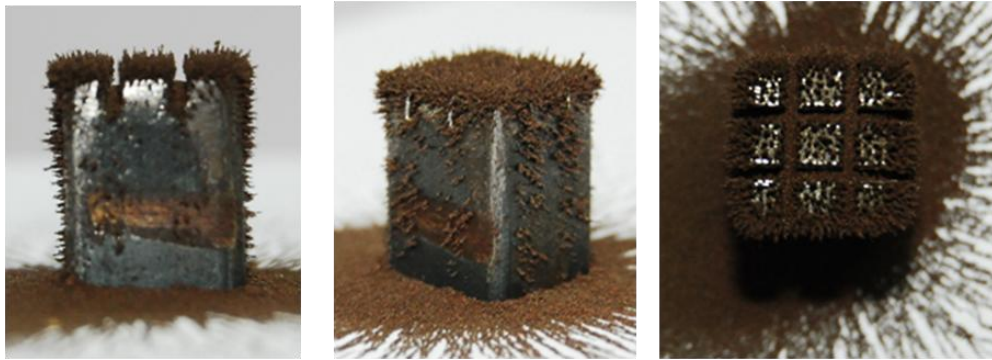


Figura 5.19 - Aplicação da técnica de deposição sobre a face na ponteira Torre

A deposição na ponteira Torre revelou distribuição das linhas de indução em sua superfície. É possível verificar que as linhas se concentram mais nas arestas externas da geometria, enquanto que na aresta interna só se verifica uma quantidade de linhas uniformes distribuídas sobre ela. Dentro de cada chanfro não se verifica partículas magnetizáveis influenciadas pela força magnética (houve apenas assentamento de partículas dentro das arestas, não se verificando alinhamentos, que foi o comportamento comum ao redor da ponteira). Essa falta de partículas de ferro imantadas dentro dos chanfros reforça a idéia concluída na visualização em 2D, onde verifica-se a falta de campo (ou campo muito pequeno) dentro dos chanfros, devido à mesma polarização em toda a face da geometria torre.



Figura 5.20 - Aplicação da técnica de deposição sobre a face na ponteira Plana

A técnica de deposição sobre a ponteira Plana mostra a preferência das partículas se acomodarem nas arestas e regiões de quinas, que geram intensidade magnética maior. Ressalta-se que as três fotos foram tiradas do mesmo experimento, e a aparência de superfície cheia na primeira e na segunda posição e de superfície vazia na terceira posição se trata de ângulo de visão. Na segunda posição nota-se que na aresta vertical da ponteira, também ocorre aderência de partículas devido à intensidade do campo magnético.

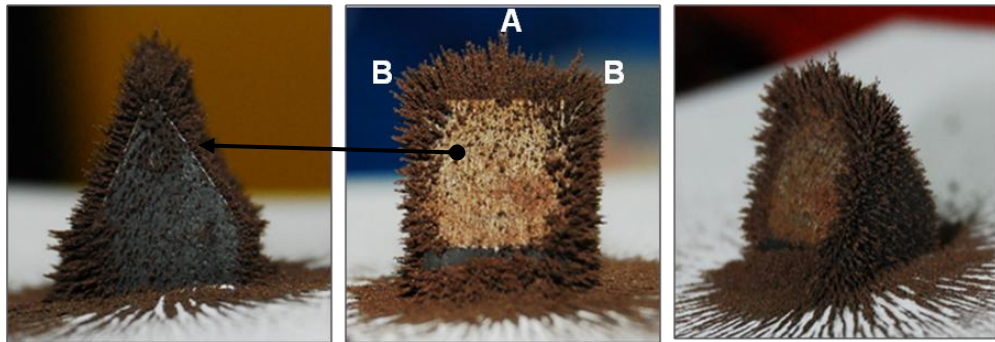


Figura 5.21 - Aplicação da técnica de deposição sobre a face na ponteira Cunha: A – aresta superior; B – quinas

Na ponteira cunha, a técnica revela novamente o poder das quinas em gerar linhas concentradas. Na face plana da Cunha quase não houve aderência de pó de ferro, enquanto na aresta e nas quinas ocorreram aderências das partículas. A aresta superior da Cunha (indicada pela letra A na Figura 5.21) acarretou em alta concentração das linhas. A altura em que as partículas foram “empilhadas” em princípio sugere a intensidade da força magnética comparativamente entre regiões. Assim, neste caso, na região central da aresta superior da Cunha, a altura de empilhamento das partículas ficou maior do que na quinas (letra B na figura), mas devido aos resultados das outras visualizações, pode-se afirmar que nas quinas a intensidade do campo é maior que na aresta superior.

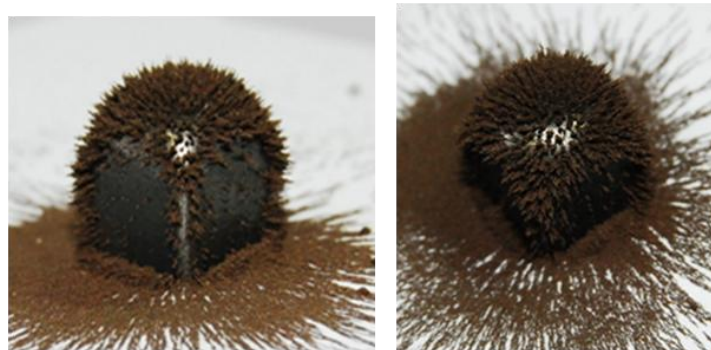


Figura 5.22 - Aplicação da técnica de deposição sobre a face na ponteira Calota

A Figura 5.22 mostra que a superfície calota é a única que não demonstrou pontos de acumulação de linhas (em toda sua superfície as linhas são igualmente distribuídas). A altura do “empilhamento” das partículas magnetizáveis também é homogênea, justifica-se esta ocorrência pela falta de arestas e quinas nesta geometria.

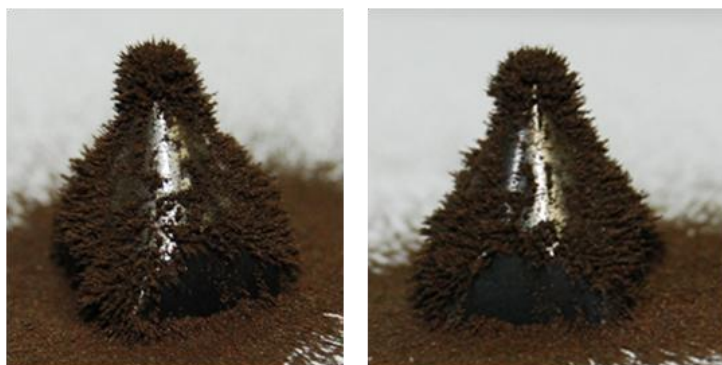


Figura 5.23 - Aplicação da técnica de deposição sobre a face na ponteira Cônica

Finalmente, a deposição de partículas sobre a ponteira Cônica revela a concentração das linhas na ponta da superfície, enquanto na superfície lisa da geometria ocorre pouca aderência das linhas. E esse resultado confirma que a extremidade da geometria cônica possui intensidades magnética bem maior que no restantes de sua superfície.

5.7 – Conclusões Parciais

Os experimentos mostraram que é possível mostrar a distribuição de força no espaço e não somente em uma superfície. Esse tipo de visualização em 3D é uma novidade em termos de trabalho, pois não foi encontrado em livros didáticos e trabalhos científicos algo que demonstrasse a distribuição das linhas de indução gerada por um eletroímã em um espaço tridimensional.

A distribuição das linhas na visualização 3D mostrou-se similar ao observado em 2D para as geometrias com eixo de simetria, como Calota e Cônica, mas mostrou comportamentos importantes ao analisar as geometrias sem eixo de simetria, como Plana, Torre e Cunhas.

A Técnica de deposição mostrou detalhes na superfícies das ponteiras que não eram perceptíveis na utilização do aquário.

Com os resultados da aplicação das três técnicas é possível montar um perfil qualitativo do comportamento das linhas de indução geradas com cada ponteira, como ilustrado na Figura 5.24 para o caso da ponteira Cônica (a simbologia “x” significa que o vetor campo magnético está entrando na superfície do papel). Figura 5.25 ilustra estes perfis para as demais geometrias de ponteiras.

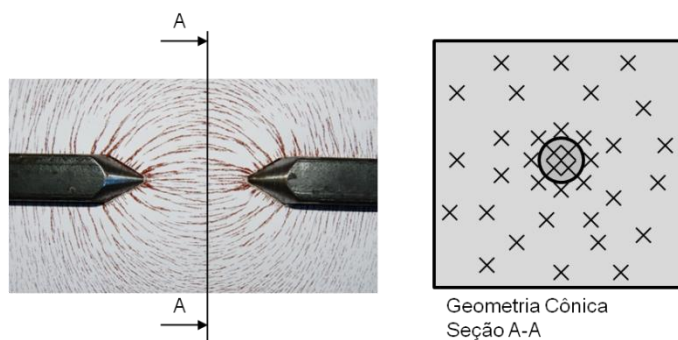


Figura 5.24 - Perfil das linhas de indução num plano transversal entre as duas ponteiros Cônicas

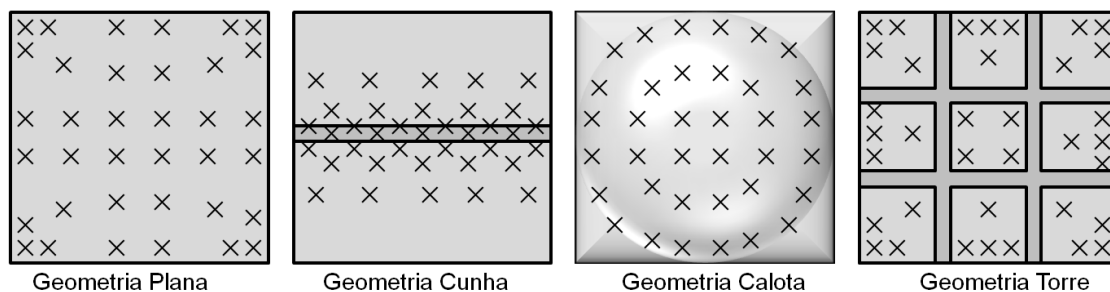


Figura 5.25 - Perfil das linhas de indução num plano transversal entre diferentes as ponteiros

Destes perfis, conclui-se que:

- Geometria Cônica: forma um eixo central entre as duas ponteiros com maior números de partículas magnetizadas alinhadas, mostrando que as linhas tendem a formar uma região linear de maior intensidade;
- Geometria Plana: bem distribuídas, com concentração das linhas de indução nas arestas e quinas;
- Geometria Cunha: as linhas tendem a formar um plano com maior densidade;
- Geometria Calota: por falta de arestas a distribuição fica homogênea;
- Geometria Torre: as linhas se concentram mais nas arestas e quinas externas do que nas internas.

CAPÍTULO VI

MAPEAMENTO DA INTENSIDADE DO CAMPO MAGNÉTICO ENTRE AS PONTEIRAS

Neste capítulo é apresentada a metodologia para a realização da quantificação do campo magnético gerados pelas diferentes geometrias de ponteiras, com objetivo de medir a intensidade do campo magnético em torno das ponteiras

6.1 – Equipamentos e Bancada

Para quantificar a intensidade do campo magnético, foi utilizado um equipamento capaz de medir a intensidade do campo magnético por meio de uma sonda de efeito Hall (HALLIDAY et al, 2003, define didaticamente o efeito Hall). O Teslômetro e sonda Hall utilizados nesse experimento foram os da marca Phywe, mostrado na Figura 6.1 e cedidos pelo Instituto de Física da UFU. Para fazer a varredura de intensidade de campo num plano, a sonda foi fixada no braço de uma mesa de coordenadas e posicionada entre as duas ponteiras, como destacado na Figura 6.2. A mesa de coordenada é constituída de um braço que se posiciona no plano XY, com resolução de deslocamento de 1/10 de milímetro. O comando da mesa é feito com auxílio de um microcomputador, que registra a posição em que o braço robótico está no momento. O posicionamento no eixo Z é realizado de forma manual.

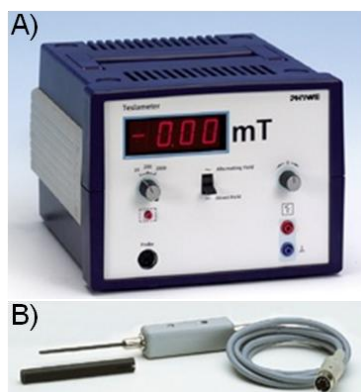


Figura 6.1 - Equipamento para medição do campo magnético: A) Teslômetro; B) Sonda de efeito Hall.(PHYWE, 2011)

A Figura 6.2, também mostra que o eletroímã foi colocado em uma base de madeira, para evitar a possibilidade de interferência nas medidas devido à parte metálica da mesa. Em cada posição onde a sonda é colocada entre as ponteiros, o teslômetro fornece um valor de grandeza com unidade em militesla (mT). Os valores eram manualmente repassados para uma planilha de cálculo (Microsoft Office Excel 2007).

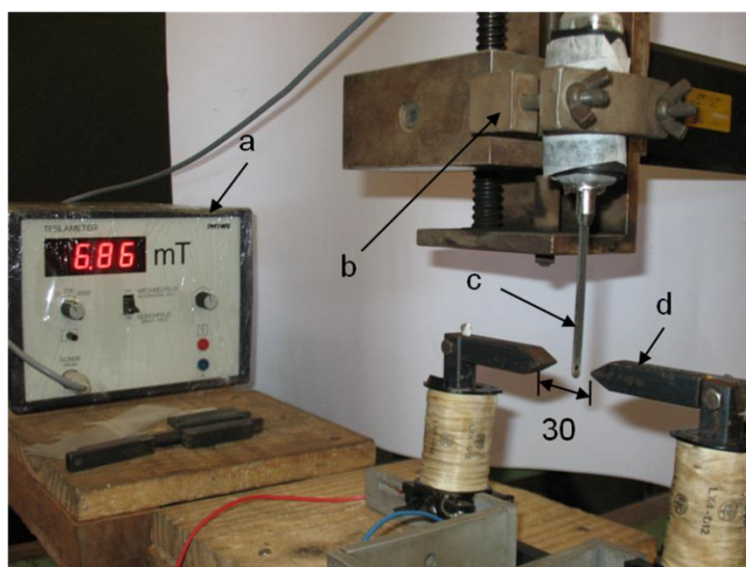


Figura 6.2 - Bancada para medição do campo magnético: a – Teslômetro; b – Braço da mesa de coordenadas; c – sonda hall; d – ponteiros

6.2 – Metodologia para quantificação do campo magnético

Para execução das medidas, foram determinados três níveis para o eixo Z, cada qual representando um plano paralelo à mesa, a saber: um plano paralelo à extremidade superior das ponteiros (plano A), outro na parte central (Plano B) e outro paralelo a extremidade inferior das ponteiros (plano C). Esta distribuição espacial dos planos é ilustrada na Figura 6.3, o que significa que cada plano estava separado um do outro por 4.2 mm. Em cada plano foram realizadas 55 medidas, distribuídas em forma de uma matriz 5 x 11. Os valores coletados foram colocados em forma de superfície de resposta, uma superfície para cada plano. Desta forma, foi possível observar a região do espaço com maior intensidade para cada par de ponteiros.

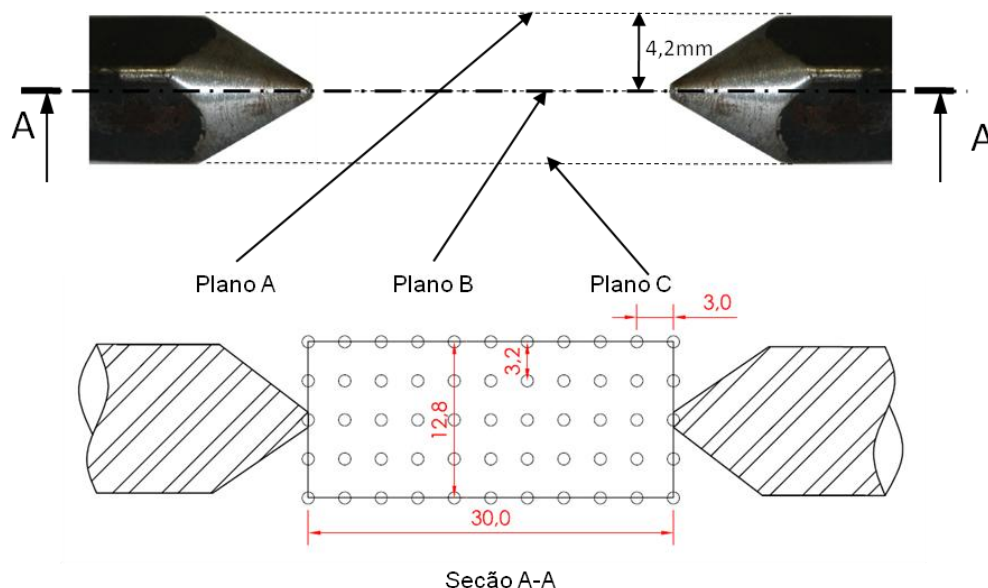


Figura 6.3 - Planos de medição paralelos às ponteiros com três níveis de alturas

O Teslômetro, por ser muito sensível, é capaz de detectar pequenas variações do campo magnético no meio próximo às ponteiros. Essa variação somada às pequenas intensidades magnéticas residuais dificulta a repetibilidade do experimento. Para minimizar esse problema, antes de começar a fazer as medidas em um plano, a sonda era posicionada a uma distância de aproximadamente 50 cm do eletroímã e o Teslômetro era ajustado em zero, para que os valores do campo magnético indesejáveis fossem subtraídos das médias. Este procedimento foi repetido para cada no plano medido.

6.3 – Metodologia para Tratamento dos Dados

Para construção das superfícies de respostas, montou-se uma tabela na planilha eletrônica de cálculo, contendo três colunas (na coluna (a), os valores da posição no eixo X, na coluna (b), os valores da posição em Y, e na coluna (c), os valores da intensidade magnética). Utilizou-se o programa OriginLab 7.5® para gerar uma superfície de resposta.

Os seguintes passos foram seguidos na construção dos gráficos de superfície de resposta:

- a) Determinou-se quais são os eixos X, Y e Z para tabela;
- b) Transformou-se toda a tabela em uma matriz 25 x 25, selecionando a coluna do eixo Z > menu editar > Converter para Matriz > Aleatório XYZ... (random) > em “selecionar método de grade”. Indicou-se a correlação > 25 para números de colunas e números de linhas, para gerar uma matriz 25 x 25 > suavidade 0,8 > ok;
- c) O gráfico fica em forma de uma tela. Ao clicar duas vezes sobre uma linha do gráfico, abre a janela “Detalhes de plotagem”. Na parte inferior da janela existe o comando “tipo de plotagem”, que deve ser alterado de “3D - Armação de arame” (default), para “3D – Superfície colorida” (3D - Colormap Surface). A superfície de resposta se apresenta com escala de cores variando com suas intensidades;
- d) Com um duplo clique na escala do plano cartesiano do gráfico, é possível ajustá-la como desejado.

Foi escolhido o método de correlação porque nele é possível determinar o número de linhas e colunas desejado, possibilitando o aumento de resolução da superfície. O método de correlação do OriginLab 7.5® calcula um valor para cada célula da matriz a partir do valor da célula original que está mais próximo, permitindo formar a malha com números de pontos desejados. Segundo a referência do próprio OriginLab® (apud Davis, 1986), o cálculo é baseado no método de Krigagem.

Por meio desse software, foram construídos dois tipos de gráficos para facilitar a interpretação dos dados. O primeiro foi na forma de superfície de resposta, sendo traçado os três planos (plano a, b e c) em um único espaço cartesiano, como é mostrado na Figura 6.4. Essa figura também detalha a posição das ponteiras em relação à superfície de resposta (uma ponteira está posicionada de frente para o plano formado em [15,Y,Z] e a outra ponteira está posicionada de traz do plano [-15,Y,Z]). O outro tipo de gráfico foi na forma de linhas topográficas, pois através delas é possível visualizar as linhas de intensidade magnética em cada plano separadamente com seus respectivos valores,

facilitando a interpretação, como é mostrado na Figura 6.5. As escalas de cores nos gráficos de superfícies de respostas estão distribuídas de 4 mT até 40 mT, em 9 tonalidades diferentes, isso porque a menor escala registrada no experimento foi de 4,44 mT e a maior foi de 40,5 mT, ambas ocorrendo na geometria cônica. Como o valor de 40,5 mT é bem maior que os máximos atingidos por outras ponteiras, não se preocupou em detalhar essa região e sim distribuir as cores na região mais fraca do campo magnético. Para entender melhor como as cores foram distribuídas, foi traçado um gráfico da intensidade do campo versus a distribuição do nível de cores, visto na Figura 6.6 - Curva parabólica mostrando a distribuição da escala de cores, onde a curva formada obedece a uma equação de segundo grau. Observa-se que na parte de menor intensidade, tem mais níveis de cores e na região de valores mais elevados tem-se menos níveis de cores. Assim, a distribuição das cores e linhas de intensidade não apresentaram-se de maneira linear, pois precisava-se de mais detalhes de cor na região mediana entre as ponteiras, ou seja, na região em que a intensidade ficou mais fraca.

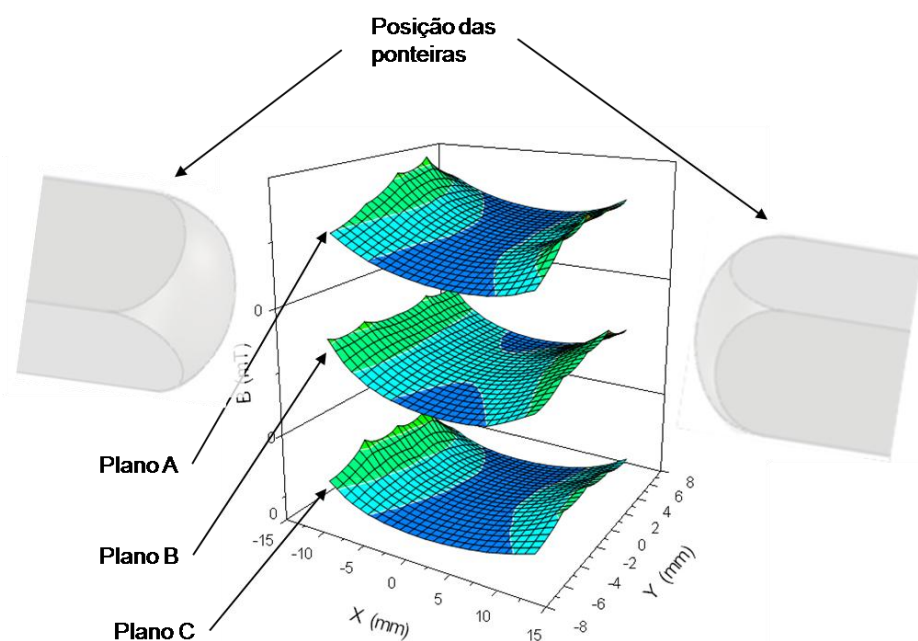


Figura 6.4 - Superfície de resposta típica do campo magnético no plano A, B e C, detalhando a posição das ponteiras

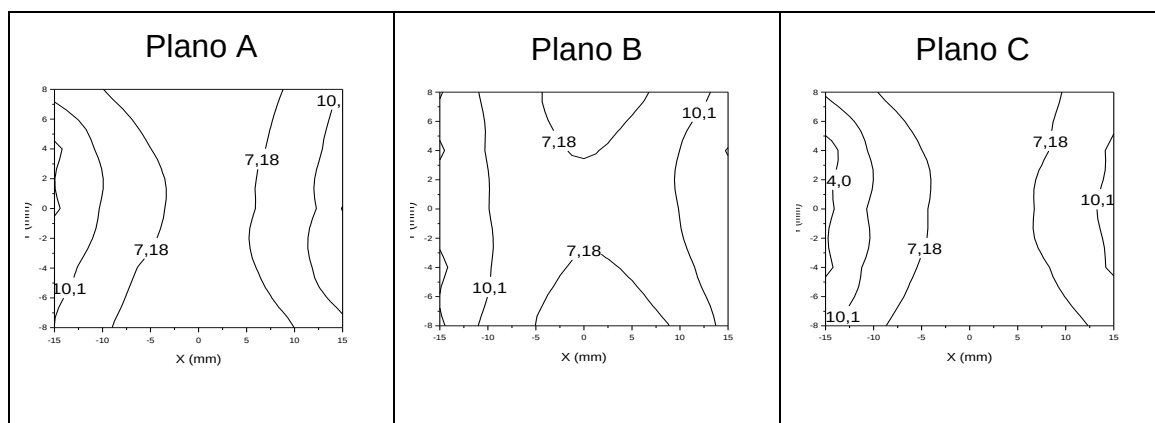


Figura 6.5 - Intensidade do campo magnético em forma de linhas topográficas nos planos A, B e C

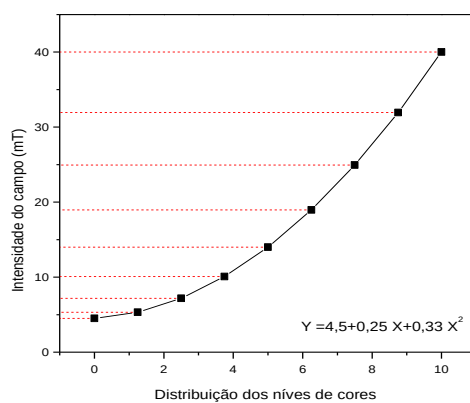


Figura 6.6 - Curva parabólica mostrando a distribuição da escala de cores

6.4 – Resultado e Discussão da Quantificação do Campo Magnético com a Utilização do Teslâmetro

Nas Figura 6.7 até Figura 6.12 são mostradas as superfícies de respostas de intensidade do campo magnético entre as diferentes ponteiros, visando um entendimento específico dessa grandeza.

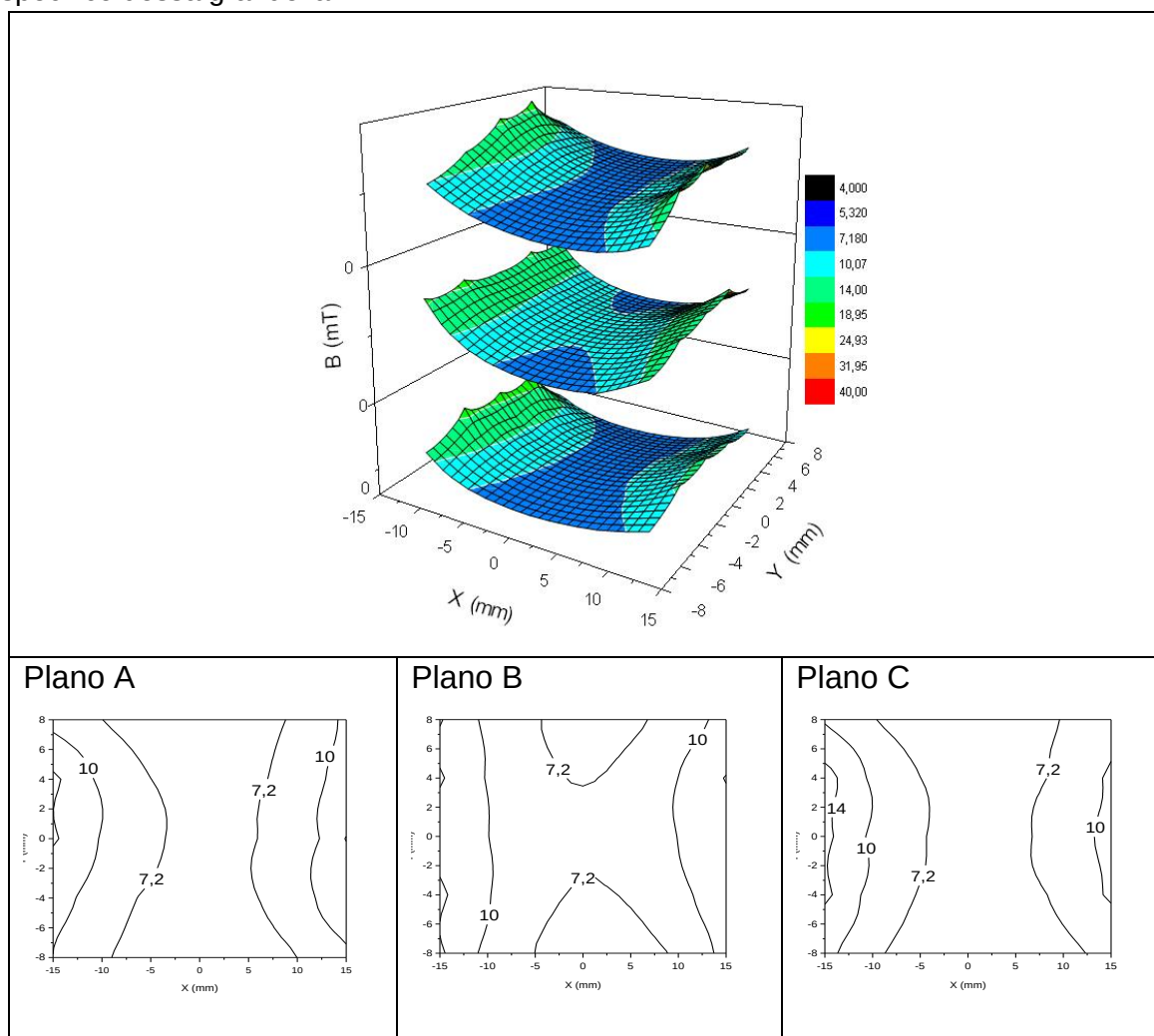


Figura 6.7 - Superfície de resposta e linhas topográficas da intensidade do campo magnético resultante da aplicação da geometria Plana

A geometria de ponteira plana (Figura 6.7) atinge máximas intensidades magnéticas em regiões próxima da geometria de ponteira (atingindo cerca de 10 a 14 mT) e de mínimo no centro (cerca de 5 a 7 mT). Observa-se também que a intensidade do campo é maior no centro do plano central (plano B) do que nos centros dos planos superior (plano A) e inferior (plano C). Nas três superfícies de respostas observou-se pequenos picos com intensidade 18 mT, essa região correspondente as arestas da ponteira plana. Sendo assim, essa ponteira sofre um decaimento suave do campo magnético em direção aos centros dos planos.

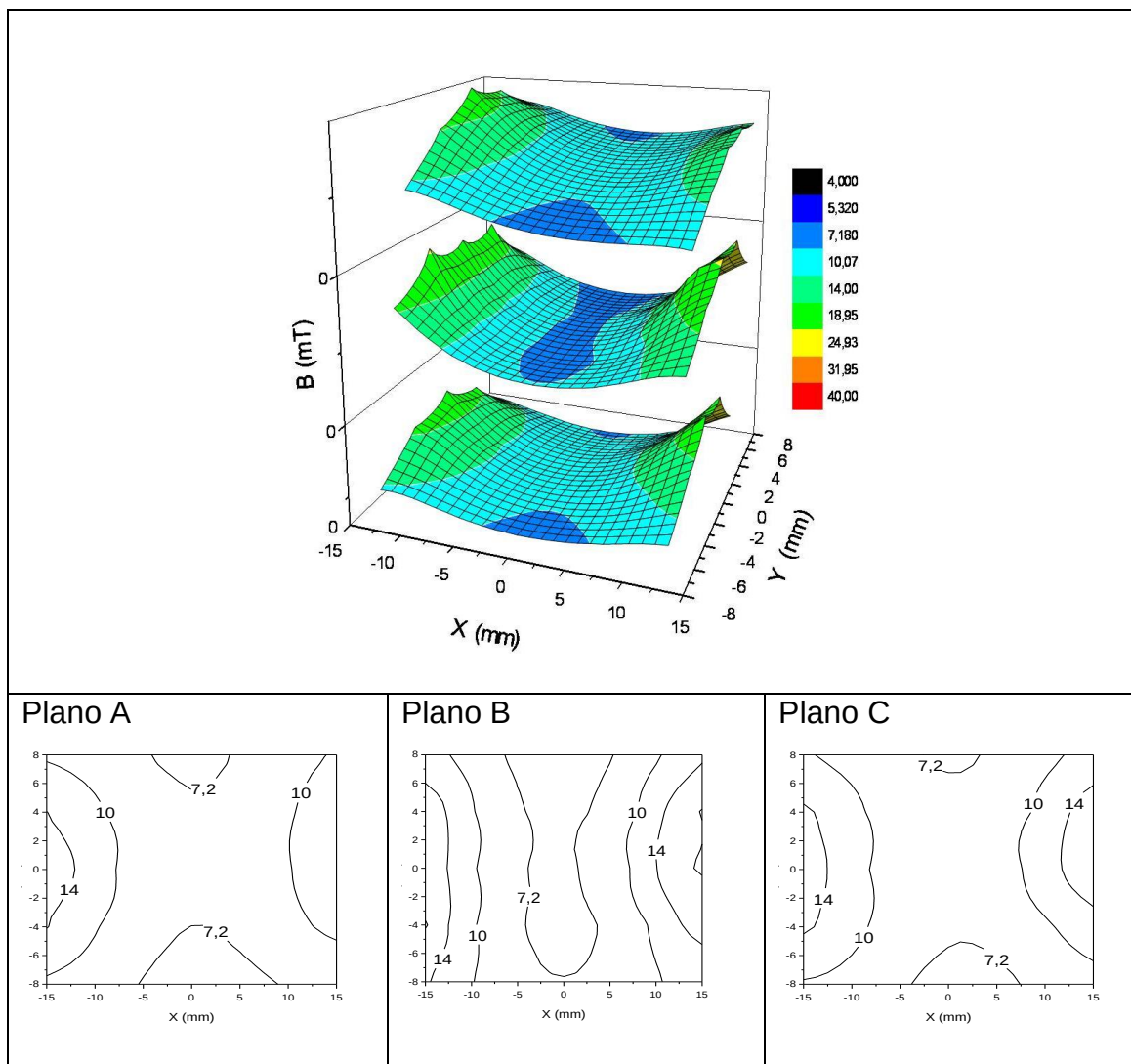


Figura 6.8 - Superfície de resposta e linhas topográficas da intensidade do campo magnético resultante da aplicação da geometria Calota

A geometria de ponteira Calota (Figura 6.8) atinge maiores valores das intensidades magnéticas em regiões próxima da superfície de ponteira (atingindo cerca de 19 mT) e de mínimo no centro (cerca de 7 mT), valores maiores do que os encontrados com a geometria Plana. Observa-se também que nos centros dos planos superior (plano A) e inferior (plano C) as intensidades são maiores do que no centro do plano central (plano B). Essa ponteira é a única que mostrou valores de intensidade no centro do plano central menor do que no centro dos planos superior e inferior.

O formato da superfície de resposta da geometria Calota foi similar ao formato da superfície de resposta da geometria Plana, diferenciando apenas nas intensidades alcançadas por cada geometria e no decaimento da intensidade ao se direcionar para o centro dos planos.

Uma partícula ionizada sendo defletido pelo campo magnético gerado por esta geometria teria um comportamento complexo, sendo que a partículas ionizadas sofreriam uma força magnética mais intensa ao atravessar o plano superior, em seguida, ele sofreria uma força menor ao passar pelo plano central e depois a força magnética aumentaria novamente ao cruzar o plano C.

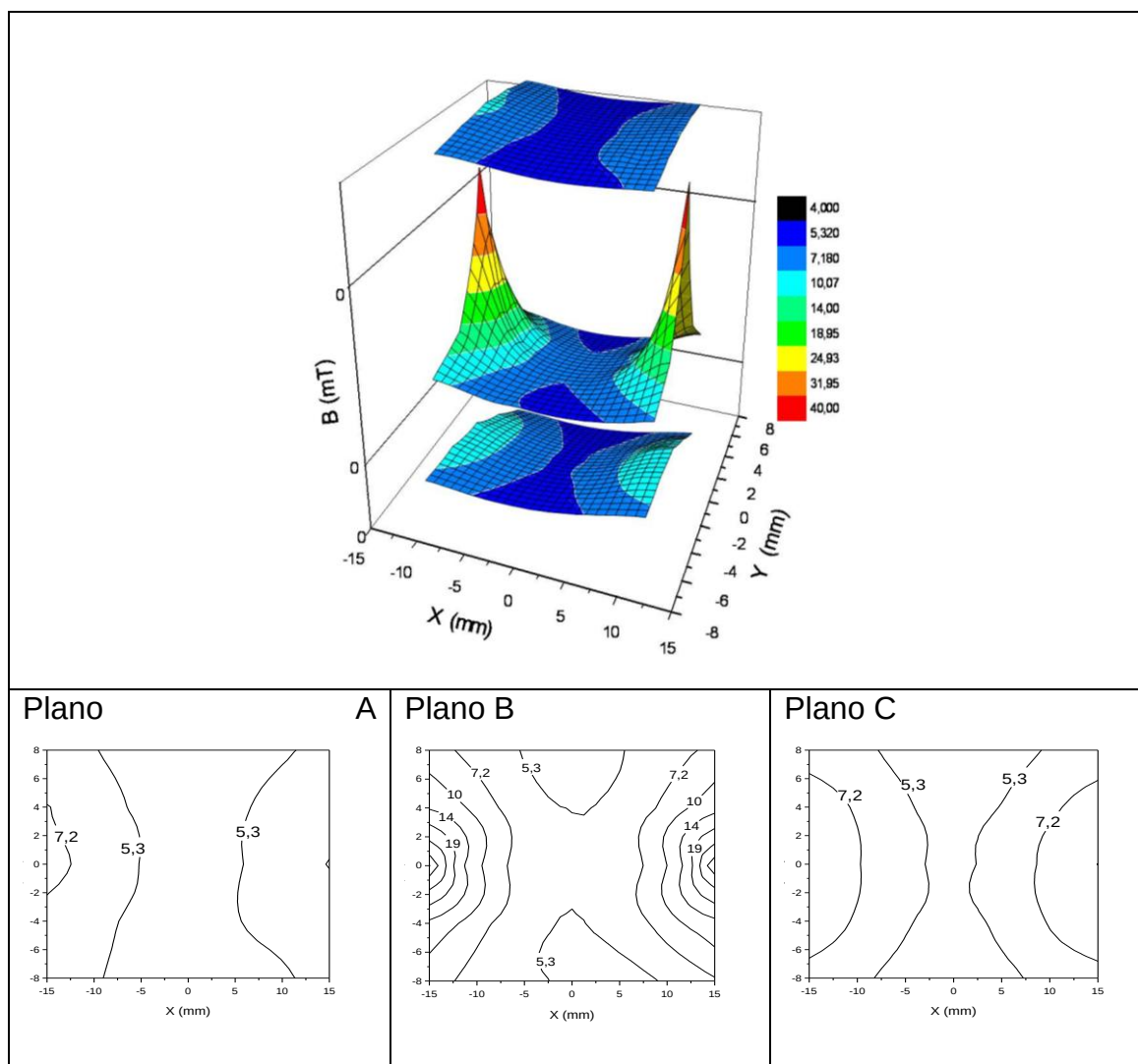


Figura 6.9 - Superfície de resposta e linhas topográficas da intensidade do campo magnético resultante da aplicação da geometria Cônica

A geometria de ponteira Cônica (Figura 6.9) atinge a máxima intensidade magnética entre todas as ponteiras. No plano central (plano B), em regiões próxima da ponteira, os valores atingem um pico superior a 40 mT. Essa geometria também atinge os menores valores no centro das superfícies de resposta (cerca de 5 mT). No centro do plano central (plano B), a intensidade do campo é cerca de 7 mT, um pouco maior que nos planos superior e inferior, que mostram valores de 5 mT. Sendo assim, os valores são baixos quando comparados com os das outras ponteiras. O formato das superfícies de respostas

nos planos A e C apresentam-se quase plana, ou seja, com pouca variação. No entanto, no plano central o formato é singular, apresentando um rápido decaimento da intensidade do campo magnético.

A geometria Cônica comprova que o comportamento do campo magnético é semelhante ao comportamento do campo elétrico no que diz respeito ao poder das pontas.

Uma maneira de explicar esse fenômeno é tomando um número fixo de linhas de indução saindo de todas as pontas. Quando essas linhas concentram-se em regiões específicas, elas não aumentam o número total de linhas, mas ficam em densidade maior em torno dessas regiões de acúmulo, ou seja, como se as pontas das pontas atraíssem as linhas de indução para elas, deixando poucas linhas ao seu redor. Esse comportamento faz com que a intensidade seja elevada nas pontas e baixas ao seu redor.

Pode-se prever que uma partícula eletrizada atravessando o campo gerado por essa ponta sofreria um leve desvio ao atravessar o plano A, e sendo a intensidade da força magnética agindo sobre essa partícula aumentando levemente à medida que se aproximasse do ponto central do plano B. Porém, se as partículas que passassem em regiões mais próximas das pontas das pontas sofreriam uma força magnética muito elevada. Em seguida, ao atravessar o plano C, as partículas ficariam sujeitas a uma força magnética mais amena e encontrariam a chapa metálica.

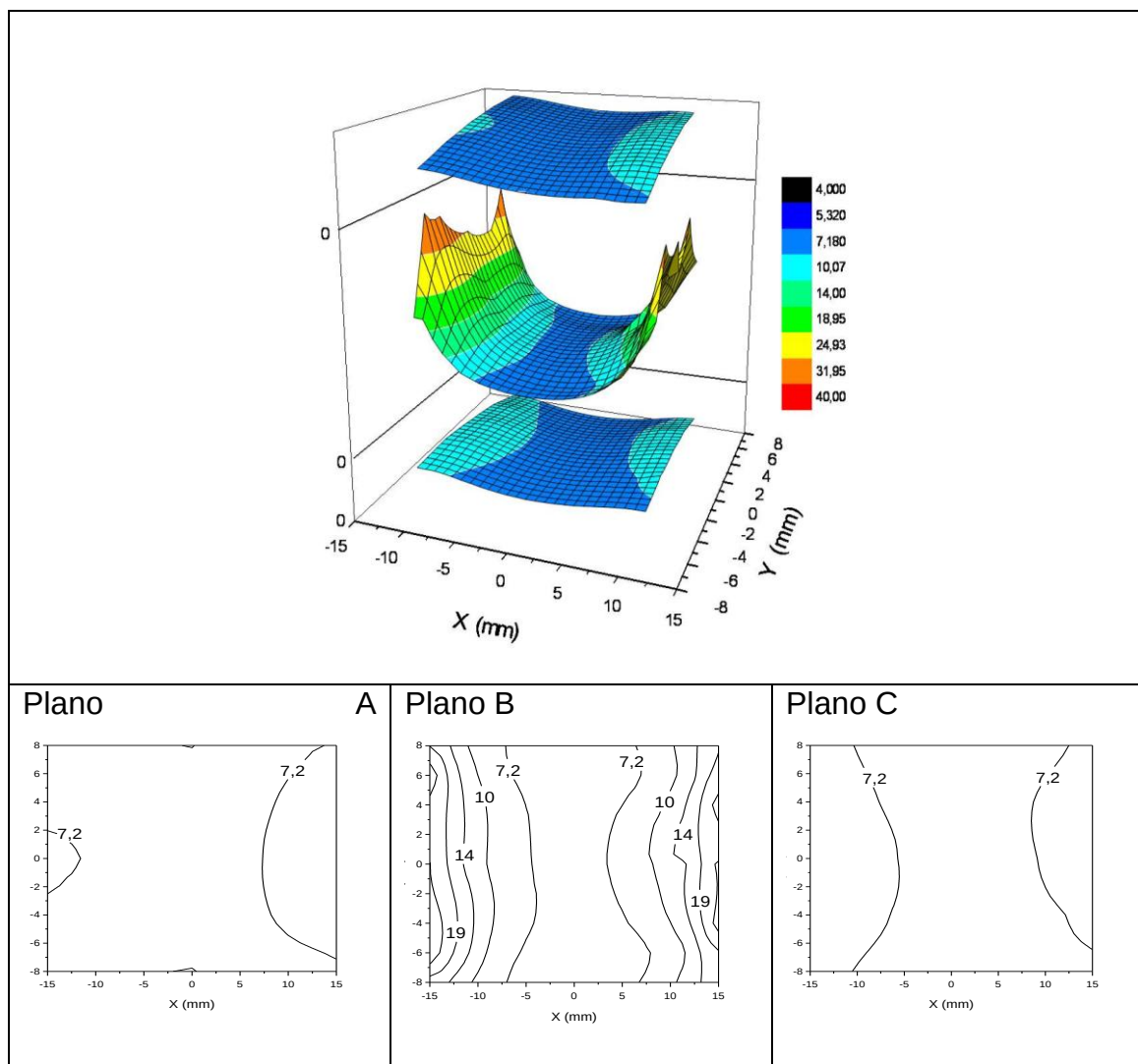


Figura 6.10 - Superfície de resposta e linhas topográficas da intensidade do campo magnético resultante da aplicação da geometria Cunha Horizontal

A ponteira Cunha Horizontal (Figura 6.10) teve o comportamento coerente para sua geometria. O plano central (plano B) mostra que nas proximidades das cunhas as intensidades do campo são intensas (atingindo cerca de 24 a 32 mT), devido ao acúmulo de linhas de indução nessa região, e no centro os valores alcançados são em torno de 7 mT. O decaimento é rápido à medida que se desloca para o centro deste plano. Os planos superior (A) e inferior (C) se apresentam com curvas mais amenas, ou seja, com pouca variação, se mantendo entre 7 e 10 mT.

Normalmente esse é tipo de ponteira aplicado para deflexão de um arco de soldagem. Os dois fabricantes (AP Automation e Hangil) utilizam ponteiras em formato de cunha. A intensidade elevada no plano B (próximo às ponteiras) tende em fazer com que as partículas ionizadas do arco sofram uma força magnética intensa somente quando

atravessa esse plano B. Entretanto, a intensidade do campo nos centros dos planos superior e inferior são da mesma ordem de grandeza (7 mT). Sendo assim, se essa ponteira não ficar bem próxima do arco, ela não terá eficiência vantajosa em relação às outras ponteiras, pois quando uma partícula eletrizada atravessa o campo gerado por essa geometria ela será submetida a um campo magnético de aproximadamente mesma magnitude se estiver afastada do arco. Mas se a ponteira estiver bem próxima do arco, conseguirá formar um plano de maior intensidade. Os fabricantes podem ter escolhido essa ponteira por causa dessa concentração das linhas de indução formada na extremidade da cunha das ponteiras, acreditando que essa concentração se mantém com o afastamento. Usar essa ponteira muito próxima do arco de soldagem para aproveitar a alta intensidade formada pelas cunhas, pode prejudicar a eficiência da mesma pelo fato de aquecê-las, atrapalhando as propriedades magnéticas e também os respingos de solda, que ao aderir nas ponteiras criam novas pontas e isso mudaria a distribuição do campo magnético.

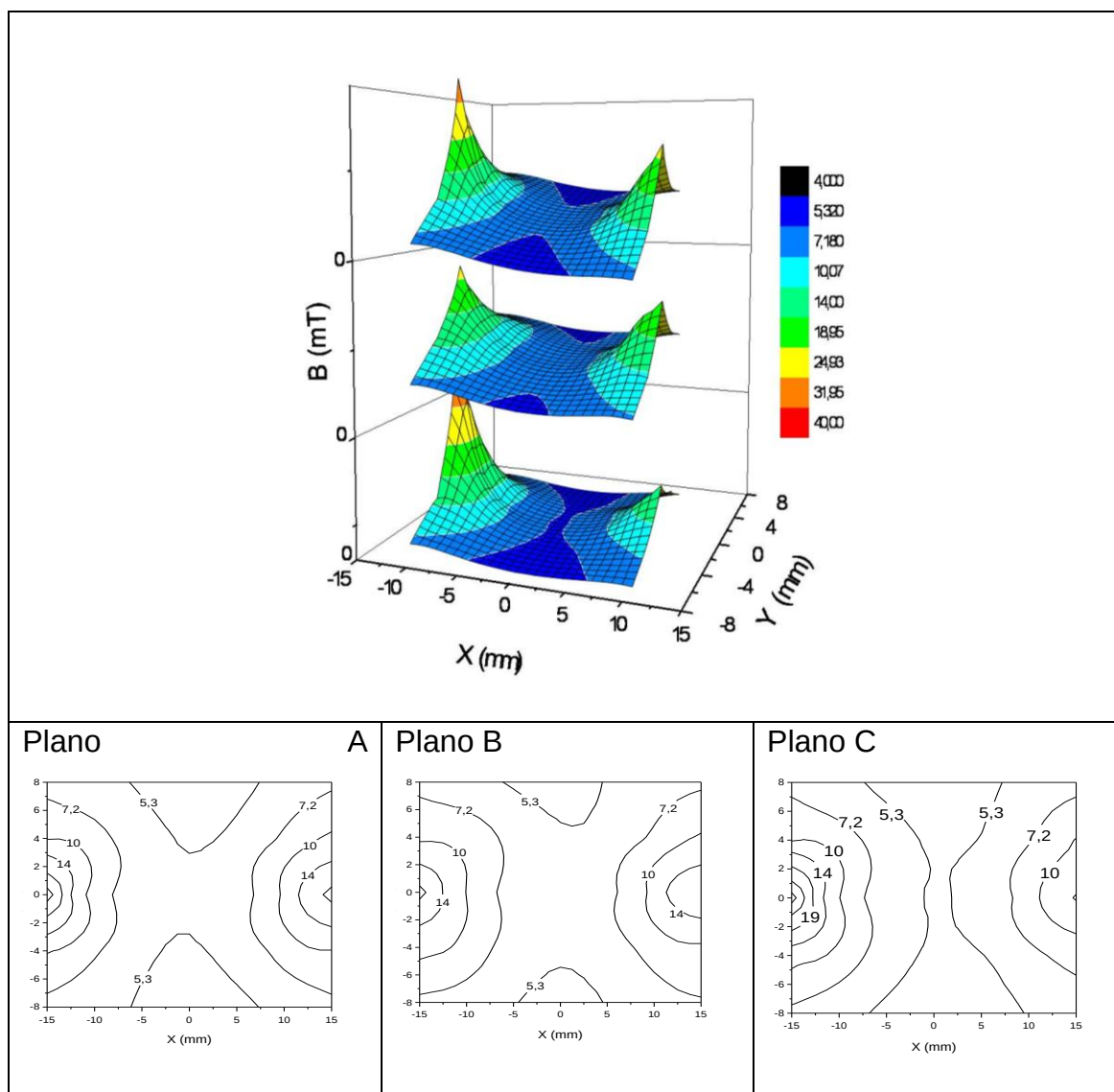


Figura 6.11 - Superfície de resposta e linhas topográficas da intensidade do campo magnético resultante da aplicação da geometria Cunha Vertical

A geometria Cunha Vertical (Figura 6.11) reforça a idéia de intensidades mais elevadas distribuídas em um plano paralelo à cunha. Pode-se observar que nos três planos (planos A, B e C) ocorre uma concentração elevada nos pontos próximos da ponteira. A superfície de resposta ficou similar nos três planos. Alguns detalhes importantes são destacados nesse resultado, sendo que o plano central (plano B) possui intensidade máxima na ordem de 25 mT e esse valor é menor que os máximos dos planos superior (plano A) e inferior (plano B) que alcançou valor a cerca de 31 mT, isso porque a sonda foi posicionada na quina da cunha e, como visto na visualização 2D, nessa região ocorre acúmulos de linhas de indução. Isso é comprovado com o aumento da densidade das linhas de indução nas quinas. Os três planos apresentaram valores mínimos na ordem de 5,3 mT.

Uma partícula carregada eletricamente atravessando esse campo sofre uma força magnética forte ao se aproximar das cunhas, mas, logo no começo do desvio, esta partícula direciona-se para uma região de campo mais fraco, fazendo um desvio menor.

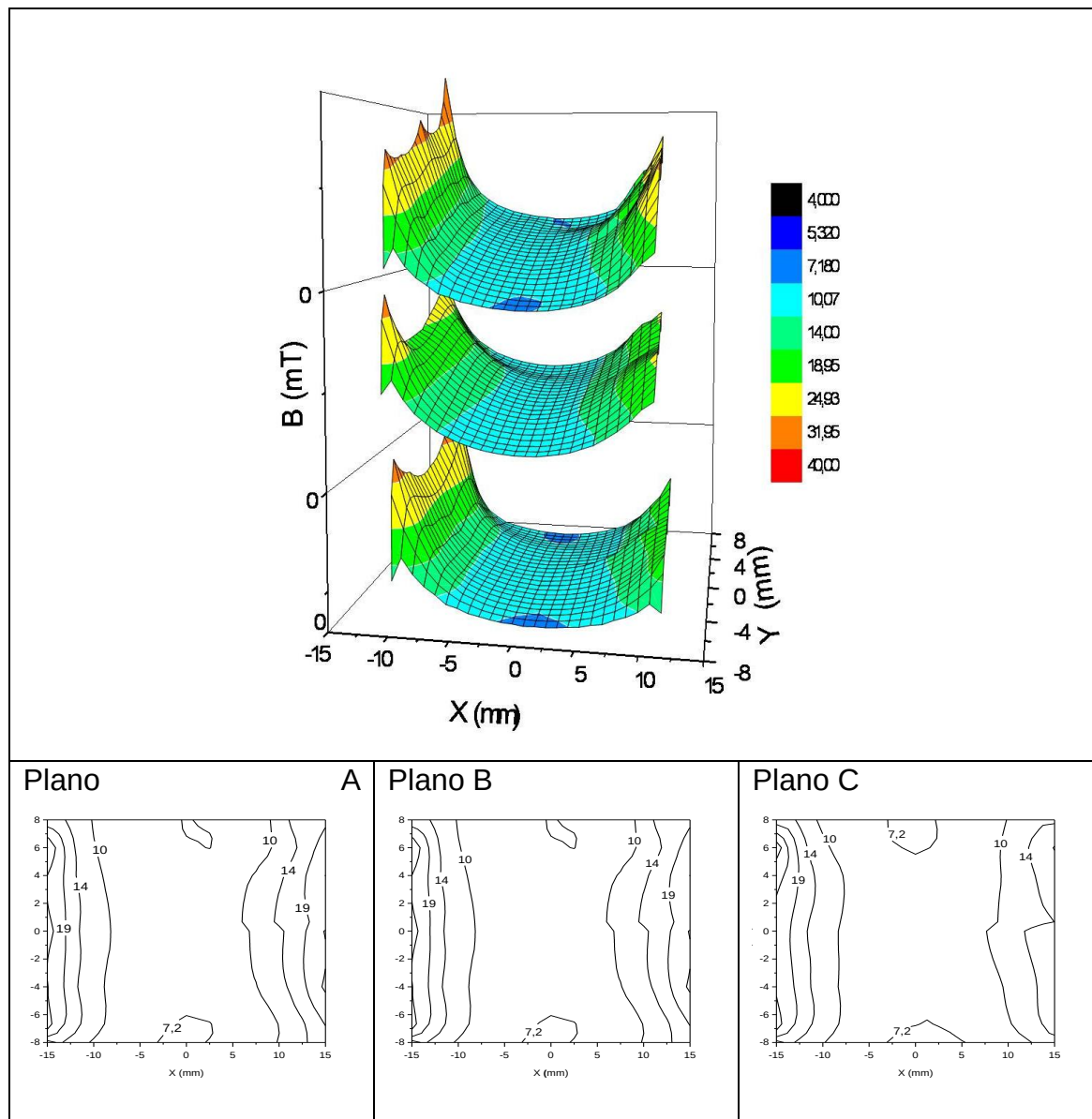


Figura 6.12 - Superfície de resposta e linhas topográficas da intensidade do campo magnético resultante da aplicação da geometria Torre

A geometria Torre (Figura 6.12) demonstrou um comportamento inesperado em relação às outras. E esse comportamento pode gerar melhorias na eficiência da deflexão de arco. O valor máximo de campo magnético atingido foi de 31 mT, em uma região muito próxima da ponteira, região não aplicável à deflexão. O valor mínimo atingido de 7,2 mT ocorreu em áreas muito pequenas nos três planos. Quando observa-se o centro de cada plano, nota-se que a intensidade do campo é da ordem de 10 mT. E esse valor permaneceu em uma área muito grande (maior área de permanência nesse valor, dentre todas as

ponteiras). É importante destacar que a ponteira Calota (nos planos superior e inferior) e a ponteira Plana (no plano central) também atingiu a ordem de grandeza de 10 mT, mas suas áreas de permanências são menores.

Nota-se também que nos três planos os comportamentos foram similares, proporcionando uma deflexão homogênea das partículas ionizadas. Sendo assim, a ponteira torre pode ficar mais afastada do arco de soldagem, não recebendo tanta radiação do arco (evitando superaquecimento) e diminuindo a chance de ser atingido por respingo. Esta ponteira também exigirá menos corrente nas bobinas.

6.5 – Discussão Geral quanto às Superfícies de Respostas

Pelas medidas realizadas, foi observado que quanto mais a ponteira apresenta forma pontiaguda, mais alto é o campo magnético próximo das ponteiras e maior é o gradiente de decaimento ao se afastar das ponteiras. O aumento do campo magnético nas regiões pontiagudas pode ser explicado como se segue: quando existe uma ponta em um material ferromagnético, ocorre um aumento da densidade de corrente nessa região, pela diminuição da área. Como a magnetização é diretamente proporcional à densidade de corrente, há um conseqüente aumento na magnetização, originando um aumento magnético mais intenso nessa região (JACKSON, 1962).

O maior decaimento do valor do campo magnético é uma característica dos dipolos, que tendem a zero com o inverso da distância na potência de 3, ao invés de ao inverso da distância ao quadrado, que vale para os monopolos. Assim, o seu gradiente de decaimento será maior do que para os monopolos. E, quanto maior for a densidade de dipolos presentes em uma região (isto é, quanto maior for a magnetização), maior será o gradiente de decaimento, pois a tendência do campo magnético ir a zero ocorre praticamente a uma mesma distância da região que contém os dipolos, do ponto de vista macroscópico. Essa dependência funcional com a distância pode ser explicada didaticamente, considerando que, quando o observador (no caso a sonda do Teslâmetro) se afasta das pontas, a separação dipolar de cada domínio começa a ficar indefinida, da mesma forma que acontece quando um observador se afasta de dois objetos pequenos e ligeiramente separados e perde a noção de separação dos mesmos, tendendo a cancelar a existência do dipolo e, conseqüentemente, a anular mais rapidamente o campo magnético produzido pelo mesmo.

Na ponteira Plana só há um aumento da densidade de domínios magnéticos nos vértices; sendo assim, em praticamente toda a extensão da ponteira plana, a densidade de corrente não será tão grande quanto no caso das ponteiras pontiagudas e o campo

magnético próximo à ponteira plana terá um valor menor do que teria em uma ponteira pontiaguda. Como o valor do campo magnético tenderá a zero a uma distância macroscópica aproximadamente igual à da ponteira cônica, o gradiente de decaimento do campo para a ponteira Plana será menor do que para a ponteira Cônica.

Esta explicação, por si só, justifica a diferença de comportamento observado do campo magnético da ponteira Cônica em relação ao da ponteira Plana.

A ponteira Torre tem aumento do número de aresta, região em que o campo magnético é mais intenso, e diminuição da área da superfície plana que, juntas, favorecem o aumento da intensidade do campo magnético, conforme observado.

CAPÍTULO VII

INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DAS PONTEIRAS NA DEFLEXÃO DE UM ARCO DE SOLDAGEM TIG

7.1 – Deflexão do Arco Estacionário Sobre Alumínio

7.1.1 – Equipamento e bancada

Nesta etapa do trabalho, verificou-se na prática como o arco de soldagem comporta-se perante campos magnéticos gerados pelas diferentes ponteiras. Para tal, foi montada uma bancada, como ilustrada na Figura 7.1, contendo o eletroímã ligado a uma fonte ajustável de corrente contínua, um suporte de alumínio para apoiar o metal a ser soldado e o teslâmetro. O suporte e a tocha ficavam estacionários, usando-se uma mesa de coordenadas apenas para facilitar o posicionamento tocha-suporte. Uma filmadora CCD (1,45 mega pixel – 1392 x 1040, 30 fps, scan progressivo de 2/3”) foi utilizada para visualizar os arcos de soldagem produzidos pelo processo de soldagem TIG.

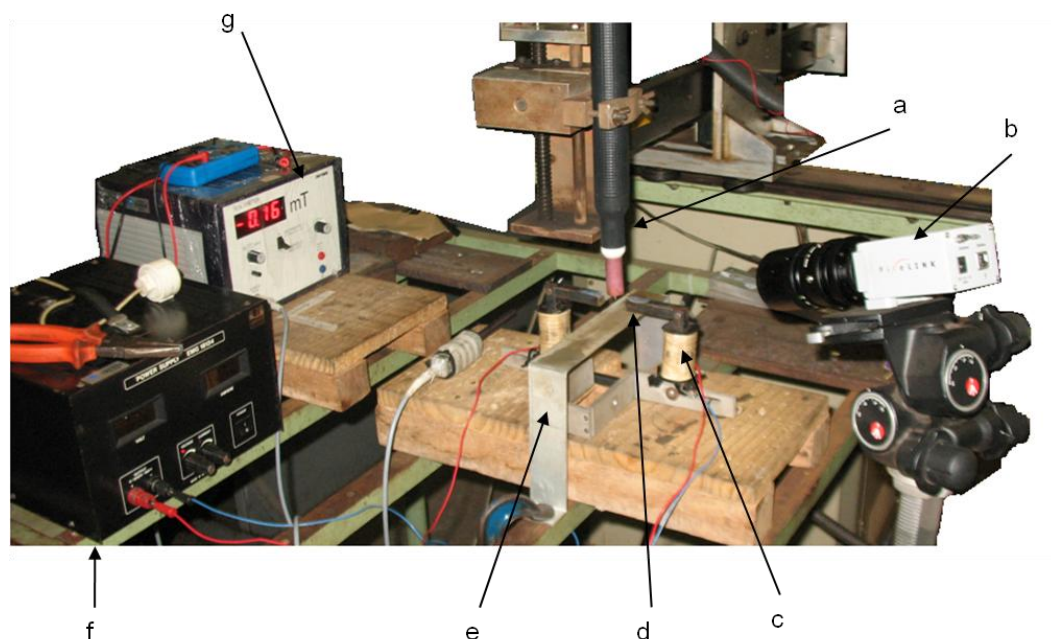


Figura 7.1 - Bancada para deflexão do arco estacionário: a) tocha TIG; b) filmadora CCD; c) bobina do eletroímã; d) ponteira do eletroímã; e) suporte do metal de base a ser soldado de alumínio; f) fonte tensão contínua ajustável; g) Teslâmetro

O processo TIG foi escolhido por não ter adição de metal, evitando a interferência das gotas em transferência. Optou-se por uma soldagem com arco estacionário para facilitar o registro das imagens relativas ao comportamento do arco, com e sem aplicação do campo magnético. Utilizou-se uma fonte de soldagem eletrônica do tipo chaveada no secundário (IMC INVERSAL 300, ilustrada pela Figura 7.2) e um eletrodo de tungstênio AWS EWP de 2,4 mm de diâmetro, com ângulo de afiação de 60°, na polaridade negativa. O gás de proteção utilizado foi Argônio comercialmente puro. Como metal de base foi utilizado uma barra chata de alumínio de 25,4 mm x 12,7 mm, com 50 mm de comprimento, posicionado sobre o suporte de alumínio. A escolha da chapa de alumínio foi feita por ser este material paramagnético (μ pouco superior a 1), que não interferia na intensidade e distribuição do campo por preferência de permeabilidade.



Figura 7.2 - Fonte de soldagem (IMC INVERSAL 300) utilizada para gerar o arco TIG

Apesar da escolha da polaridade para a soldagem ser incompatível com a soldagem TIG de alumínio e suas ligas, esta definição se deu pois, ao se soldar em CA, observou-se uma variação cíclica nas dimensões do arco quando das mudanças de polaridade. Esta variação poderia mascarar o efeito do campo magnético. O uso de CC+ conduziu a um arco que crescia continuamente, pela procura de óxidos para emissão por campo pela placa, frente à limpeza catódica conseguida com esta polaridade. Por fim, foi testada a soldagem em CC- com uma intensidade de 100 A, que, talvez por ser o arco estacionário, manteve-se suficientemente estável durante o período necessário. Para abertura do arco foi utilizada uma vareta de eletrodo de W para fazer o contato elétrico entre ponta do eletrodo e peça.

A tocha foi posicionada de tal forma a se manter 7,5 mm de comprimento de arco (distância ponta do eletrodo-peça), com o bocal cerâmico a 15 mm de altura do metal de base. Esse comprimento de arco facilitou a visualização e o estudo da deflexão do arco.

Posteriormente utilizou-se um programa elaborado no ambiente Matlab® para separar imagens “jpeg” frame por frame (as linhas de comando do Matlab® descritas em MOTA (2011), e encontram-se replicadas no anexo III). No experimento, a filmadora foi ajustada para capturar 30 frames por segundo (30 fps), durante 05 segundos, totalizando 150 frames. Foi acoplada à filmadora uma objetiva com obturador ajustável, sendo possível regular a quantidade de luz que atinge a CCD da filmadora, melhorando a qualidade da imagem e evitando excesso de luz, que poderia danificar o aparelho.

As extremidades das ponteiras do eletroímã ficaram a uma distância de 30 mm uma da outra e o eletrodo da tocha TIG foi posicionado em um ponto médio entre as ponteiras, ou seja, a uma distância de 15 mm de cada ponteira. O suporte de alumínio foi essencial para apoiar o metal a ser soldado na altura correta de 7,5 mm (ponta do eletrodo-peça)

(Figura 7.3) e também serviu para evitar interferências de partes ferromagnéticas do restante da bancada.

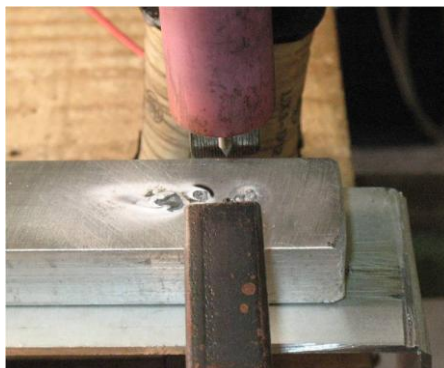


Figura 7.3 - Suporte de alumínio mantendo o metal de base na altura 7,5 mm da ponta do eletrodo TIG até a peça

Foi pela fonte de tensão contínua ajustável que se forneceu a tensão necessária às bobinas do eletroímã. Um voltímetro foi utilizado para conferir e ajustar a tensão da fonte contínua em 7,18 V (esta tensão foi definida em ensaios preliminares), enquanto um amperímetro foi utilizado para verificar o valor da corrente (mantida em 48,1mA). O teslâmetro foi utilizado para conferir os valores da intensidade magnética entre as ponteiros depois de fixada a tensão nas bobinas em 7,18 V.

O arco permaneceu ligado sobre o metal de base por aproximadamente 15 segundos, tempo suficiente para se fazer as aquisições das imagens sem ocorrer fusão do metal de base. Das 150 imagens do arco defletido, foram retiradas 3 para serem analisados. Com as imagens capturadas, utilizou-se a técnica de Kang e Na (2002), descrita no item 2.3 e mostrada na Figura. 2.9, para determinar os valores de δ , que consistem no cateto oposto do triângulo formado entre os pontos ponta do eletrodo, centro do arco sem deflexão no metal de base e centro do arco com deflexão no metal de base (doravante este triângulo será aqui denominado de triângulo de Kang e Na, em homenagem aos idealizadores da técnica).

O diâmetro do eletrodo da tocha TIG (2,4 mm) serviu de referência para se fazer a calibragem do programa digital de tratamento de imagem (AutoCad®) usada para medir o desvio de arco. Foram também criadas marcações espaçadas de 5 mm na barra de alumínio usada como metal de base, para se fazer a conferência dos valores da dimensão das imagens. Depois de ajustado o tamanho correto das imagens, as mesmas foram devidamente dimensionadas.

Traçou-se, então, sobre as imagens três linhas, uma sobre a aresta do metal de base, outra verticalmente passando pelo centro do eletrodo e a última da ponta do eletrodo

até o centro da base do arco defletido. Com essas três linhas projeta-se um triângulo sob o eletrodo e desse triângulo se faz a análise da grandeza δ , de acordo com a técnica proposta por Kang e Na (2002). O detalhamento das referencias, a construção do triângulo e a grandeza δ são detalhados na Figura 7.4.

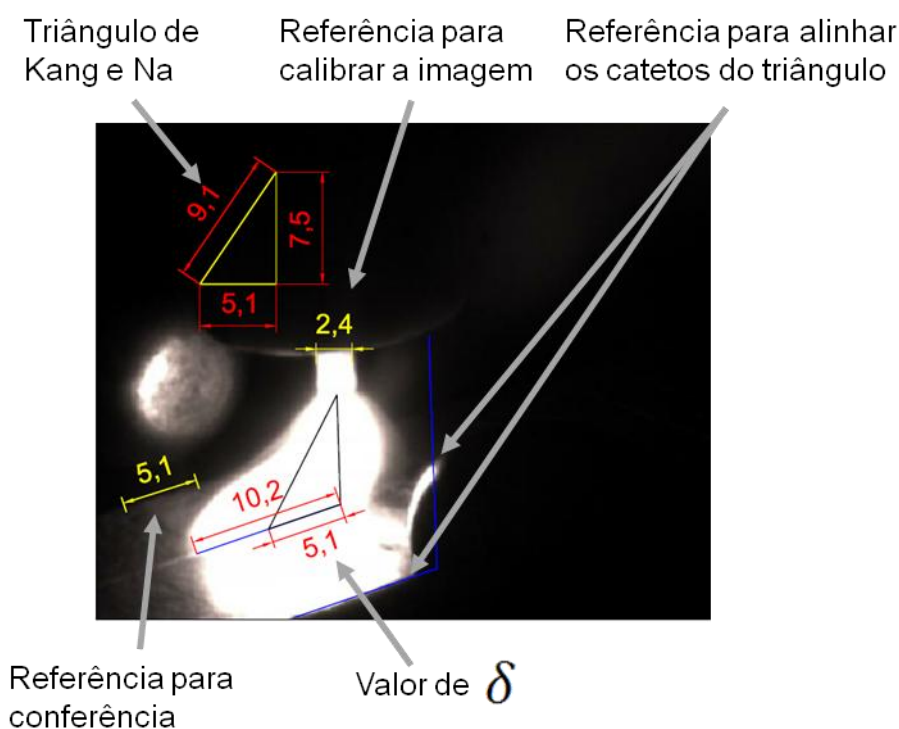
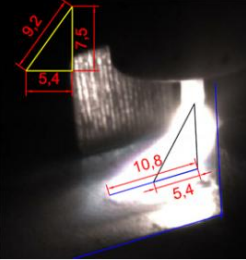
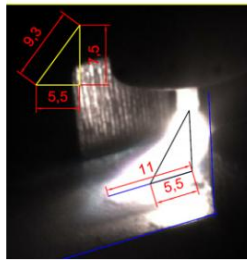
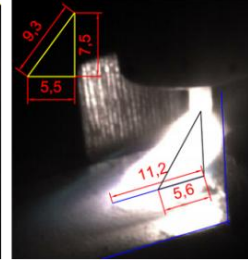
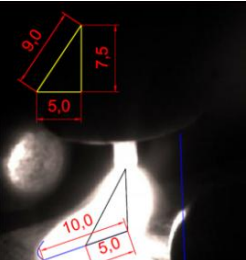
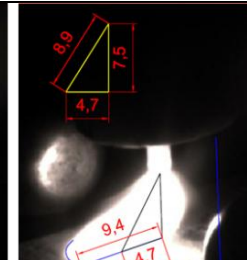
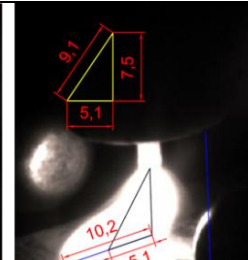
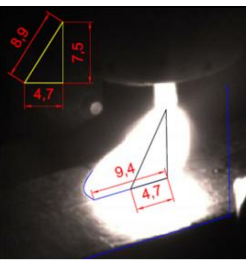
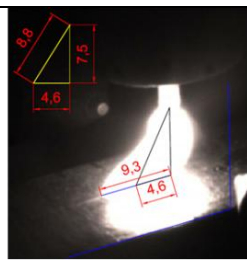
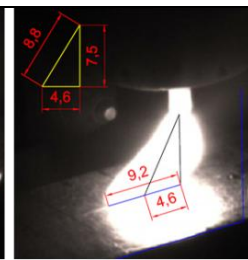
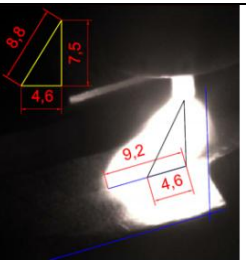
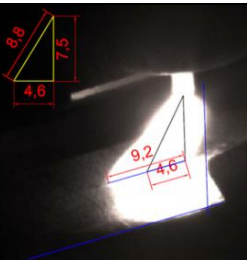
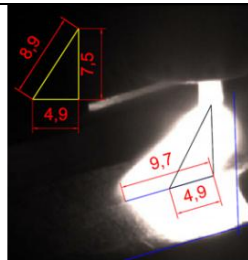


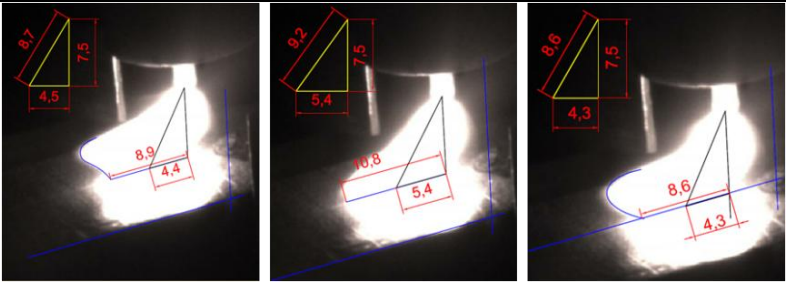
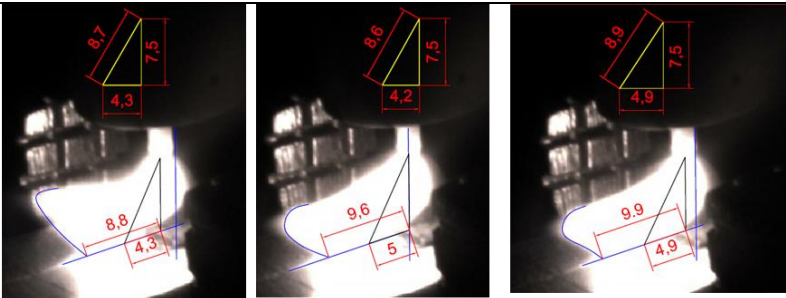
Figura 7.4 - Arco defletido com linhas de referência para escalonar a imagem e para alinhar os catetos do triângulo de Kang e Na para obtenção do valor de δ

7.1.2 – Análise e resultado do efeito do tipo de ponteira sobre a deflexão do arco estacionário em soldagem de alumínio

Para fins de análise dos resultados obtidos, foram observados dois comportamentos do arco, o nível de deflexão do arco (δ), arbitrariamente definido pelo autor em três níveis de respostas (Alto; Médio; e Baixo). Também foi analisado o quanto o arco desacoplou do metal de base (o termo desacoplamento do arco, é mostrado na Figura 7.6), definindo também arbitrariamente em quatro níveis de resposta (Alto; Médio; Baixo; e Sem desacoplamento). Foram realizadas três repetições para cada ponteira. A Tabela 7.1 mostra as linhas de referência e os triângulos de Kang e Na (2002) para quantificação de δ . Também é mostrado o valor da média aritmética das três medidas de δ e os níveis de desvio e desacoplamento do arco.

Tabela 7.1 - Visualização e qualificação das deflexões do arco estacionário.

Ponteira	Visualização	Nível de desvio	Nível de desacoplamento
Planas	   $\bar{X}\delta = 5,5$ mm e Desvio Padrão = 0,1 mm	Alto	Sem desacoplamento
Calota	   $\bar{X}\delta = 4,9$ mm e Desvio Padrão = 0,2 mm	Médio	Baixo
Cone	   $\bar{X}\delta = 4,6$ e Desvio Padrão = 0,2 mm	Baixo	Sem desacoplamento
Cunha Horizontal	   $\bar{X}\delta = 4,7$ e Desvio Padrão = 0,2 mm	Baixo	Sem desacoplamento

Cunha Vertical	 $\bar{X}\delta = 4,7\text{mm}$ e Desvio Padrão = 0,20 mm	Baixo	Médio
Torre	 $\bar{X}\delta = 4,7\text{ mm}$ e Desvio Padrão=0,2 mm	Baixo	Alto

A Figura 7.5 mostra os valores das médias das três medidas de δ em forma de gráficos de barras, para facilitar a comparação das grandezas estabelecidas por cada ponteira. As ponteiras foram alinhadas em ordem decrescente de δ . Pode-se dizer que existem duas, ou melhor, três classes de comportamento das ponteiras, a saber:

- Classe 1 (desvio mais alto) – ponteira Plana
- Classe 2 (desvio médio) – ponteira Calota
- Classe 3 (desvio mais baixo) – ponteira Cunha Vertical, Torre, Cunha Horizontal, Cone

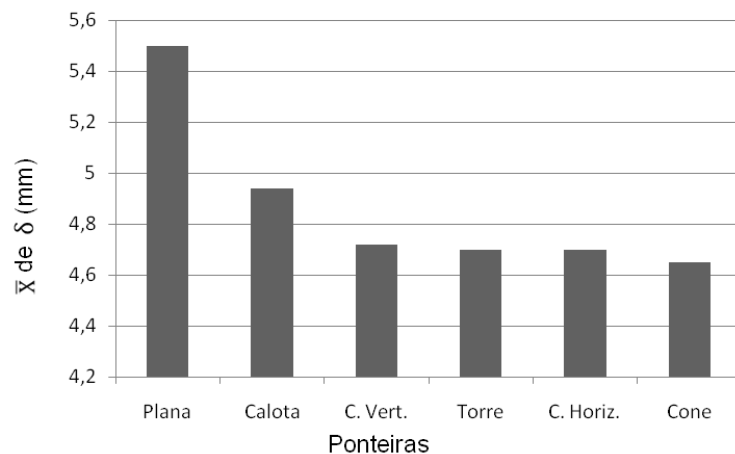


Figura 7.5 - Deflexão δ em milímetros do arco de soldagem em regime estacionário

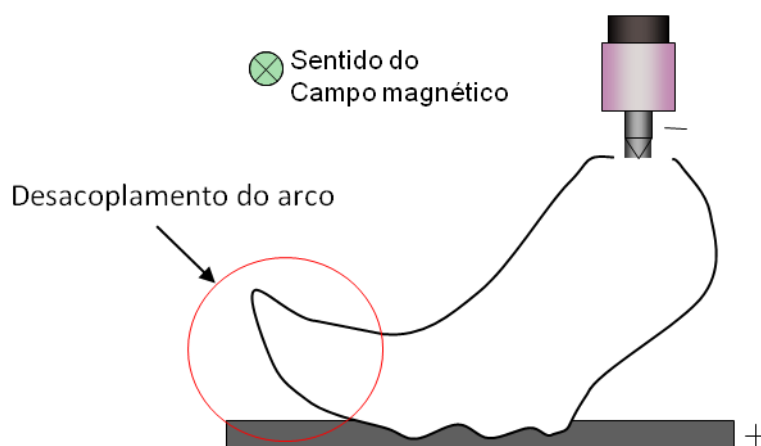


Figura 7.6 - Ilustração do desacoplamento do arco do metal de base

7.2 – Deslocamento de Cordão sob o Efeito da Deflexão Magnética do Arco em Aço ao Carbono (arco não estacionário)

7.2.1 – Equipamentos e parâmetros

Nesta etapa do trabalho foi confeccionado um cordão de solda em uma chapa de aço carbono, mostrando as características dos cordões gerados pelas deflexões causadas pelas diferentes geometrias das ponteiras. O experimento consistiu em soldar sobre a chapa de aço com o eletroímã inicialmente desligado, energizando-o alguns segundos depois sem parar a soldagem. Dessa forma, foi possível comparar o cordão antes e depois da imposição do campo magnético. Para isso, o eletroímã e as ponteiras foram fixados juntos à tocha de soldagem e colocados sobre uma mesa móvel com velocidade ajustável (o suporte da placa de teste movimenta enquanto a tocha e o eletroímã ficam parados). Depois de testes preliminares, a velocidade do deslocamento da placa de teste, que determina a velocidade de soldagem foi regulada em 15 cm/min, (aferido como 14,3 cm/min). Foi utilizada a fonte de soldagem IMC INVERSAL 300 (Figura 7.2), regulada para uma corrente de -120 A (CC-), Argônio (comercialmente puro) como gás de proteção e um eletrodo de tungstênio AWS EWP de 2,4 mm de diâmetro. A distância do eletrodo até a peça foi regulada para 7,5 mm (comprimento do arco), permitindo observar com mais facilidade o comportamento do arco. O metal de base utilizando foi uma chapa de aço carbono ABNT 1020, com 33 mm de largura e 4 mm de espessura.

Para a realização desse experimento, foi necessário ajustar a tensão do eletroímã em 22,5 V, gerando uma corrente de 240 mA (com o arco estacionário utilizou-se 7,18 V). Esse valor de tensão foi indispensável por ser o metal de base material ferromagnético, ou seja, com permeabilidade magnética bem maior que a do ar e do alumínio (usado no arco

estacionário). Dessa maneira, quanto mais próximo o metal de base estava das ponteiros, a intensidade do campo magnético diminuía. Para compensar essa perda de intensidade do campo magnético, foi aumentada a tensão de alimentação das bobinas. A posição das ponteiros e da tocha em relação ao sentido de soldagem são mostrados na Figura 7.7.

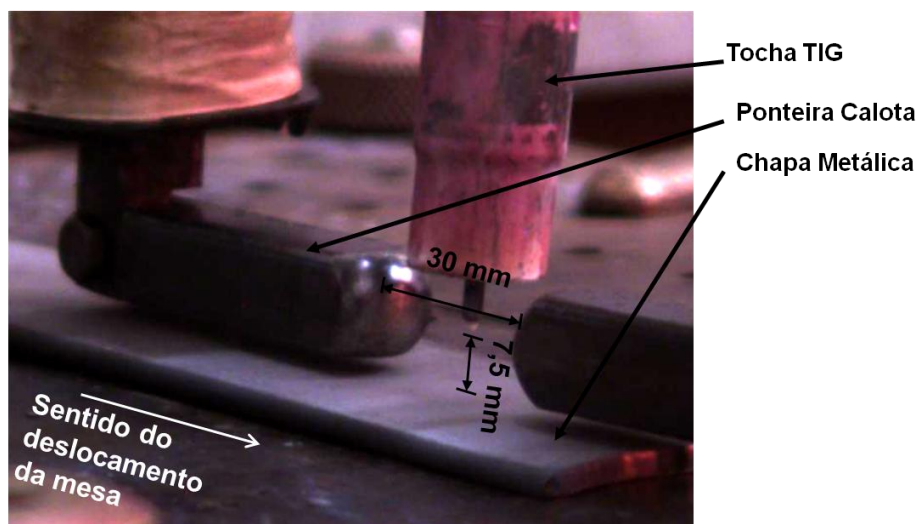


Figura 7.7 - Posicionamento das ponteiros em relação a tocha e destaque no sentido do deslocamento da placa teste

7.2.2 – Análise e resultados do efeito do tipo de ponteira sobre o deslocamento do cordão em soldagens sobre aço carbono (arco não estacionário)

Os cordões de solda realizados são mostrados na Figura 7.8. Eles foram analisados sob dois aspectos.

O primeiro foi a análise de quanto a linha de centro do cordão foi deslocada quando submetido ao campo magnético. Para isso, foram desenhadas duas linhas de centro no cordão, uma sobre o cordão sem deslocamento e outra sobre o cordão com deslocamento, como ilustrada na Figura 7.9. Os resultados do deslocamento do cordão de todas as ponteiros são apresentados na Tabela 7.2. Com esses valores, foi construído o gráfico do deslocamento do cordão em milímetros, mostrado na Figura 7.10.

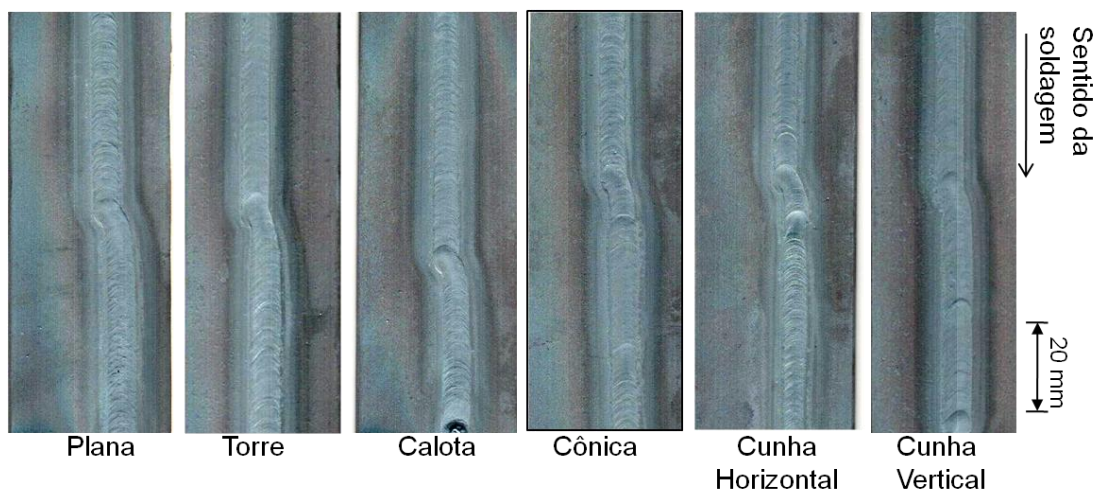


Figura 7.8 - Desvio no cordão de solda produzido pela deflexão magnética com as diferentes ponteiras

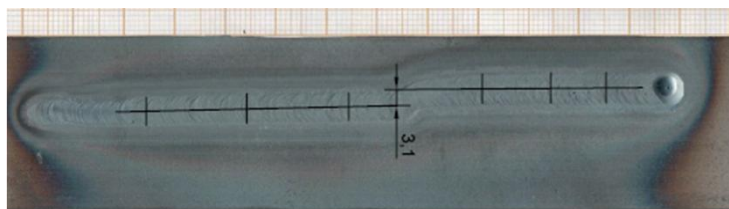


Figura 7.9 - Ilustração do procedimento para medição do deslocamento do cordão por meio de duas linhas de centro

Tabela 7.2 - Deslocamento sofrido pelo cordão de solda sob efeito da deflexão magnética.

Ponteiras	Deslocamento do cordão (mm)
Plana	3,1
Torre	2,6
Calota	1,9
Cone	1,8
Cunha Vertical	1,8
Cunha Horizontal	1,6

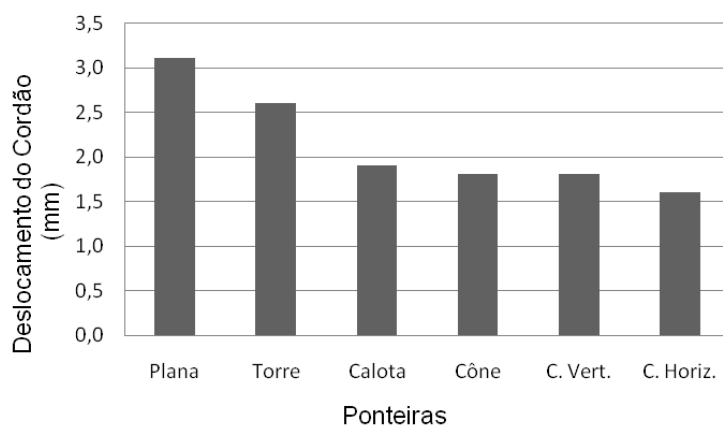


Figura 7.10 - Deslocamento em milímetros do cordão de solda pela deflexão magnética (arco não estacionário)

Pode-se novamente dizer que existem três classes de comportamento das ponteiros, a saber:

- Classe 1 (deslocamento mais alto) – ponteira plana
- Classe 2 (deslocamento médio) – ponteira torre
- Classe 3 (deslocamento mais baixo) – ponteiros Calota, Cone, Cunha vertical e Cunha Horizontal

A outra análise foi baseada na medição da largura do cordão em dez pontos diferentes, sendo cinco antes de acionar a deflexão magnética e os outros cinco depois que o arco foi defletido. Esta abordagem foi uma tentativa de se avaliar o quanto o arco acoplou na chapa, ou seja, quanto maior a largura, maior o acoplamento. Com os valores obtidos, foram calculadas as médias escalares, o desvio padrão da largura dos cordões e o percentual de aumento na largura do cordão antes e depois do deslocamento, os quais são mostrados na Tabela 7.3.

A diferença nas larguras dos cordões para as diferentes ponteiros antes do deslocamento pode ter ocorrido devido a erros intrínsecos experimentais. Mas em média, e considerando os desvios padrões, pode-se considerar todos com a mesma dimensão. Por isso, a análise foi feita pelo percentual da variação da largura e não sobre o valor absoluto. A Figura 7.11 ilustra esses resultados.

Tabela 7.3 - Dados da média escalar e desvio padrão das larguras dos cordões com e sem deflexão.

Ponteiras	$\bar{X}$ sem deflexão (mm)	Desv. Padrão sem deflexão (mm)	$\bar{X}$ com deflexão (mm)	Desv. Padrão com deflexão (mm)	% de variação na largura do cordão
Plana	5,3	0,3	6,3	0,1	15,1%
Torre	5,2	0,1	6,3	0,2	16,6%
Cunha Vertical	5,1	0,4	6,0	0,0	14,7%
Cone	5,0	0,1	5,7	0,4	11,4%
Calota	4,9	0,3	5,3	0,2	5,9%
C. Horizontal	4,6	0,2	4,4	0,5	-5,0%

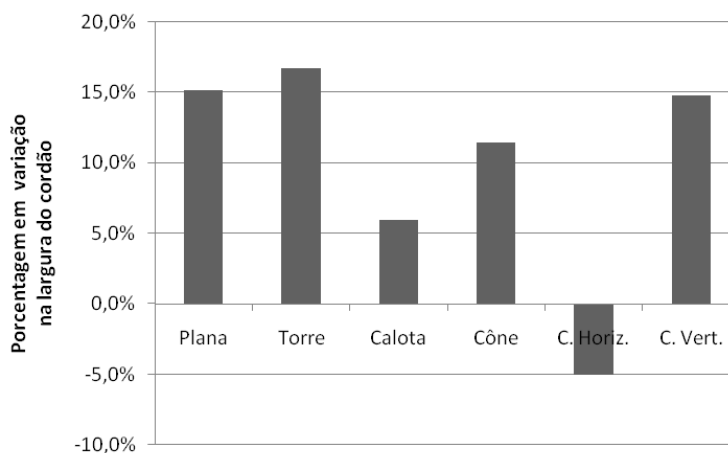


Figura 7.11 - Percentual de variação da largura do cordão quando aplicado o campo magnético

Agora, ao contrário dos casos da deflexão e do deslocamento, ficou um pouco mais difícil qualificar o comportamento por classes, mas cada ponteira (ou grupo) mostrou comportamento distinto.

7.3 – Discussão e Análise Comparativa dos Resultados dos Ensaios com Arco Estacionário e não Estacionário

7.3.1 – Comparação dos resultados

A maneira mais fácil de analisar e comparar os resultados obtidos foi construindo um gráfico, fazendo uma relação de rendimento dos resultados obtidos pela primeira etapa (deflexão do arco estacionário) com os resultados da segunda etapa (deslocamento de cordão), como mostrado na Figura 7.12. Para elaboração desse gráfico, foi realizada uma normalização dos valores de resposta, tomados como referência os resultados da ponteira Plana, imposta para eles o valor de 1. Para as outras geometrias, seus valores foram proporcionais aos resultados obtidos com a ponteira Plana.

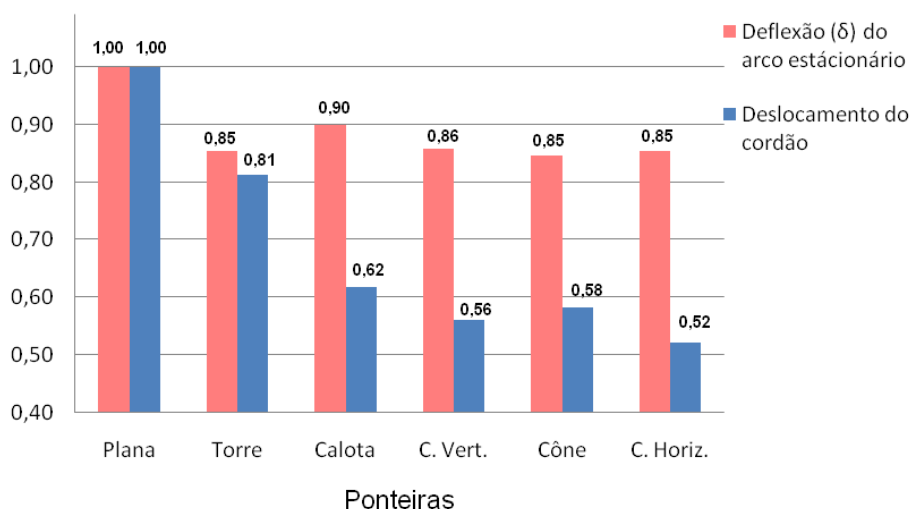


Figura 7.12 - Comparação dos resultados normalizados da deflexão do arco estacionário (δ) e o deslocamento do cordão (não estacionário).

Em todas as ponteiras com exceção da Torre, ocorreu correlação nos comportamentos analisados, ou seja, o arco estacionário que foi muito defletido conseguiu gerar um cordão bem deslocado. Nas ponteiras da categoria de baixo nível ocorreram baixas deflexões de arco, gerando cordões com pouco deslocamento. A correlação dos dois experimentos é bem destacada na ponteira Calota, pois, ocorreu deflexão do arco um pouco

mais intensa que na ponteira Cunha Vertical e isso fez gerar um cordão com deslocamento um pouco maior.

A ponteira Torre fugiu da regra, devido seu comportamento particular na deflexão do arco. Ao se observar os detalhes do triângulo de Kang e Na do arco defletido por essa ponteira na Tabela 7.1, verificar-se-á que o triângulo de Kang e Na só examina a base do arco que está acoplada ao metal de base, desconsiderando toda a porção do arco que está desacoplada, fazendo o valor medido de δ ser menor. Entretanto, ao analisar o deslocamento do cordão no arco não estacionário, ocorreu um desacoplamento pequeno, proporcionando um nível elevado na deflexão. Isso resulta na não correlação dos resultados para a ponteira Torre.

7.4 – Soldagem com Arco Defletido em uma Junta Sobreposta

Nesta etapa do trabalho foi confeccionado um cordão de solda TIG sem alimentação de arame sobre uma junta sobreposta de barras chatas de aço carbono. Foi utilizada a mesma mesa de soldagem do estudo do item 7.2, ou seja, o suporte da placa de teste movimenta, enquanto a tocha e o eletroímã ficam parados. A deflexão do arco foi propositalmente feita na direção da face lateral da junta sobreposta, como ilustrado na Figura 7.13. A posição do eletrodo junto ao metal de base, as dimensões das barras de aço, o sentido do campo magnético e a forma de deslocamento do arco, são mostradas na Figura 7.13. O experimento consistiu em utilizar cada ponteira do eletroímã para defletir o arco de soldagem sobre a face lateral da junta sobreposta, sem alterar os parâmetros de soldagem. Como cada ponteira do eletroímã cria um perfil diferente no arco de soldagem, é de se esperar geometrias de cordões característicos e coerentes com a forma e intensidade de desvio verificada nos itens anteriores.

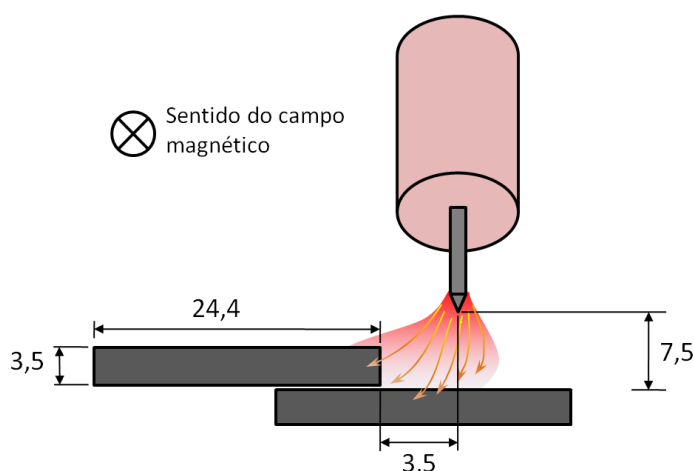


Figura 7.13 - Posição da tocha em relação a junta sobreposta e dimensão das barras de aço.

A soldagem TIG foi feita com um eletrodo de tungstênio AWS EWP de 2,4 mm de diâmetro, afiado com ângulo de 60°, a fonte foi regulada para trabalhar com uma corrente de -125 A (CC-), com Argônio (comercialmente puro) como gás de proteção. A distância do eletrodo até a peça (barra inferior) foi regulada para 7,5 mm (comprimento do arco) e a uma distância horizontal de 3,5 mm da junta.

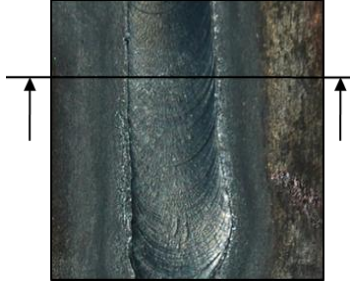
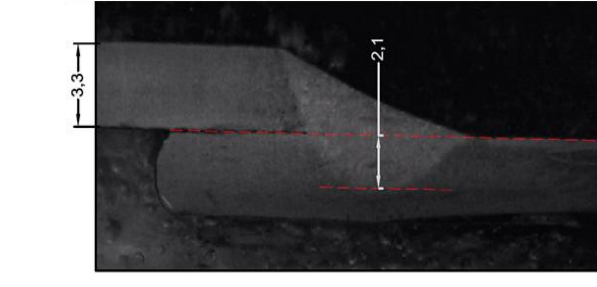
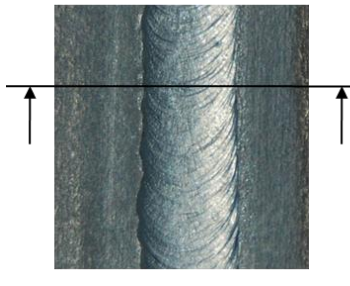
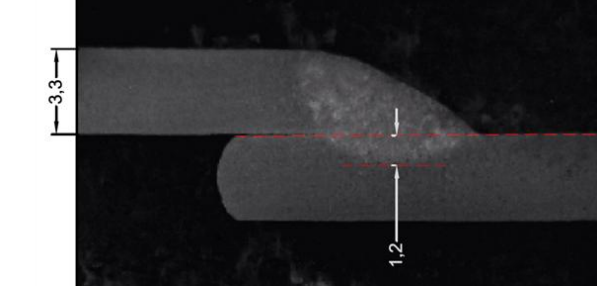
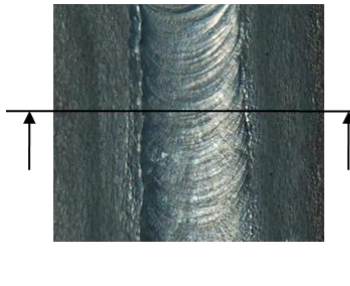
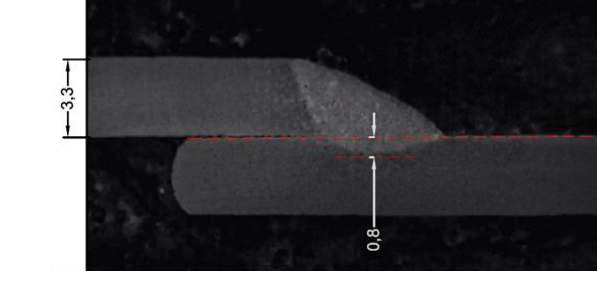
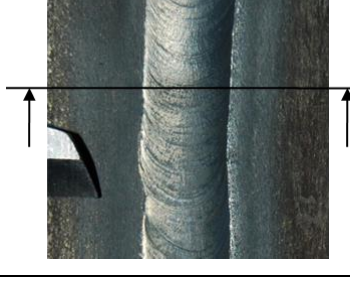
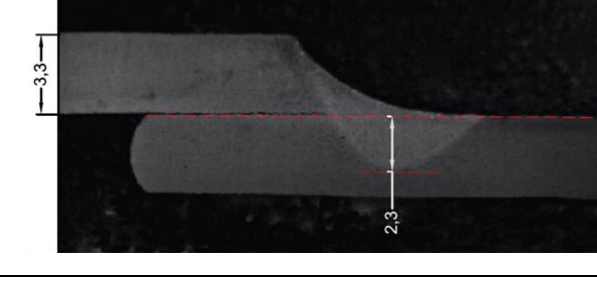
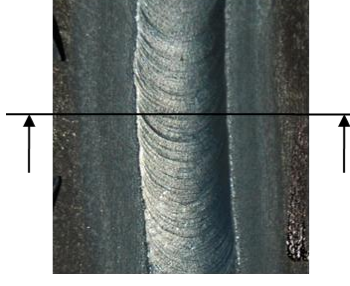
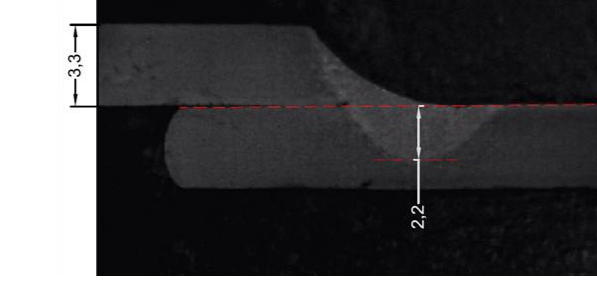
O eletroímã (regulado para uma tensão de 14 V, que proporcionou uma corrente de 89 mA) e as ponteiros (com as faces espaçadas de 25 mm uma da outra), foram colocadas fixas na tocha TIG e sobre uma mesa móvel, ajustada a uma velocidade de 9 cm/min (ao conferir a velocidade real da mesa constatou que o valor foi de 7,9 cm/min).

A avaliação da geometria foi realizada tirando-se uma seção transversal de cada barra soldada. Estas seções foram preparadas metalograficamente (lixas #120, #220, #320, #400 e #600) e atacada com NITAL 2% (98 ml de álcool etílico e 2 ml de ácido nítrico concentrado). As dimensões foram obtidas através da digitalização das imagens das seções e do uso do softwares AutoCad®, tendo como referência para calibragem das imagens a espessura do metal de base.

7.4.1 – Resultados das análises dos cordões das juntas sobrepostas

As vista de cima dos cordões de soldas com suas respectivas seções transversais, são mostradas na **Erro! Auto-referência de indicador não válida.** A quantificação das penetrações e avaliação qualitativa da forma das superfícies dos cordões são apresentados na Tabela 7.5 enquanto a Figura 7.14 apresenta a penetração linear alcançada com cada uma das ponteiros.

Tabela 7.4 - Vista de cima dos cordões realizados em juntas sobrepostas e corte transversal com indicação da penetração

Tipo de Ponteira	Vista superior do cordão	Corte transversal com tratamento metalográfico
Plana		
Torre		
Calota		
Cone		
C. Horiz.		

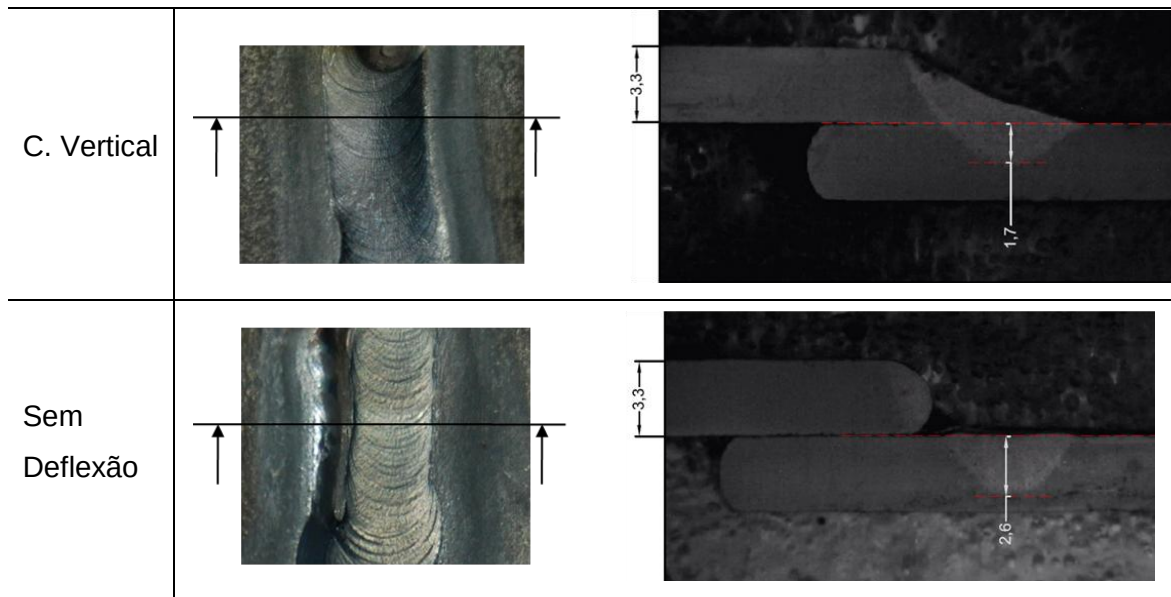


Tabela 7.5 - Penetração linear e concavidade da superfície do cordão de solda

Ponteiras	Penetração linear (mm)	Concavidade do cordão
Plana	2,1	Levemente côncavo
Torre	1,2	Convexa
Calota	0,8	Convexa
Cone	2,3	Côncava
C. Vertical	1,7	Levemente côncava
C. Horizontal	2,2	Côncava
Sem deflexão	2,6	Não formou cordão entre a face lateral e o metal de baixo

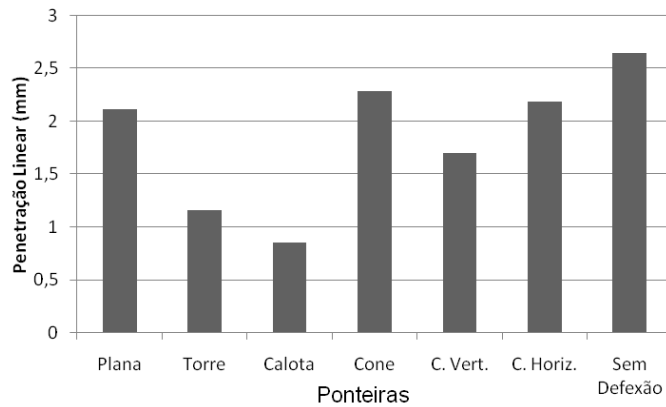


Figura 7.14 - Penetração linear em milímetros do cordão de solda na junta sobreposta.

O comportamento mostrado na análise da geometria do cordão da junta sobreposta, revela que:

- As ponteiros que têm menor eficiência em defletir o arco de soldagem e apresenta baixo nível de desacoplamento com o metal de base, geram arcos que fornecem mais calor para a barra metálica de baixo, e menos calor na face lateral da junta sobrepostas, resultando em cordões com maior penetração e superfície côncava;
- As ponteiros que geram maior deflexão, mas apresenta desacoplamento com o metal de base, modulam arcos que fornecem mais calor na face lateral da junta do que no metal de baixo, gerando cordões com pequena penetração e com superfícies convexas.

CAPÍTULO VIII

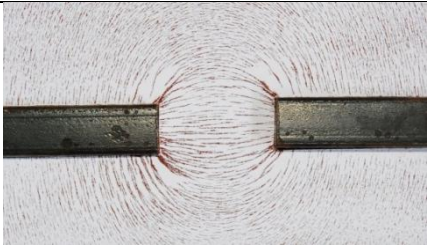
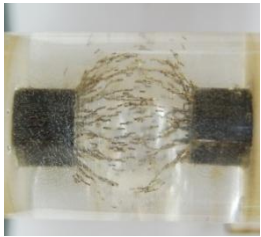
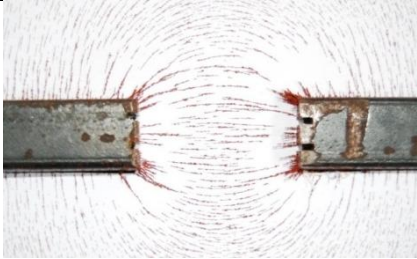
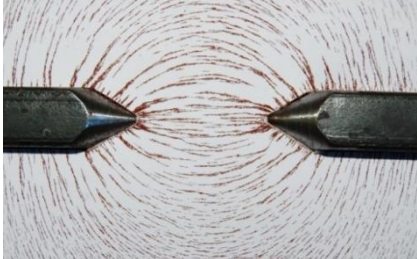
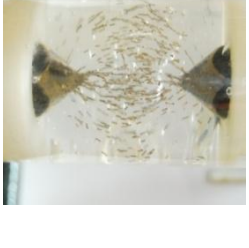
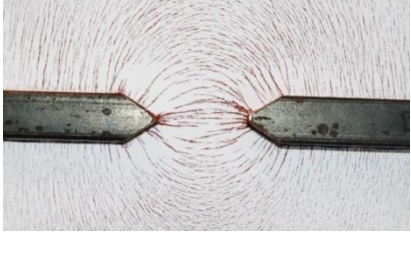
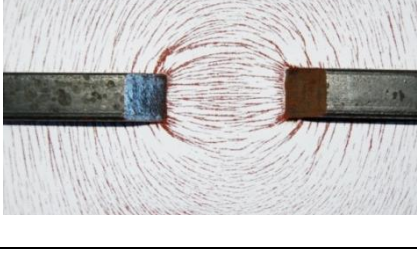
DISCUSSÃO GERAL

O presente trabalho usou como metodologia inicialmente visualizar o efeito do campo magnético produzido por diferentes geometrias de ponteiras através de duas abordagens. Inicialmente adaptou-se para este caso a técnica convencional de visualização de linhas de indução em 2D, usando-se limalhas sobre um plano de papel. Depois, procurou-se desenvolver uma técnica nova para a visualização de linhas de indução em 3D. Um segundo passo da metodologia foi a quantificação do campo por meio de um teslâmetro, gerando superfícies de respostas da intensidade do campo magnético gerado pelas ponteiras. Finalizou-se com a aplicação dos campos das ponteiras em arcos de soldagem, para confirmar a relação entre as geometrias visualizadas dos campos com as medições dos campos e com os efeitos sobre um arco de soldagem.

8.1 – Relacionando os Resultados da Visualização 2D com 3D

Foi realizada uma comparação entre as visualizações das linhas de indução em 2D e 3D, de todas as ponteiras, para verificar se os pontos de concentração das linhas de indução seriam ou não semelhantes em torno das superfícies das ponteiras do eletroímã. Essa comparação é mostrada na Tabela. 8.1.

Tabela 8.1 - Comparação das visualizações em 2D e 3D

Ponteiras	Visualização 2D	Visualização 3D	Correlação
Plana			Correlacionados: homogênea entre as ponteiros, com leve concentração nas arestas nos dois casos.
Calota			Correlacionados: distribuída em toda superfície nos dois casos.
Torre			Correlacionados: ocorreu forte concentração de linhas nas arestas e distribuição homogênea no centro, nos dois casos.
Cone			Correlacionados: forte concentração na extremidade, e geração de uma elipses no centro com maior nº de linhas, nos dois casos.
C. Vert.			Correlacionados: formação de um plano com maior nº de linhas entre as ponteiros na posição da cunha nos dois casos.
C. Horiz.			Correlacionados: formação de um plano com maior nº de linhas entre as ponteiros na posição da cunha nos dois casos.

A tabela 8.1 mostra que ocorreu uma boa correlação entre os dois métodos de visualização para todas as ponteiras. Nas duas abordagens, revelou-se que quanto mais “pontiaguda” é a ponteira, maior é a concentração de linhas de indução.

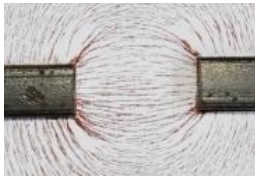
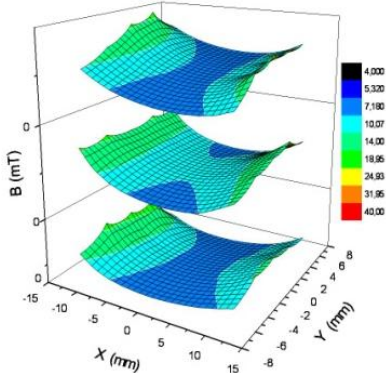
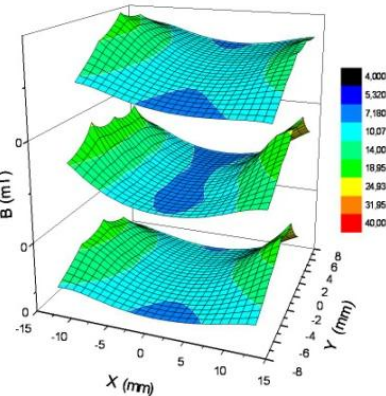
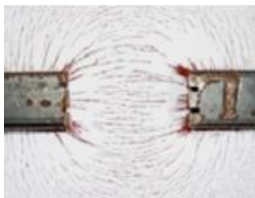
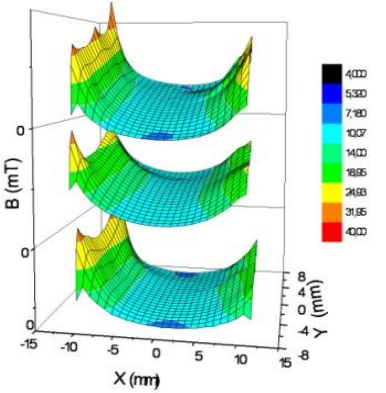
A visualização em 3D foi muito importante para apresentar resultados da distribuição das linhas de indução nas ponteiras que não têm simetria em torno de um eixo, como nos casos da Cunha Vertical e Cunha Horizontal (nessas duas ponteiras, a visualização 2D não foi capaz de apresentar completamente as distribuições das linhas de indução).

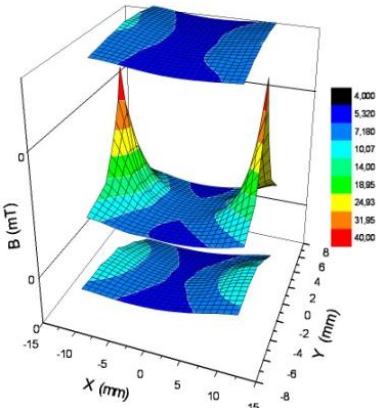
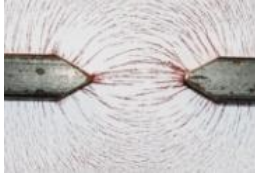
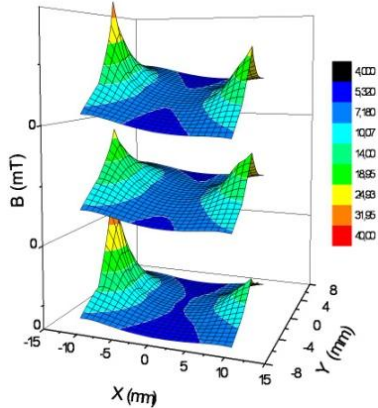
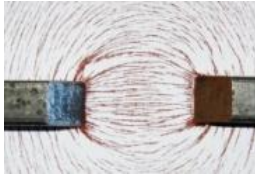
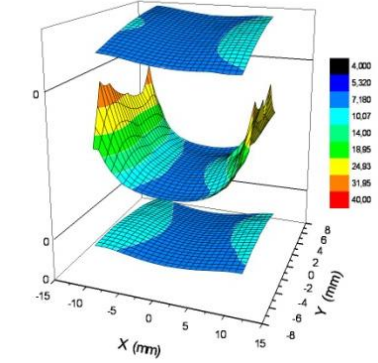
Porém, os experimentos das visualizações não foram suficientes para determinar como o arco é defletido perante um campo magnético gerado pelas ponteiras. Um exemplo foi o comportamento da ponteira Cone, que foi a que apresentou, pela visualização 2D e 3D, maior densidade de linhas de indução (na ponta do cone). Deste modo, ela deveria gerar a maior deflexão no arco, mas ocorreu justamente o inverso, a ponteira Cone gerou um nível de deflexão baixo dentre as ponteiras.

8.2 – Análise da Superfície de Resposta da Intensidade do Campo Magnético

As medidas realizadas com o teslâmetro complementaram os resultados das visualizações das linhas de indução e trouxeram novas interpretações da distribuição do campo magnético em torno de cada ponteira. Na Tabela 8.2 são apresentadas as visualizações 2D e a superfície de resposta da intensidade magnética. Pela comparação dos resultados, pode-se propor quais das ponteiras teriam boa eficiência na deflexão de um arco de soldagem.

Tabela 8.2 - Comparação dos resultados das visualizações 2D e das superfícies de respostas (SR) da intensidade do campo magnético.

Ponteiras	Visualização 2D (V2D)	Superfície de Resposta (SR)	Correlação
Plana			Correlacionados: intensidades do campo magnético maior quando próximo da superfície da ponteira plana.
Calota			Razoavelmente correlacionados: intensidades do campo magnético maior quando próximo da superfície da ponteira Cone, mas a SR revela um decaimento um pouco maior do que na ponteira Plana.
Torre			Razoavelmente correlacionados: intensidades do campo magnético maior quando próximo da superfície, mas a SR revela a maior intensidade do campo entre as ponteiras e picos elevados próximo das arestas da torre.

Cone			Razoavelmente correlacionados: intensidades do campo magnético maior quando próximo da ponta do cone. Mas a SR revela o decaimento muito rápido ao afastar da ponta do cone, não evidenciando uma linha com alta intensidade.
C. Vert.			Razoavelmente correlacionados: intensidades do campo magnético maior em toda aresta da Cunha Vertical. Mas a SR revela o decaimento rápido entre as ponteiros, não evidenciando a formação do plano com intensidade maior entre as ponteiros.
C. Horiz.			Intensidades do campo magnético maior em toda aresta da Cunha Horizontal. Mas a SR revela o decaimento rápido entre as ponteiros, não evidenciando a formação do plano com intensidade maior entre as ponteiros.

Os resultados da superfície de resposta não contradizem os resultados das visualizações das linhas de indução, confirmando que nas pontas e nas arestas realmente ocorrem maiores intensidades do campo magnético. Mas essas superfícies de respostas revelaram que quanto maior a intensidade do campo magnético em uma determinada região, maior é o decaimento da intensidade do campo quando deslocado para região central entre as ponteiros.

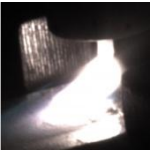
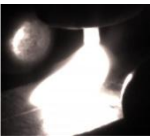
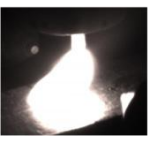
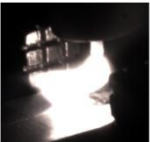
Mesmo com os valores quantitativos das superfícies de respostas juntamente com os resultados qualitativos das visualizações 2D e 3D, não foi possível prever como o arco se comportaria perante campos magnéticos gerados por essas ponteiras, pois existem outros parâmetros que não são controlados (por exemplo, com a ponteira Torre ocorreu desacoplamento do arco do metal de base, dissipando energia e diminuindo sua eficiência). Então foi necessário testar o efeito das ponteiras diretamente sobre um arco, para verificar como o arco se comporta com a configuração do campo magnético gerado pelas ponteiras.

8.3. – Comportamento Esperado para o Deslocamento do Cordão em Função da Deflexão do Arco

A aplicação direta do campo magnético no arco de soldagem, perante as diferentes formas de distribuição das linhas de indução e de intensidade do campo magnético, revelaram os verdadeiros formatos dos desvios dos arcos.

Diante dos resultados da deflexão do arco estacionário (grau de deflexão e grau de desacoplamento do arco do metal de base) foi possível propor hipóteses de como o arco deveria se comportar na confecção dos cordões de soldas, tomando como base a deflexão do arco estacionário. Criou-se, então, a Tabela 8.3, a qual mostra o comportamento esperado e relaciona com o comportamento real do arco obtido no deslocamento do cordão. Essa tabela demonstra que não é somente a deflexão do arco que é importante, mas também o acoplamento do mesmo ao metal de base. Além disso, a tabela mostra que ocorre coerência na análise do deslocamento do cordão.

Tabela 8.3 - Resultados e Comportamento esperado para cada ponteira.

Ponteira	Grau de deflexão do arco	Grau de desacoplamento do arco	Comportamento esperado com arco defletido na confecção de um cordão		Relação da hipótese com o comportamento real do arco no deslocamento do cordão
			Deslocamento do cordão	Variação na largura do cordão	
Plana 	Alto	Sem desacoplamento	Alto	Alto	Comportou-se como esperado (deslocamento e largura)
Calota 	Médio	Médio	Médio	Alto	Deslocamento do cordão: como esperado Aumento na largura: sem relação
Cone 	Baixo	Sem desacoplamento	Baixo	Médio	Deslocamento do cordão: como esperado Aumento na largura: sem relação
C. Horizont. 	Baixo	Sem desacoplamento	Baixo	Médio	Deslocamento do cordão: como esperado Aumento na largura: sem relação
C. Vertical 	Baixo	Médio	Baixo	Baixo	Deslocamento do cordão: como esperado Aumento na largura: sem relação
Torre 	Baixo	Alto	Baixo	Baixo	Deslocamento do cordão: sem relação Aumento na largura: como esperado

8.4 – Comportamento Esperado para a Soldagem da Junta Sobreposta em Função da Deflexão do Arco e Deslocamento do Cordão

Com os resultados obtidos na deflexão do arco estacionário e não estacionário foi possível elaborar algumas hipóteses de como o arco deveria se comportar na soldagem da junta sobreposta. Para isso, foi criada a Tabela 8.4, que também apura a existência de correlações dos resultados dos experimentos. Essa tabela mostra o comportamento esperado e relaciona com o comportamento real da soldagem da junta sobreposta.

Tabela 8.4 - Comportamento esperado e correlacionado com o comportamento real do arco na soldagem de uma junta sobreposta

Ponteira	Deflexão do arco estacionário	Desacoplamento. do arco estacionário	Deslocamento do cordão	Comportamento Esperado		Correlação com o comportamento Real	
				Penetração	Concavidade	Penetração	Concavidade
Plana	Alto	Não ocorreu	Alto	Médio	Plano	Sem relação	Como esperado
Torre	Baixo	Alto	Médio	Baixo	Convexo	Como esperado	Como esperado
Calota	Médio	Médio	Baixo	Médio	Plano	Sem relação	Sem relação
Cone	Baixo	Não ocorreu	Baixo	Alta	Côncavo	Como esperado	Como esperado
C. Horz.	Baixo	Não ocorreu	Baixo	Alta	Côncavo	Como esperado	Como esperado
C. Vert.	Baixo	Médio	Baixo	Alta	Côncavo	Sem relação	Como esperado

A Tabela 8.4 demonstra que ocorreu boa correlação entre a deflexão e o desacoplamento do arco ao metal de base, sendo evidenciado em 8 casos do total de 12. Isso mostra que essas duas naturezas (deflexão e desacoplamento) exercem efeito na soldagem de uma junta sobreposta. Sendo assim, as duas análises são muito importantes para o estudo de eficiências da soldagem com deflexão magnética. Os arcos defletidos que tiveram desacoplamento gerou uma superfície convexa e com pouca penetração, pois o arco atinge diretamente a face lateral da junta sobreposta. Já os arcos defletidos sem desacoplamento formaram cordões com superfícies côncava e com alta penetração, provavelmente porque o arco fornece calor com mais intensidade na barra metálica de baixo do que na face lateral da junta.

Portanto, o estudo da deflexão magnética do arco de soldagem mostrou duas naturezas importantes relacionadas com a geometria do cordão formado, uma relacionada com a intensidade da deflexão do arco e a outra com o acoplamento do arco no metal de base. No caso da junta com chapas sobrepostas, uma deflexão maior reflete numa maior fusão da chapa sobreposta, enquanto um maior acoplamento reflete numa maior penetração na chapa de baixo. Assim, pode-se projetar a ponteira de acordo com a necessidade da junta.

CAPÍTULO IX

CONCLUSÃO

Do ponto de vista metodológico e de caracterização do efeito da geometria da extremidade (no texto referenciado como pontaria) sobre a alteração das linhas de campo magnético, pode-se apontar que:

- Através da visualização 2D apresentada, foi possível verificar as diferentes geometrias das linhas de campo magnética sobre um plano em função das diferentes geometrias de extremidades dos eletroímãs;
- Através da visualização 3D, foi possível observar a variação da forma de distribuição das linhas de indução quando as extremidades do núcleo do eletroímã não eram simétricas;
- Porém, as metodologias de visualização 2D e 3D dão pouca indicação quantitativa das alterações da distribuição das linhas de indução na área em torno das extremidades do núcleo do eletroímã;
- A metodologia de mapeamento quantitativo da intensidade magnética entre as extremidades do núcleo do eletroímã mostrou ser mais abrangente, por permitir também mostrar variações das intensidades das linhas de indução na região entre as extremidades do núcleo do eletroímã;

- Quanto mais “pontaguda” a superfície da ponteira, maior a intensidade do campo magnético, porém o decaimento é maior ao se deslocar para o ponto médio entre as extremidades do núcleo do eletroímã;
- As extremidades do núcleo do eletroímã Cone e Cunha Vertical concentraram o maior número de linhas de indução magnética na região central entre as extremidades;
- As extremidades do núcleo do eletroímã Torre, teve a maior intensidade do campo magnético na região central entre as extremidades, sendo o valor atingido de 8,6 mT;
- As extremidades do núcleo do eletroímã Cone atingiu o maior valor de intensidade de campo magnético próximo da extremidade do núcleo do eletroímã, com valor de 40,5 mT, e atingiu o menor valor na região central das extremidades com valor de 5,4 mT.

Já do ponto de vista do efeito da geometria das extremidades dos eletroímãs sobre a deflexão do arco, pode-se concluir que:

- Portanto, Modificando apenas o formato da ponteira do eletroímã, é possível modificar forma e intensidade da deflexão de um arco de soldagem;
- As extremidades dos eletroímãs que mais deslocaram o arco foram as do tipo Plana, Torre e Calota, sendo que estas geometrias possuem maiores faces direcionada para o arco de soldagem;
- As extremidades dos eletroímãs que menos deslocaram o arco foram as do tipo Cunhas e Cone que são geometrias com face menor direcionada para o arco.

CAPÍTULO X

PROPOSTAS PARA TRABALHO FUTUROS

Como forma de complementar os estudos realizados neste trabalho, seguem-se os seguintes temas:

- Planejar um estudo da deflexão do arco, oscilando-o de forma bilateral ao invés de unilateral, com objetivo de evitar que resíduos magnéticos nas extremidades do núcleo do eletroímã afetem os resultados;
- Colocar um ângulo menor do que 180° entre as extremidades do núcleo do eletroímã para verificar a forma e a qualidade do arco defletido, pois essa posição deixa as extremidades do núcleo do eletroímã mais afastadas do metal de base, podendo melhorar ainda mais a eficiência dos eletroímãs;
- Realizar um planejamento experimental com parâmetros independentes (distância das extremidades do núcleo do eletroímã ao arco, tensão nas bobinas do eletroímã e ângulo entre as extremidades e a tocha) para as extremidades do núcleo do eletroímã Calota (que demonstrou maior potencial na deflexão do arco), para achar o ponto de máximo e mínimo e entender o efeito de cada parâmetro;
- Criar uma nova extremidade de eletroímã Cunha Vertical, com tamanho adequado, para realizar deflexão de arcos dentro de uma junta estreita, com a tentativa de colocar a extremidade do núcleo do eletroímã dentro da junta;
- Criar novas extremidades para o eletroímã de uma só geometria, mas agora mudando o material da mesma, para analisar seus efeitos;

- Avaliar a tolerância da deflexão magnética do arco de soldagem na abertura e forma de juntas;
- Realizar um estudo referente a absorção de calor nas extremidades do núcleo do eletroímã quando estão próximas de um arco de soldagem, e verificar como esse calor absorvido pode interferir na deflexão do arco de soldagem;
- Planejar um estudo de como ocorre a transferência metálica em soldagem MIG/MAG quando aplicado à deflexão magnética gerada pelas diferentes extremidades do núcleo do eletroímã, verificando, também, qual tipo de transferência é mais apropriado para ser defletido magneticamente.

CAPÍTULO XI

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRUECKER, Daniel e SCOTTI, Américo. Increasing travel speed with pulsed MIG switch back welding on lap joint, Universidade Federal de Uberlândia, Dezembro, Report, 2007.

CULTURAMIX. Disponível em: <http://www.culturamix.com/cultura/curiosidades/o-farol-alto-na-estrada>. Acessado em 09 jan 2011.

DAVIS, J. C.; Statistics and Data Analysis in Geology; **John Wiley & Sons**, 2ª ed, p. 383. 1986.

EISBERG, R.; RESNICK, R.; **Física Quântica: Átomos, Moléculas, Sólidos, Núcleos e Partículas**; Rio de Janeiro; Elsevier, 1979.

ENCYDIA BETA. Campo Magnético. Disponível em: pt.encydia.com/es/Campo_magnético. Acesso em: 11 set 2010.

GREENE, W. J.; **Magnetic Oscillation of Welding Arc**. 2.920.183. US. Serial Nº 639.779. 12 fev 1957. 05 jan 1960. New York, United States Patent Office.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R; WALKER, J; **Fundamentos da Física**; Volume 3; 6ª ed; p.142; 2003.

HUGHES, R. V.; WALDUCK, R. P. Electromagnetic arc path control in robot plasma welding. Robotic welding. IFS Publication and Springer-Verlag, pp.243-263, 1987.

JACKSON, J. D. **Classical Electrodynamics**, New York: John Wiley & Sons, 1962.

KANEKO, Y.; MAEKAWA, Y.; YAMANE, S.; OSHIMA, K.; Numerical Simulation of MIG Weld Pool in Switch Back Welding, Proc. of International Institute of Welding Commission XII, IIW. Doc. 212-1106-07, pp.128-134. 2007.

KANG, Y. H.; NA, S. J. A Study on the Modeling of Magnetic Arc Deflection and Dynamic Analysis of Arc Sensor, **Welding Journal**, p. 8-13, Janeiro 2002.

KANG, Y. H.; NA, S. J. Characteristics of Welding and Arc Singnal in Narrow Groove Gas Metal Arc Welding Using Electromagnetic Arc Oscillation, **Welding Journal**, p. 93-99, Maio 2003.

KOU, S.; **Welding Metalurg**, New Jersey, John Wiley & Sons, p. 466, 2003.

KOU, S.; KANEVSKY, Y; Carnegie-Mellon University, Pittsburgh, PA, 1980.

MARQUES, P. V. **Desenvolvimento e Avaliação de um Sistema Para Soldagem TIG Mecanizada**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, 1984.

MESSLER, R. W. **Principles of Welding: Processes, Physics, Chemistry and Metallurgy**. Alemanha, Wiley-Vch verlag Gmbh & Co. KGaA. 689p., 1999.

MOTA, C. P. **Sistema de Visão por Infravermelho Próximo para Monitoramento de Processos de Soldagem a Arco**. 2011. 137 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

MUNDIN, K. C. Disponível em: http://fricke.rebello.nom.br:8118/mrebello/d/Informacoes/Matematica_Fisica/Fisica/aula12.htm. Acesso em: 11 set 2010.

PHYWE. Disponível em: <http://www.phywe.com/461/pid/4690/Teslameter,-digital-.htm>. Acesso em: 12 nov 2011.

REIS, R. P.; **Assessment of Low Current Tandem GMAW Processes with Waveform Control and with Aid of Laser Beam**; Tese de Doutorado; Universidade Federal de Uberlândia; 2009.

SCHIRRA, J. J.; CALESS, R. H.; HATALA, R. W. **Various Deribatives, The minerals, Metals and materials, Warrendale**, Proceedings of the Conference on Superalloys, p. 375-388, 1991.

SCOTTI, A.; PONOMAREV, V. **Soldagem MIG/MAG: Melhor entendimento, Melhor desempenho**, São Paulo, Artliber Editora, 284 p., 2008.

SIVAPRASAD, K.; RAMAN, G. S. Influence of Magnetic Arc Oscillation and Current Pulsing on Fatigue Behavior of Alloy 718 TIG Weldments, **Materials Science & Engineering**, Tamil Nadu – Índia, A448 (2007), p. 120-127, Out. 2006.

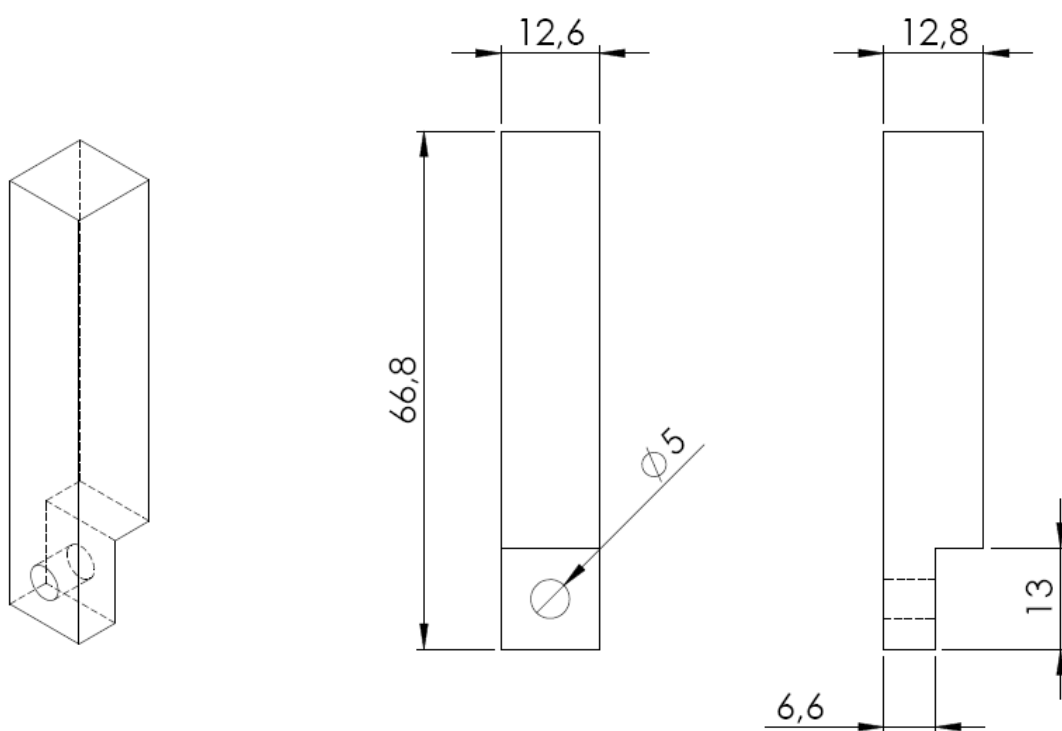
YAMANE S.; ISHIKAWA T.; NAKAJIMA T.; YAMAMOTO H.; KANEKO Y.; OSHIMA K., Torch Weaving and Feed-forward Control of Back Bead in one Side Backing less V Groove Welding by using Switch Back Welding, **Japan Welding Society**, 25, p. 159-164, mar. 2007

YAMANE, S.; YOSHIDA, T.; YAMAMOTO, H. In Process Control of Weld Pool using Weaving Control in Switch Back Welding, **Japan Welding Society**, 27, p. 32-36, out. 2009.

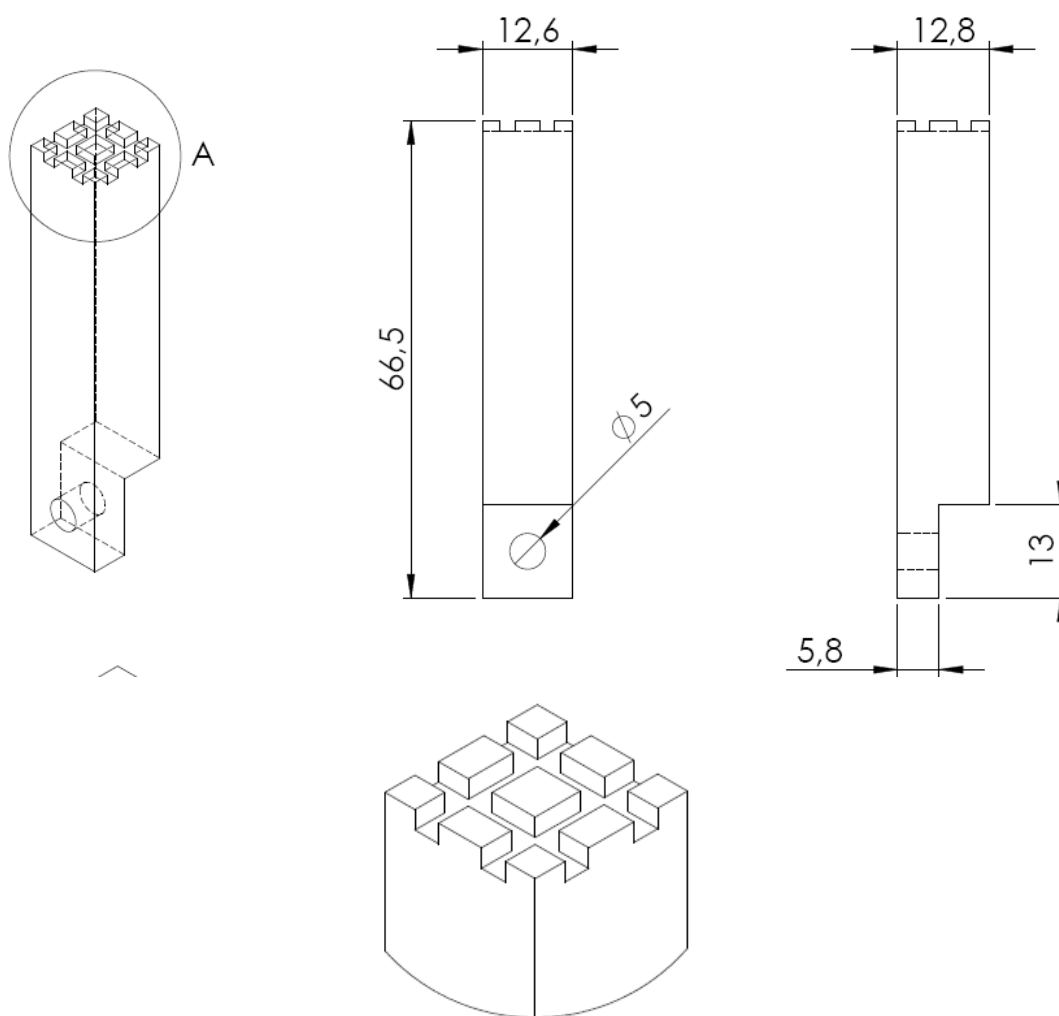
ANEXO I

DADOS DIMENSIONAIS DAS PONTEIRAS

I - Ponteira de geometria Plana

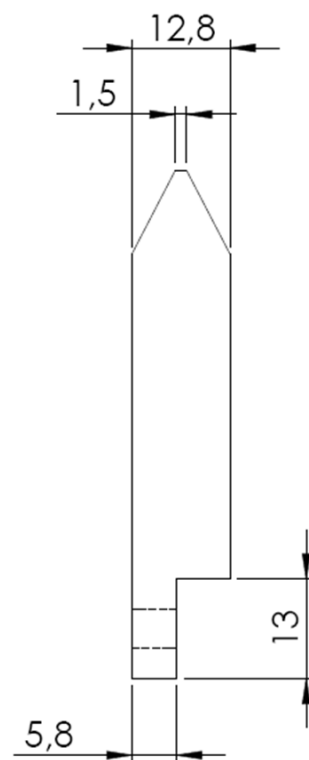
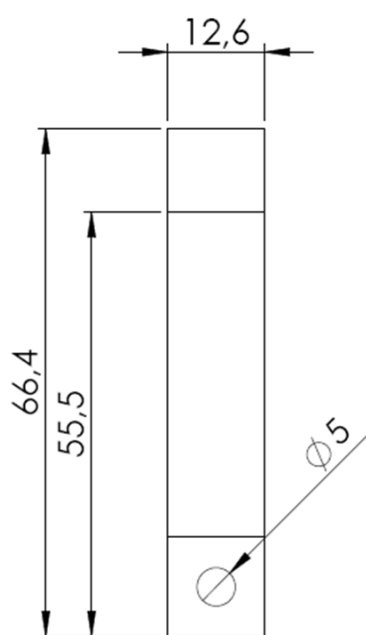


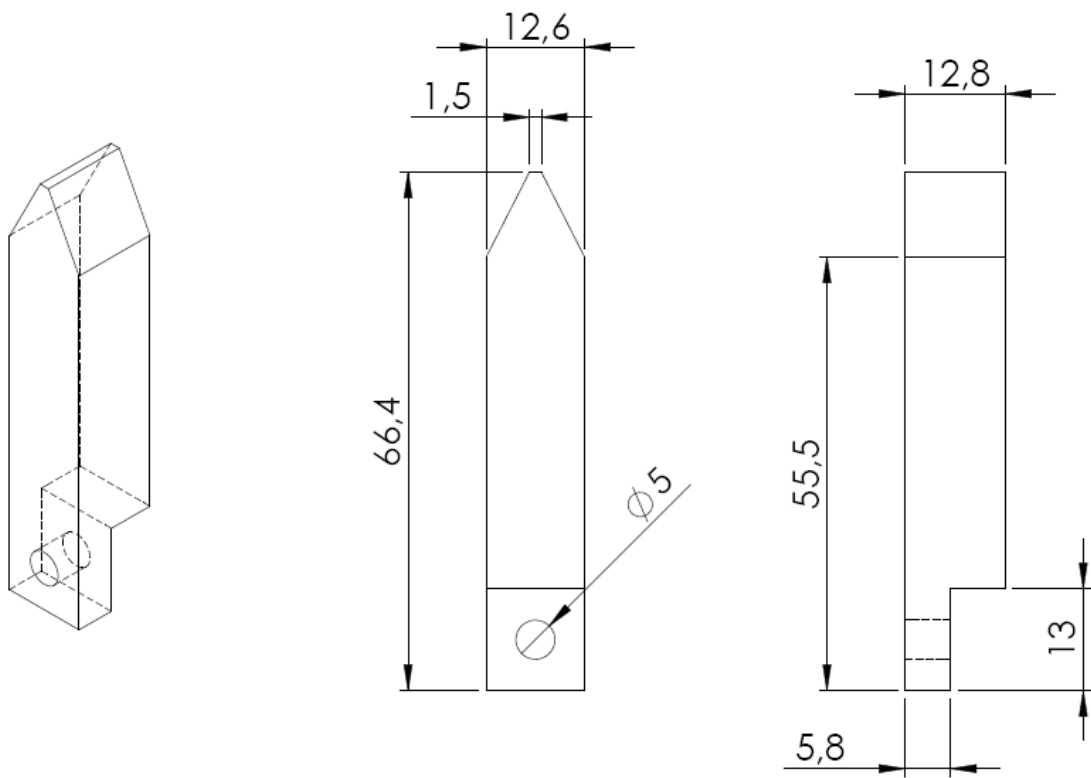
II - Ponteira de geometria Torre

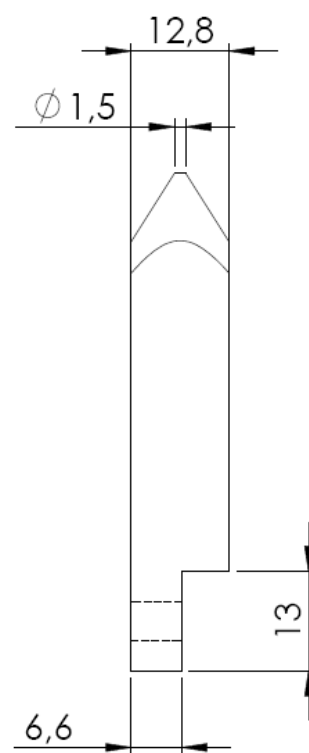
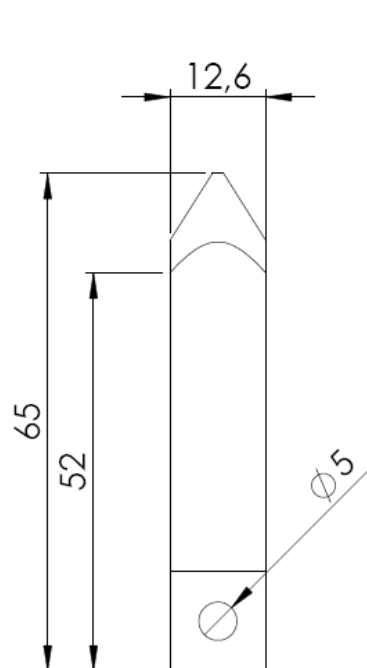
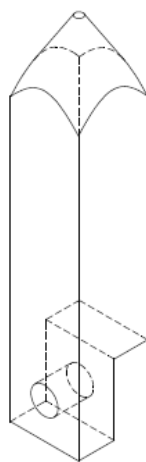


DETALHE A

III - Ponteira de geometria Cunha Vertical



IV - Ponteira de geometria Cunha Horizontal

V - Ponteira de geometria Cônica

ANEXO II

ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO AGAR AGAR TYPE I



AGAR AGAR, TIPO I
CAT. RM666 – 500G

Agar Agar Tipo I é produzido para uso em trabalhos rotineiros bacteriológicos em laboratórios, meios de cultura para tecidos vegetais, preparação farmacêuticas, onde pureza e compatibilidade não são de importância primordial.

Especificações:

Nitrogênio total: máximo de 5,0%

Unidade: máximo de 20,0%

Cinzas: máximo 5,0%

Resíduo insolúvel em água destilada: máximo de 5,0%

Temperatura de solidificação: 42 – 45°C

Temperatura de derretimento do gel: 90 – 95°C

Viscosidade: 75 – 120cps

pH (solução de 1,5%): $6,5 \pm 0,5$

Teste Bacteriológico:

Quando incubado a 37°C por 48 horas pelo método de placa.

Contagem total microbiana: máximo de 1000CFU/g

Teste para *Escherichia coli*: negativo em 10g de amostra

Teste para espécies de *Salmonella*: negativo em 10g de amostra

Teste para *Staphylococcus aureus*: negativo em 10g de amostra

Teste para *Pseudomonas aeruginosa*: negativo em 10g de amostra

Contagem total de fungos: máximo de 100CFU/g

Aparência do pó: Pó creme e bege com partículas com tamanho que podem passar por malha 40 ASTM

Solubilidade: Quando suspenso em água fria, o pó incha, mas não dissolve. Entretanto, se dissolver rapidamente em água fervente e a solubilidade é facilitada se o pó for umedecido em água fria.

Armazenamento: Armazenar o pó abaixo de 30°C. Use antes de expirar o prazo de validade.

Validade: 05 anos.

Apresentação: Embalagem de 500 gramas.

ANEXO III

LINHAS DE COMANDO DO MATLAB DESENVOLVIDA POR MOTA, C. P (2010)

Retirado do original: MOTA, C. P., Sistema de Visão por Infravermelho Próximo para Monitoramento de Processos de Soldagem a Arco. 2011. 137 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

São apresentadas as linhas de comando do programa elaborado no ambiente Matlab® para executar a separação de todos os frames de um arquivo de vídeo no formato .AVI para arquivos de imagens do tipo .JPEG.

```
1 - clear all
2 - close all
3 - [arquivo,pasta]=uigetfile('*.avi','Escolha o vídeo...');
4 - filme = mmreader([pasta,arquivo]);
5 - nquadros = get(filme,'NumberOfFrames');
6 - quadros=read(filme);
7 - mkdir([pasta,arquivo(1:length(arquivo)-4)]);
8 - % Salva até 999 quadros;
9 - for i=1:nquadros
10-     mov(i).cdata = quadros(:,:,i);
11-     if(i<10)
12-         imwrite(mov(i).cdata,[pasta,arquivo(1:length(arqu
13-             quivo)-4),'\\','00',num2str(i),'.jpg']);
14-     else if(i<100)
15-         imwrite(mov(i).cdata,[pasta,arquivo(1:length(ar
16-             quivo)-4),'\\','0',num2str(i),'.jpg']);
17-     else if(i<1000)
18-         imwrite(mov(i).cdata,[pasta,arquivo(1:length
19-             (arquivo)-4),'\\',num2str(i),'.jpg']);
20-     end
21- end
22- end
23- end
24- fprintf('Conversão de AVI para JPG concluída!\n');
```