



Universidade Federal de Minas Gerais
Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica

Utilização de um sistema de controle por oscilação magnética para a deposição de metal em passe de raiz utilizando o processo GMAW.

Luciano Juliani

Agosto de 2014

Luciano Juliani

Utilização de um sistema de controle por oscilação magnética para a deposição de metal em passe de raiz utilizando o processo GMAW.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Alexandre Queiroz Bracarense, PhD.

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2014

Resumo

Durante anos, muito se tem feito no sentido de prever os problemas na soldagem com o intuito de torná-la um processo estável, capaz de efetuar uniões de peças com o mínimo de interferência humana. Como exemplos, existem os equipamentos denominados sinérgicos, os que oferecem controle da transferência metálica, entre outros. Este trabalho estuda um sistema de controle para a deflexão do arco elétrico de forma a favorecer a deposição de metal fundido em local pré-determinado. Para tanto, foi utilizada a oscilação magnética como ferramenta para promover o deslocamento do arco, tendo como objetivo superar algumas dificuldades na execução do passe de raiz. Como resultados, foi possível realizar simulações, soldagens exploratórias e controladas que demonstraram a atuação do sistema. A sua eficácia pode ser confirmada por meio de macrografias, cálculos computacionais e comprovações estatísticas por análise de hipótese.

Palavras chave: Oscilação magnética, passe de raiz, GMAW.

Abstract

For years, much has been done to anticipate the problems in welding with the intention of making it a stable process, able to perform weld of parts with minimal human interference. As examples, there are the so-called synergistic equipment, those who offer metal transfer control, among others. This work studies a control system for electric arc deflection in order to encourage the deposition of droplet metal in a predetermined location. To this end, magnetic oscillation was used as a tool to promote the arc offset aiming to overcome some difficulties in implementing the root pass. As a result, it was possible to perform simulations, exploratory and controlled, welding that demonstrated the performance of the system. Its effectiveness can be confirmed through macrographs, computations results and statistics proof by analysis of chance.

Key words: Magnetic oscillation, root pass, GMAW.

Aos meus pais, irmãos e amigos pela confiança.

A minha esposa pelo incentivo.

“Só sei que nada sei...”

Sócrates, Filósofo Grego

Agradecimentos

A Deus e a minha família.

Ao Professor Dr. Alexandre Queiroz Bracarense, pela oportunidade, dedicação, ensinamentos e paciência.

A Engra. Gislaine Pires Zannon pela oportunidade de me relacionar com o mundo da soldagem e inspeção e que me trouxe aos caminhos da UFMG.

Aos Professores das disciplinas do programa de pós-graduação.

Ao Professor Mestre Alberto de Figueiredo Gontijo – COLTEC

Ao Professor Dr. Eduardo Lima II

Aos bolsistas Higor Teodoro Moreira, Higor Ribeiro Oliveira

Aos colegas do LRSS: Cláudio, Ariel, Frank, Newton, Carlos Rennò, Aniceto, Siderley, Loan, Eustáquio, Pedro e João.

Sumário

1. Introdução.....	21
1.1. Motivação deste estudo	22
1.2. Objetivo	23
2. Revisão bibliográfica	24
2.1. Início da soldagem.....	24
2.2. Força atuante em campo magnético	25
2.3. Relação da energia elétrica e o campo magnético.....	26
2.4. Aplicação prática de um oscilador magnético	26
2.5. Forma do arco elétrico para alguns processos de soldagem	32
2.6. Utilização de oscilação magnética no processo GTAW com alimentação automática de arame	33
2.7. Utilização de oscilação magnética no processo GTAW sem e com alimentação automática de arame	34
2.8. Utilização da oscilação magnética no processo FCAW.....	35
2.9. Utilização da oscilação magnética, tipo de onda quadrada, no processo GWAW.....	36
2.10. Utilização de campo magnético na soldagem RSW	37
2.11. Influência do formato da ponta do indutor eletromagnético na soldagem GTAW.....	38
2.12. Utilização da oscilação magnética em soldagem de chanfro profundo (<i>Narrow Gap</i>).....	39
2.13. Soldagem do passe de raiz em tubulação, utilizando robô dedicado.....	40
3. Metodologia	43
4. Equipamentos.....	45
4.1. Soldagem	45
4.2. Indutor eletromagnético – núcleo e bobina.....	46
4.3. Inversor de polaridade para o gerador de campo magnético.	48

4.4. Sistema controlador da oscilação magnética	50
4.5. Equipamentos.....	52
4.6. Dispositivo de soldagem GTAW para teste preliminar de funcionamento do oscilador magnético.	53
4.7. Dispositivo de fixação do conjunto oscilador magnético para processo GMAW.	54
5. Materiais utilizados	55
5.1. Combinação, montagem e travamento das peças para serem formados os corpos de prova	58
5.2. Identificação dos corpos de prova.....	60
6. Resultados e Discussão	62
6.1. Resultados exploratórios.....	62
6.1.1. Verificação da orientação e medição da distância significativa de alcance do campo magnético.....	62
6.1.2. Região de atuação do campo magnético	64
6.1.3. Tipos de ondas geradas pelo sistema oscilador magnético.....	66
6.1.4. Simulação da atuação do oscilador magnético defletindo o arco elétrico para execução do passe de raiz	68
6.1.5. Atuação do sistema controlador da oscilação magnética em condições comparativas entre os processos GTAW e GMAW	71
6.1.6. Atuação do sistema de oscilação magnética em soldagem sobre chapa utilizando-se o processo GMAW.....	74
6.1.7. Soldagem exploratória na posição plana, em chanfro, sem a atuação do controle da deflexão do arco elétrico por oscilação magnética. Corpos de prova “sem defeito”	77
6.1.8. Soldagem exploratória na posição plana, em chanfro, com a utilização de oscilação magnética em corpos de prova “sem defeito”	81
6.2. Experimentos quantitativos em corpos de prova “com defeito”	82
6.2.1. Resultado das soldagens, sem e com oscilação magnética	85

6.2.2.	Macrografias das soldas, sem e com a atuação do sistema controlador da deflexão do arco elétrico por oscilação magnética.....	90
6.2.3.	Medição e comparação dos cordões de solda executados, sem e com o controle do movimento do arco elétrico por oscilação magnética. Determinação do centro de massa dos cordões em relação a uma referência cartesiana X e Y.....	96
6.3.	Gráfico das comparações entre cordões de solda executados, sem e com o controle do movimento do arco elétrico por oscilação magnética.....	99
6.4.	Considerações finais.....	103
6.5.	Comprovação, por análise estatística de teste de hipótese, da eficiência do sistema de controle da movimentação do arco elétrico por oscilação magnética para soldagem de passe de raiz.	104
7.	Conclusões	107
8.	Sugestões para trabalhos futuros	109
9.	Bibliografia	110
10.	Anexos	115
10.1.	Especificação das dimensões dos corpos de prova	115
10.2.	Controle das dimensões e montagem dos corpos de prova	115
10.3.	Planilhas contendo os valores dos resultados computacionais de centro de massa	119
10.4.	Traçagem e resultado dos cálculos do centro de massa para alguns cordões de solda.....	122
10.5.	Gráficos comparativos entre as soldagens.....	126
10.6.	Planilhas de cálculos das confiabilidades por análise estatística.....	128

Lista de Figuras

Figura 1.1: Posicionamentos inadequados para a execução do passe de raiz.	22
Figura 2.1: Atuação do campo magnético " B " sobre uma carga " q " resultando em uma força " F "; (a) influencia do ângulo " θ "; (b) trajetória da partícula eletrizada [13].	25
Figura 2.2: Representação do campo magnético ao redor de um condutor [14].	26
Figura 2.3: Esquema elétrico do defletor de arco proposto por Greene [15].	27
Figura 2.4: Modelo do defletor de arco elétrico proposto por Greene [15].	28
Figura 2.5: Fundamentos de uma bobina [16].	29
Figura 2.6: Campo magnético produzido por um solenóide num ponto central " P " [17].	30
Figura 2.7: Exemplo de uma bobina com núcleo ferrítico [19]	31
Figura 2.8: Arcos elétricos: (a) GTAW, (b) GMAW, (c) SMAW, (d) GMAW-MAG (CO_2), (e) GMAW-MIG eventual deposição em forma espiral [21].	32
Figura 2.9: Sistema proposto por Marques [22]. (a) posicionamento da bobina; (b) alimentador de arame.	33
Figura 2.10: Corpos de prova conforme Marques [22]. (a) 27 passes; (b) 14 passes.	33
Figura 2.11: Soldagem GTAW autógena. (a) arco na posição central, (b) arco à esquerda, (c) arco à direita.	34
Figura 2.12: Soldagem GTAW (alimentação automática de arame). (a) arco na posição central, (b) arco à esquerda, (c) arco à direita.	34
Figura 2.13: Montagem proposta por Andrade [25]. (a) distância do núcleo até o arame-eletrodo; (b) fixação da bobina na tocha.	35
Figura 2.14: Cordões de solda [25]. Frequências utilizadas de 2Hz, 5Hz e 20Hz.	35
Figura 2.15: Cordões de solda [26]. (a) 20Hz; (b) 10Hz; (c) 5Hz.	36
Figura 2.16: Ação do campo magnético na soldagem RSW. (a) até (c) campo magnético sobre as chapas, (d) até (f) campo magnético em ambos os lados.	37
Figura 2.17: Solda, com e sem atuação do campo magnético. (a) tradicional, (b) campo magnético sobre a chapa superior, (c) campo em ambos os lados.	37
Figura 2.18: Características do arco.	38

Figura 2.19: Efeitos da Oscilação magnética em chanfro profundo. (a) tocha de soldagem, (b) movimentação do arco, (c) sobreposição de cordões.	39
Figura 2.20: Soldagem utilizando equipamento robotizado.	40
Figura 2.21: Sistema robótico controlado à distância.	41
Figura 2.22: Sistema Orbital para soldagem de tubulação.	42
Figura 4.1: Conjunto do robô antropomórfico.	45
Figura 4.2: Projeto do núcleo em forma de “U”. (a) ponteira, (b) Corpo do núcleo, (c) montagem, (d) lâminas.	46
Figura 4.3: Conjuntos montados. (a) núcleo em forma de “U”- vista lateral, (b) vista superior, (c) núcleo reduzido - vista lateral, (d) vista frontal, (e) vista lateral oposta.	47
Figura 4.4: Esquema elétrico do dispositivo para a alimentação da bobina defletora do arco elétrico.	48
Figura 4.5: Montagem do inversor de polaridade.	49
Figura 4.6: Equipamentos para controlar a deflexão do arco elétrico.	50
Figura 4.7: Diagrama esquemático de montagem do sistema oscilador magnético.	51
Figura 4.8: Medidor de campo magnético – Teslâmetro	52
Figura 4.9: Registros das soldagens. (a) vista frontal, (b) vista lateral.	52
Figura 4.10: Montagem de um conjunto GTAW para obter arco elétrico estável.	53
Figura 4.11: Montagem oscilador magnético. (a) braço fixador; (b) articulações; (c) núcleo da bobina; (d) painel anti-respingo.	54
Figura 5.1: Peça “sem defeito”.	55
Figura 5.2: Preparação das peças “sem defeito”.	56
Figura 5.3: Peça “com defeito”.	57
Figura 5.4: Preparação das peças “com defeito”.	57
Figura 5.5: Montagem dos corpos de prova, “sem e com defeito”.	58
Figura 5.6: Posicionamento das travas nos corpos de prova.	59
Figura 5.7: Fixação das travas nos corpos de prova.	59
Figura 5.8: Identificação dos corpos de prova. (a) CP B2xB1, (b) CP N1xN2.	60
Figura 6.1: Atuação do oscilador magnético.	63
Figura 6.2: Linhas de fluxo geradas pela bobina. (a) Vista lateral, (b) Vista superior.	64
Figura 6.3: Visualização das linhas de fluxo. (a) Vista lateral, (b) Vista superior.	65
Figura 6.4: Linhas de fluxo magnético. Vista frontal.	65

Figura 6.5: Característica das ondas. (a) senoidais, (b) triangulares, (c) quadradas.....	66
Figura 6.6: Tipos de ondas utilizadas para a oscilação do arco elétrico.	67
Figura 6.7: Montagem que permite a articulação do arco abaixo do bico de contato.....	68
Figura 6.8: Oscilação do arco elétrico. (a) posição central, (b) articulação à direita, (c) retorno à posição central, (d) articulação à esquerda.	69
Figura 6.9: Exemplo de mau posicionamento de peças. (a) arco elétrico sobre massa metálica, (b) deslocamento do metal de solda, (c) concentração de energia em ambas as peças, (d) arco elétrico acima da raiz.	70
Figura 6.10: Fotos da deflexão do arco GTAW. (a) posição central, (b) e (c) defletidos.	72
Figura 6.11: Medição do campo magnético. (a) visão geral dos equipamentos, (b) valor da medição, 2,0mT, (c) ampliação.....	72
Figura 6.12: Posicionamento, alinhamento e distância eficaz da bobina. (a) do núcleo ao centro da tocha, (b) alinhamento, (c) centralização. Processo GMAW.....	73
Figura 6.13: Fotos obtidas a partir da filmagem da atuação do oscilador magnético. Intervalo de 3 segundos.....	75
Figura 6.14: Características de três cordões de solda realizados sobre chapa.	76
Figura 6.15: Soldagem sobre chapa. (a) vista frontal, (b) cordão sob frequência alta, (c) sem oscilação, (d) cordão sob frequência baixa.....	77
Figura 6.16: Referência para medição do bico de contato até a peça.	79
Figura 6.17: Fotos sem a atuação da oscilação magnética. De (a) até (r) intervalo de tempo: aproximadamente 6 segundos.	80
Figura 6.18: Atuação do oscilador magnético dentro do chanfro. (a) arco deslocado para a direita, (b) arco deslocado para a esquerda.	82
Figura 6.19: Alinhamento do arame eletrodo referente ao chanfro.	84
Figura 6.20: Soldagem na região “sem defeito” e não utilizando a oscilação magnética. (a) vista inferior, (b) e (c) vista superior.....	85
Figura 6.21: Corpo de prova “sem defeito”, soldagem não utilizando a oscilação magnética. (a) preparação; (b) cordão de solda; (c) vista inferior, cordão de solda no passe de raiz.....	86

Figura 6.22: Soldagem na região “com defeito” sem a utilização da oscilação magnética. (a) vista inferior da região “com defeito”, (b) e (c) vista superior.....	87
Figura 6.23: Soldagens que obtiveram sucesso nas regiões “sem e com defeito”.....	89
Figura 6.24: Mapa dos cortes nos corpos de prova. (a) B2xB1, (b) I1xI2, (c) P2xP1.....	90
Figura 6.25: Corpo de prova O1xO2, sem uso de oscilação, região “com defeito”, lado esquerdo.....	91
Figura 6.26: Corpo de prova O1xO2, sem uso de oscilação, região “sem defeito”.....	91
Figura 6.27: Corpo de prova D2xD1, com uso de oscilação, região “com defeito”, lado esquerdo.....	92
Figura 6.28: Corpo de prova D2xD1, com uso de oscilação, região “com defeito”, lado esquerdo.....	92
Figura 6.29: Corpo de prova I1xI2, corte a quatro milímetros após a linha 20, com uso de oscilação, forma de onda quadrada, 90% do período à esquerda, frequência 0,5Hz, região “com defeito”, lado esquerdo.....	93
Figura 6.30: Macrografia no corpo de prova I1xI2, corte na linha 20, com uso de oscilação, forma de onda quadrada, 90% do período à esquerda, frequência 0,5Hz, região “com defeito”, lado esquerdo.....	93
Figura 6.31: Corpo de prova P2xP1, com uso de oscilação, corte na linha 30, forma de onda quadrada, 90% do período à direita, frequência 0,5Hz, região “com defeito”, lado direito.....	94
Figura 6.32: Corpo de prova P2xP1, com uso de oscilação, corte na linha 38, forma de onda quadrada, 90% do período à direita, frequência 0,5Hz, região “com defeito”, lado direito.....	94
Figura 6.33: Comparações visuais entre cordões que utilizam ou não a oscilação.	95
Figura 6.34: Adequação das escalas entre macrografia e modelo computacional.....	96
Figura 6.35: Traçagem e resultado dos cálculos para o corpo de prova N1xN2. Corte na linha 38. Sem oscilação magnética. Região “sem defeito”.....	97
Figura 6.36: Gráfico comparativo entre as soldagens com oscilação, forma de onda senoidal, simétrica, frequência 1,5Hz e sem a oscilação. Defeito à esquerda.....	100
Figura 6.37: Gráfico comparativo entre as médias dos resultados das soldagens com diferentes condições de desvio magnético do arco elétrico.....	101
Figura 6.38: Sem oscilação, acúmulo de metal de solda à esquerda ou à direita.....	102

Figura 10.1: Corpo de prova N1xN2, corte na linha 20, sem uso da oscilação, região “com defeito”, lado direito.	122
Figura 10.2: Corpo de prova O1xO2, corte na linha 20, sem uso da oscilação, região “com defeito”, lado esquerdo.	122
Figura 10.3: Corpo de prova B2xB1, corte quatro milímetros após a linha 20, com uso de oscilação, forma de onda senoidal, simétrica, frequência 1,5Hz, região “sem defeito”.	123
Figura 10.4: Corpo de prova B2xB1, corte na linha 30, com uso da oscilação, forma de onda senoidal, simétrica, frequência 1,5Hz, região “com defeito”, lado esquerdo.	123
Figura 10.5: Corpo de prova BA2xBA1. Corte transversal na linha 30. Com oscilação magnética. Onda senoidal, simétrica, frequência 1,5Hz. região “com defeito”, lado direito.	124
Figura 10.6: Corpo de prova P2xP1, corte na linha 30, com uso da oscilação, forma de onda quadrada, 90% do período deslocada para a direita, frequência 0,5Hz, região “com defeito”, lado direito.	124
Figura 10.7: Corpo de prova I 1x I 2, corte na linha 12, com uso da oscilação, forma de onda quadrada, 90% do período deslocada para a direita, frequência 0,5Hz, região “com defeito”, lado esquerdo.	125
Figura 10.8: Soldagem utilizando-se oscilação magnética, forma de onda senoidal, simétrica, frequência 1,5Hz e sem oscilação. Defeito à direita.	126
Figura 10.9: Soldagem utilizando-se oscilação magnética, forma de onda quadrada, deslocada para a esquerda, frequência 0,5Hz e sem oscilação. Defeito à esquerda.	126
Figura 10.10: Soldagem utilizando-se oscilação magnética, forma de onda quadrada, deslocada para a direita, frequência 0,5Hz e sem a oscilação. Defeito à direita.	127

Lista de Tabelas

Tabela 1: Soldagens exploratórias. Ajustagem dos parâmetros.	78
Tabela 2: Resultados quantitativos conforme a atuação ou não da oscilação	83
Tabela 3: Parâmetros de soldagem e oscilação para as soldagens controladas	88
Tabela 4: Resumo dos resultados computacionais para os centros de massa.	98
Tabela 5: Comparações em função de uma média desconhecida.....	105
Tabela 6: Comparações em função de duas médias desconhecidas, diferentes e dados não-emparelhados, para X_1 e X_2	105
Tabela 7: Comparações em função de duas médias desconhecidas, diferentes e dados não-emparelhados para Y_1 e Y_2	106
Tabela 8: Dimensões para a usinagem dos corpos de prova	115
Tabela 9: Dimensões do corpo de prova B2 x B1. (a) peça B1, (b) peça B2, (c) conjunto montado B2 x B1.	115
Tabela 10: Dimensões do corpo de prova BA2 x BA1. (a) peça BA1, (b) peça BA2, (c) conjunto montado BA2 x BA1.	116
Tabela 11: Dimensões do corpo de prova D2 x D1. (a) peça D1, (b) peça D2, (c) conjunto montado D2 x D1.	116
Tabela 12: Dimensões do corpo de prova N1 x N2. (a) peça N1, (b) peça N2, (c) conjunto montado N1 x N2.	117
Tabela 13: Dimensões do corpo de prova O1 x O2. (a) peça O1, (b) peça O2, (c) conjunto montado O1 x O2.....	117
Tabela 14: Dimensões do corpo de prova I 1 x I 2. (a) peça I 1, (b) peça I 2, (c) conjunto montado I 1 x I 2.	118
Tabela 15: Dimensões do corpo de prova P2 x P1. (a) peça P1, (b) peça P2, (c) conjunto montado P2 x P1.	118
Tabela 16: Valores dos resultados computacionais do gráfico da Figura 6.36.....	119
Tabela 17: Valores dos resultados computacionais do gráfico da Figura 10.8.....	119
Tabela 18: Valores dos resultados computacionais do gráfico da Figura 10.9.....	120
Tabela 19: Valores dos resultados computacionais do gráfico da Figura 10.10.....	120
Tabela 20: Valores dos resultados computacionais do gráfico da Figura 6.37.....	121
Tabela 21: Comparação entre a média do resultado da soldagem X e o valor referência, $\mu_0=20\text{mm}$. Oscilação magnética, simétrica, forma de onda senoidal e frequência de 1,5Hz com defeito à esquerda.	128

Tabela 22: Comparação entre a média do resultado da soldagem X e o valor referência, $\mu_0=20\text{mm}$. Sem oscilação magnética, com defeito à esquerda do sentido da soldagem.....	129
Tabela 23: Comparação entre a média dos resultados da soldagem X_1 e X_2 . Oscilação magnética, simétrica, forma de onda senoidal e frequência de 1,5Hz x sem oscilação com defeito à esquerda do sentido da soldagem.....	130
Tabela 24: Comparação entre a média do resultado da soldagem X e o valor referência, $\mu_0=20\text{mm}$. Oscilação magnética, simétrica, forma de onda senoidal e frequência de 1,5Hz com defeito à direita do sentido da soldagem.....	131
Tabela 25: Comparação entre a média do resultado da soldagem X e o valor referência, $\mu_0=20\text{mm}$. Sem oscilação magnética, com defeito à direita do sentido da soldagem.	132
Tabela 26: Comparação entre a média dos resultados da soldagem X_1 e X_2 . Oscilação magnética, simétrica, forma de onda senoidal e frequência de 1,5Hz x sem oscilação com defeito à direita do sentido da soldagem.....	133
Tabela 27: Comparação entre a média do resultado da soldagem X e o valor referência, $\mu_0=20\text{mm}$. Oscilação magnética com forma de onda quadrada, deslocada para a esquerda, frequência 0,5Hz com defeito à esquerda do sentido da soldagem.....	134
Tabela 28: Comparação entre a média do resultado da soldagem X e o valor referência, $\mu_0=20\text{mm}$. Oscilação magnética com forma de onda quadrada, deslocada para a direita, frequência 0,5Hz com defeito à direita do sentido da soldagem.....	135
Tabela 29: Comparação entre a média dos resultados da soldagem X_1 e X_2 . Oscilação magnética com forma de onda quadrada, deslocada para a esquerda, frequência 0,5Hz x sem oscilação com defeito à direita do sentido da soldagem.	136
Tabela 30: Comparação entre a média dos resultados da soldagem X_1 e X_2 . Oscilação magnética com forma de onda quadrada, deslocada para a direita, frequência 0,5Hz x sem oscilação com defeito à direita do sentido da soldagem.	137

Tabela 31: Comparação entre a média dos resultados da soldagem Y_1 e Y_2 . Oscilação magnética com forma de onda quadrada, deslocada para a direita, frequência 0,5Hz x sem oscilação com defeito à direita do sentido da soldagem.	138
---	-----

Lista de Símbolos e Abreviaturas

GMAW	.....	Processo de soldagem – Gas Metal Arc Welding
MAG	.....	Metal Active Gas
MIG	.....	Metal Inert Gas
GTAW	.....	Gas Tungsten Arc Welding
RSW	.....	Resistance Spot Welding
F	.....	Força resultante, que atua em uma partícula dentro do campo magnético
q	.....	Carga de uma partícula eletrizada (Coulomb); sendo, 1 Coulomb / seg = 1 ampere
v	.....	Velocidade da partícula (m/s)
B	.....	Densidade do campo magnético [Tesla ou Gauss]; sendo 1miliTesla = 10 Gauss
Sen θ	.....	Seno do ângulo
q₀	.....	Carga de uma partícula eletrizada, positiva
E	.....	Campo elétrico
μ	.....	Permeabilidade magnética do metal [Tesla · m / A]
N	.....	Número de espiras contidas no comprimento “L”
i	.....	Corrente elétrica
L	.....	Comprimento do solenóide [m]
R	.....	Raio da bobina
S	.....	Área do núcleo [cm ²]
Θ	.....	Fluxo magnético [Maxwell]; sendo 1 Maxwell = 1,0x10 ⁻⁸ T.m ²
X_n	.....	indivíduo da amostra
\bar{X}	.....	média aritmética da amostra
\bar{X}_1	.....	média aritmética da amostra 1
\bar{X}_2	.....	média aritmética da amostra 2

\bar{Y}	.....média aritmética da amostra
\bar{Y}_1	..... média aritmética da amostra 1
\bar{Y}_2	..... média aritmética da amostra 2
$S_{(x)}$	.....desvio padrão da amostra
$S^2_{(x)}$	.....variância média da amostra
$S^2_{(x1)}$	.....variância média da amostra 1
$S^2_{(x2)}$	.....variância média da amostra 2
$S^2_{(x1)}_{[n-1]}$	.....variância média da amostra 1; grau de liberdade subtraindo-se 1
$S^2_{(x2)}_{[n-1]}$	.....variância média da amostra 2; grau de liberdade subtraindo-se 1
$S_{(Y)}$	.....desvio padrão da amostra
$S^2_{(Y)}$	.....variância média da amostra
$S^2_{(Y1)}$	.....variância média da amostra 1
$S^2_{(Y2)}$	.....variância média da amostra 2
$S^2_{(Y1)}_{[n-1]}$	.....variância média da amostra 1; grau de liberdade subtraindo-se 1
$S^2_{(Y2)}_{[n-1]}$	.....variância média da amostra 2; grau de liberdade subtraindo-se 1
n	.....grau de liberdade (número de indivíduos da amostra)
n_1	.....grau de liberdade (número de indivíduos da amostra 1)
n_2	.....grau de liberdade (número de indivíduos da amostra 2)
t_y	.....valor a ser testado por hipótese, segundo Aspin-Welch
Y_t	.....Aproximação "t" de Student, para valores de Aspin-Welch
W_1	.....variância da amostra 1 segundo Aspin-Welch; teste de hipótese
W_2	.....variância da amostra 2 segundo Aspin-Welch; teste de hipótese

$t_{[n-1]}$	....."t" de Student para grau de liberdade, subtraindo-se 1
$t_{[n-1]; \frac{\alpha}{2}}$	....."t" de Student para grau de liberdade, subtraindo-se 1, referente ao erro assumido em cada extremidade da curva gaussiana
$t_{[n-1]; 0,5\%}$	....."t" de Student para grau de liberdade, subtraindo-se 1, referente ao erro assumido de 0,5% em cada extremidade da curva gaussiana
$t_{[n-1]; 1\%}$	....."t" de Student para grau de liberdade, subtraindo-se 1, referente ao erro assumido de 1% em cada extremidade da curva gaussiana
$t_{[n-1]; 2,5\%}$	....."t" de Student para grau de liberdade, subtraindo-se 1, referente ao erro assumido de 2,5% em cada extremidade da curva gaussiana
$Y_t; \frac{\alpha}{2}$	.....Aproximação "t" de Student, referente ao erro assumido em cada extremidade da curva gaussiana; valores de Aspin-Welch
$Y_t; 0,5\%$	....Aproximação "t" de Student, referente ao erro assumido de 0,5% em cada extremidade da curva gaussiana, para valores de Aspin-Welch
$Y_t; 2,5\%$	....Aproximação "t" de Student, referente ao erro assumido de 2,5% em cada extremidade da curva gaussiana, para valores de Aspin-Welch
μ_0	.....valor referência da média amostral populacional; teste de hipótese
μ	$\mu = \bar{X}$ ou \bar{Y}.....para o teste de hipótese
μ_1	$\mu_1 = \bar{X}_1$ ou \bar{Y}_1.....para o teste de hipótese
μ_2	$\mu_2 = \bar{X}_2$ ou \bar{Y}_2.....para o teste de hipótese
H_0	$\mu_1 = \mu_2$.....rejeitar a condição, para o teste de hipótese
H_1	$\mu_1 \neq \mu_2$.....aceitar a condição, para o teste de hipótese

1. Introdução

Desde a patente de Benardos e Olszewski [1] demonstrando a fusão de metais utilizando-se arco elétrico, a indústria vem estudando e criando sistemas capazes de controlar e produzir uniões de peças para atender as mais variadas necessidades, também em diversas situações.

O processo de soldagem GMAW, também conhecido como MIG/MAG, é um dos mais utilizados, pois, além das altas taxas de deposição de metal, oferece versatilidade e eficiência ímpar na execução de cordões de solda. Da mesma forma que outros, este processo necessita ser controlado, pois, durante a fusão e transferência metálica, muitas variáveis atuantes no processo influenciam na qualidade da junta. Dessas variáveis, tem-se: a intensidade de corrente e tensão elétrica, velocidade de execução da soldagem, distância entre o bico de contato e a peça, posicionamento relativo, angulação, eletrodo (ou tocha de soldagem) à frente ou atrás da poça de fusão, composição química dos materiais envolvidos, gases de proteção, tipo de junta (topo, sobrepostas, em ângulo, faceada, de canto), preparação de chanfros (“X”, “J”, “V”, “1/2 V”, etc), entre várias outras [2].

Dando continuidade à busca pela excelência do processo [3-7], foi possível notar que alguns equipamentos disponíveis no mercado oferecem inúmeros recursos com o intuito de melhorar a qualidade da soldagem. Máquinas sinérgicas, controle de curto-circuito e também da taxa de deposição de metal fundido são alguns exemplos. Mesmo com todos esses recursos, em muitas situações é o soldador quem define uma boa ou má união soldada.

Inúmeros estudos demonstram que a gota do metal fundido tende a acompanhar o arco elétrico, desta forma, existe a possibilidade de posicioná-lo em local mais adequado conforme cada necessidade.

Osciladores mecânicos que deslocam o eletrodo (ou a tocha de soldagem) alternadamente segundo uma trajetória linear de um lado para outro, muitas vezes não são eficazes para superar as dificuldades presentes na soldagem, incluindo-se o passe de raiz [3,4].

Acredita-se então que a atuação adequada de um campo magnético no arco elétrico, movimentando-o conforme um padrão característico seja capaz de produzir uniões soldadas de excelente qualidade, se combinada com parâmetros adequados de soldagem.

1.1. Motivação deste estudo

O passe de raiz [8,9] é uma das etapas mais difíceis na soldagem por arco elétrico, como mostraram trabalhos executados em campo na união de tubulações.

A perfeita acomodação entre as partes é difícil e quando possível, oferece custo elevado para se obter sucesso. Esta é seriamente afetada principalmente pela dificuldade de preparo, ajuste e alinhamento das faces a serem soldadas. A Figura 1.1 representa algumas formas de posicionamento inadequado, tais como: (a) desalinhamento na vertical, (b) desalinhamento angulado e (c) variação na dimensão da altura do nariz.

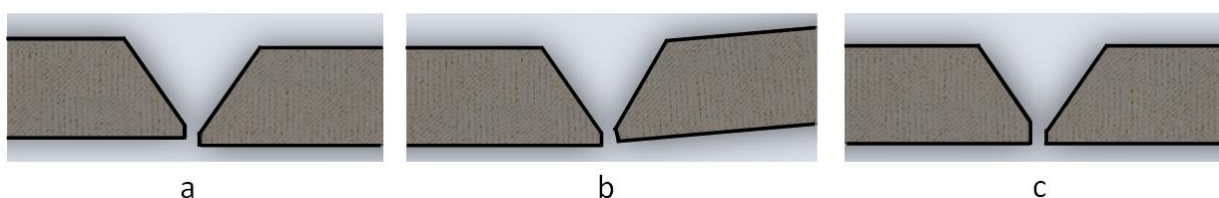


Figura 1.1: Posicionamentos inadequados para a execução do passe de raiz.

Durante anos, muito se têm feito no sentido de prever as dificuldades presentes na soldagem. Tentar fazer deste um processo estável e capaz de efetuar uniões de peças com o mínimo de interferência humana é um desafio constante.

1.2. Objetivo

Utilizando os fundamentos de Oersted [10] para melhor entender o comportamento das propriedades magnéticas, pretende-se realizar o experimento de defletir um fio condutor quando percorrido por uma determinada corrente elétrica. O fio em questão é uma analogia ao arco elétrico e trata-se de uma primeira comprovação do funcionamento do sistema de oscilação magnética que foi desenvolvido.

Ainda como uma etapa de aprendizado e sabendo-se que o arco elétrico também possui um fluxo de cargas elétricas, pretende-se repetir experimentos realizados por outros autores e demonstrar a deflexão do arco por oscilação magnética.

Pretende-se demonstrar neste estudo que o sistema de controle do arco elétrico por oscilação magnética que foi desenvolvido é capaz de produzir efeitos favoráveis para a soldagem do passe de raiz e, desta forma, contribuir com mais alguns recursos a fim de alcançar resultados adequados obtendo-se boa qualidade na união de peças soldadas pelo processo GMAW.

Foram objetivos específicos desse trabalho:

- Comparação visual entre os passes de raiz produzidos sem e com a utilização do controle do arco elétrico por oscilação magnética nos corpos de prova simulando defeitos (variação da distância entre as faces e altura do nariz).

- Demonstração dos resultados positivos oferecidos pelo sistema de controle da deflexão do arco que foi desenvolvido por meio das macrografias, cálculos computacionais de centro de massa e cálculos estatísticos.

2. Revisão bibliográfica

Ao serem realizadas pesquisas sobre a utilização de fenômenos magnéticos em processos de soldagem, foi possível encontrar uma vasta quantidade de informações de inúmeras naturezas e para diversas aplicações. Este estudo reúne alguns importantes trabalhos e concentrou esforços no desenvolvimento de um sistema de controle da movimentação do arco elétrico para o passe de raiz no processo GMAW.

2.1. Início da soldagem

Registros apontam para Benardos e Olszewski [1] como sendo os primeiros a promover fusão e união de metais utilizando-se arco voltaico. Baseado nos fundamentos da eletricidade foi possível entender que, no arco elétrico produzido entre a ponta de um eletrodo e a peça, há fluxo de elétrons. Na região do arco elétrico, onde um gás de proteção ioniza-se, o fluxo de cargas elétricas se estabelece. O gás ionizado é chamado de plasma e possui alta concentração de energia em forma de calor (maior do que 10^3 °C) [11]. Mantendo-se uma diferença de potencial entre o eletrodo e a peça, somada à região gasosa ionizada, tem-se o arco elétrico para alguns dos processos de soldagem. Desde então, a soldagem vem evoluindo através da criação de novos processos e aplicação de melhorias constantes aos já existentes.

2.2. Força atuante em campo magnético

Em 1820, Orsted [10] observou que uma corrente elétrica passando por um condutor era capaz de produzir campo magnético ao redor deste. Mais tarde, Lorentz [12], propôs a expressão matemática que determina a força resultante que atua em uma partícula dentro de um campo magnético. Equação 2.1

$$\mathbf{F} = q * \mathbf{v} * \mathbf{B} \quad \text{Equação 2.1}$$

No modelo proposto, Figura 2.1, considera-se a carga “q”, os vetores velocidade “v” e campo magnético “B”. Este, diz que se a carga passar por uma região do espaço onde exista campo magnético, ela sofrerá a ação de uma força “F” perpendicular à velocidade de deslocamento. Se o vetor do campo magnético formar com o vetor velocidade um ângulo “θ”, a Equação 2.1 passa a ser:

$$\mathbf{F} = q * \mathbf{v} * \mathbf{B} * \text{Sen } \theta \quad \text{Equação 2.2}$$

Da Equação 2.2 pode-se concluir que:

- A força “F” será nula quando “v” = 0 ou “θ”= 0 ou “θ”= 180°;
- “F” será máximo quando “θ”= 90°.

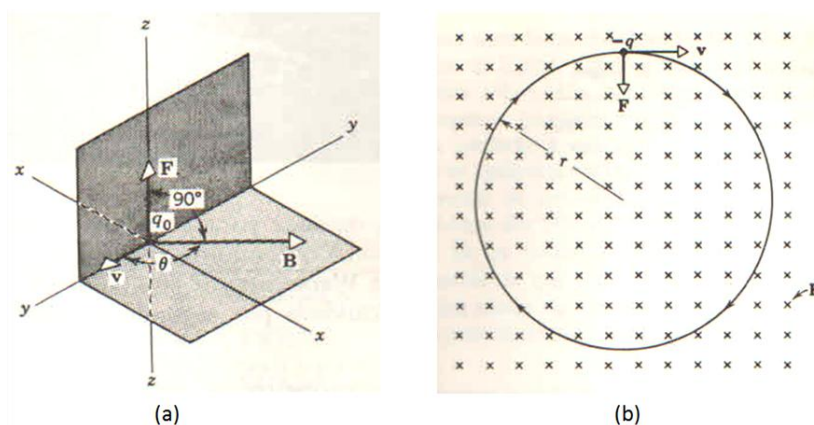


Figura 2.1: Atuação do campo magnético “B” sobre uma carga “q” resultando em uma força “F”; (a) influencia do ângulo “θ”; (b) trajetória da partícula eletrizada [13].

2.3. Relação da energia elétrica e o campo magnético

Aproveitando os fundamentos de Orsted [10], Lorentz [12] definiu a expressão matemática conhecida como equação de Lorentz ou equação da Força de Lorentz que relaciona os conceitos de campo elétrico e campo magnético como sendo:

$$\mathbf{F} = (q\mathbf{0} * \mathbf{E}) + (q\mathbf{0} * \mathbf{v} * \mathbf{B}) \quad \text{Equação 2.3}$$

Isto foi possível devido ao fato de ter sido notado que: (a) corrente elétrica é uma sucessão de cargas em movimento; (b) o campo magnético é capaz de atuar com forças laterais sobre cargas em movimento; (c) ao redor do condutor existe um campo magnético "B". A Figura 2.2 representa este efeito.

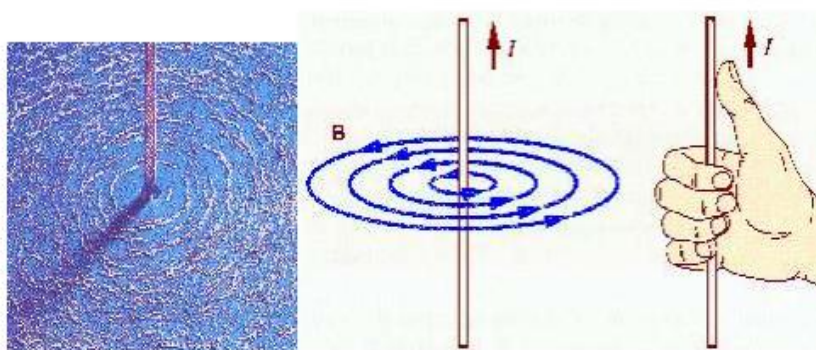


Figura 2.2: Representação do campo magnético ao redor de um condutor [14].

2.4. Aplicação prática de um oscilador magnético

Aproveitando a relação existente entre eletricidade e magnetismo, também observando a possibilidade de reposicionamento do arco elétrico (movimentos que, normalmente os soldadores executam durante a soldagem), Greene [15] publica a patente que utiliza bobinas para conseguir defletir um arco elétrico. As Figuras 2.3 e 2.4 apresentam alguns detalhes da patente.

Jan. 5, 1960

W. J. GREENE

2,920,183

MAGNETIC OSCILLATION OF WELDING ARC

Filed Feb. 12, 1957

2 Sheets-Sheet 2

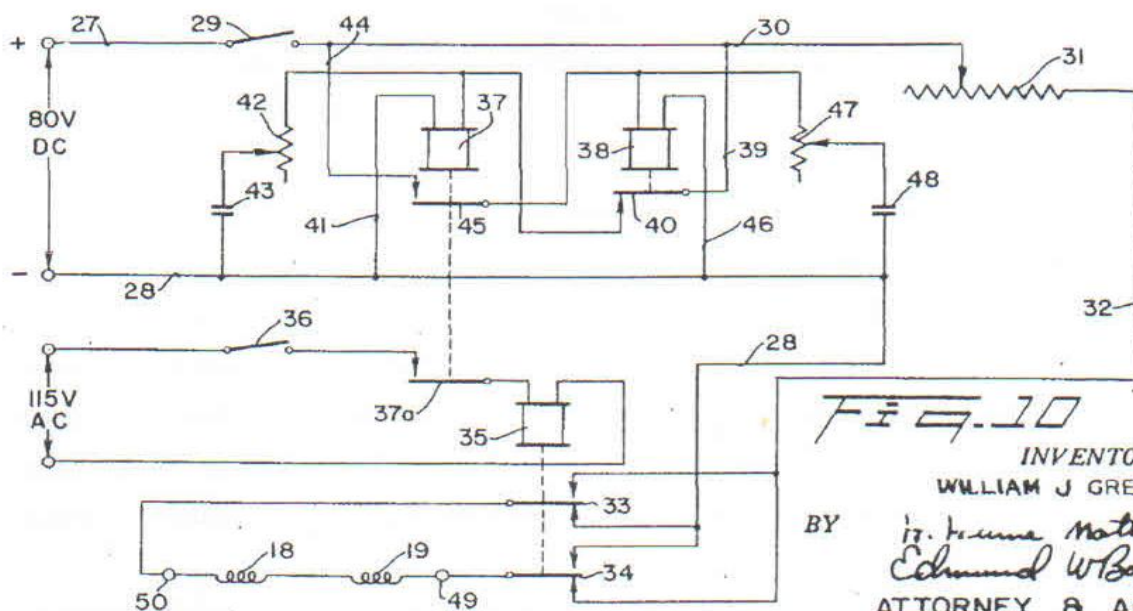
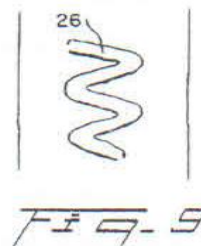
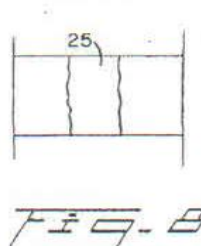
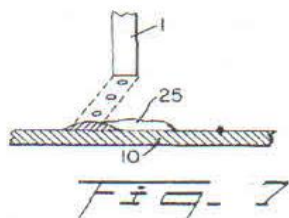
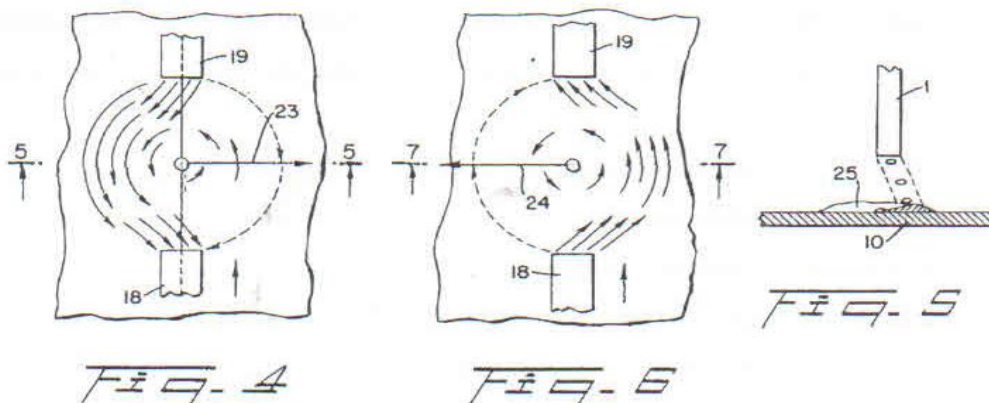


FIG. 10
 INVENTOR.
 WILLIAM J GREENE
 BY
 W. Hanna Mathews
 Edmund W Bopp
 ATTORNEY & AGENT

Figura 2.3: Esquema elétrico do defletor de arco proposto por Greene [15].

Jan. 5, 1960

W. J. GREENE

2,920,183

MAGNETIC OSCILLATION OF WELDING ARC

Filed Feb. 12, 1957

2 Sheets-Sheet 1

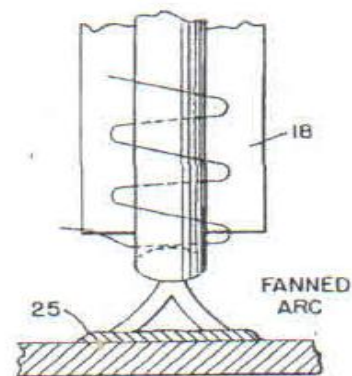
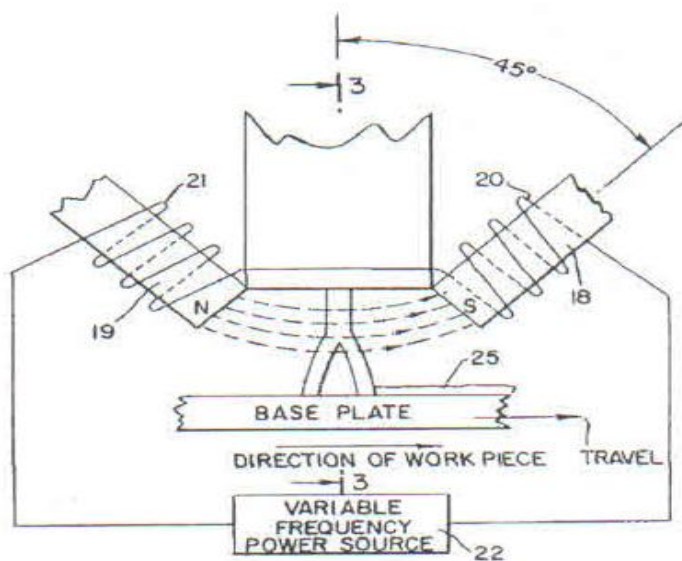
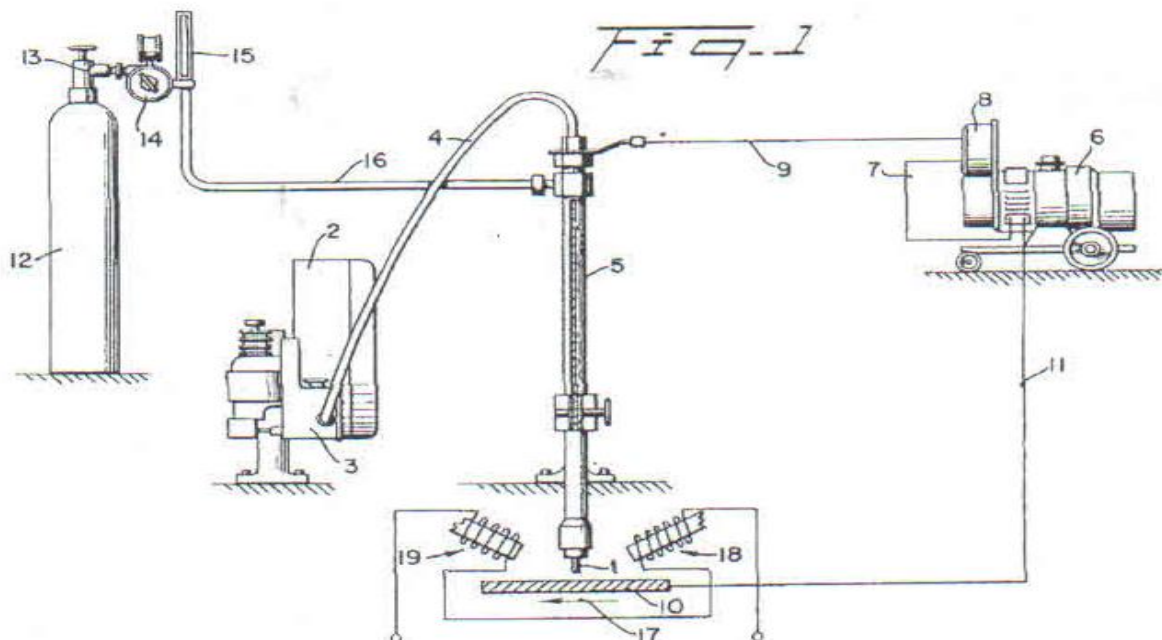


Fig. 2

Fig. 3

INVENTOR.
WILLIAM J. GREENE

BY *H. Hume Matthews*
Edmund W. Bopp
ATTORNEY & AGENT

Figura 2.4: Modelo do defletor de arco elétrico proposto por Greene [15].

Construtivamente, uma bobina baseia-se na Lei de Ampère, onde:

- o campo magnético ao redor de um fio condutor por onde passa uma corrente elétrica “ i ” é fraco, porém, um conjunto de fios, dispostos adequadamente em forma de espiras pode gerar um campo magnético mais forte, conforme demonstrado na Figura 2.5.

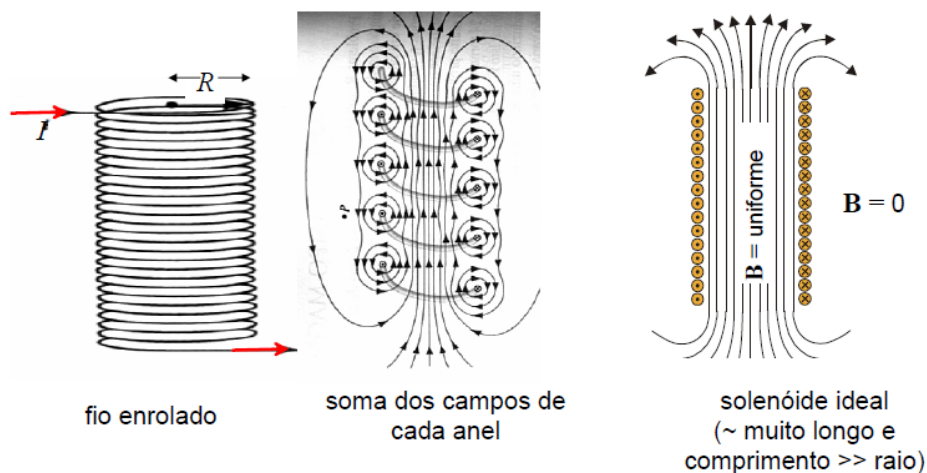


Figura 2.5: Fundamentos de uma bobina [16].

No interior do solenóide (bobina), a densidade do campo magnético é praticamente uniforme e sua intensidade pode ser calculada pela Equação 2.4 [17].

$$\mathbf{B} = \frac{(\mu * \mathbf{N} * \mathbf{i})}{2 * \mathbf{L}} \quad \text{Equação 2.4}$$

Nas extremidades, inicial e final do solenóide, tem-se o campo magnético reduzido pela metade, conforme demonstrado pela Equação 2.5 e Figura 2.6 [17].

$$\mathbf{B} = \frac{(\mu * \mathbf{N} * \mathbf{i})}{2 * \mathbf{L}} * (\mathbf{Sen} \varnothing_2 - \mathbf{Sen} \varnothing_1) \quad \text{Equação 2.5}$$

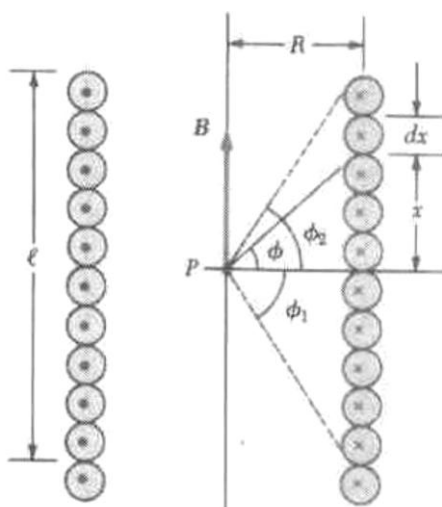


Figura 2.6: Campo magnético produzido por um solenóide num ponto central “P” [17].

Desta forma, a Equação 2.5 passa a ser a Equação 2.6 [18] para o início ou o fim do comprimento “L”:

$$\mathbf{B} = \frac{(\mu * \mathbf{N} * \mathbf{i})}{2 * \sqrt{(\mathbf{L}^2 + \mathbf{R}^2)}} \quad \text{Equação 2.6}$$

e na metade do comprimento “L” da bobina tem-se a Equação 2.7 [18].

$$\mathbf{B} = \frac{(\mu * \mathbf{N} * \mathbf{i})}{2 * \sqrt{(\mathbf{L}^2 + 4 * \mathbf{R}^2)}} \quad \text{Equação 2.7}$$

No interior de uma bobina que possui um núcleo ferrítico, Figura 2.7, tem-se as linhas de força do campo magnético bem definidas. O núcleo permite direcionar o campo magnético com eficiência para uma região distante do centro do enrolamento.

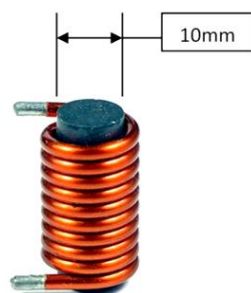


Figura 2.7: Exemplo de uma bobina com núcleo ferrítico [19]

As referências bibliográficas [31-33] explicam a variação de utilização de núcleos de bobinas confeccionados a partir de materiais maciços e conjunto de lâminas. Perdas térmicas, saturação de campo magnético no material, formação cristalina dos metais, alta permeabilidade magnética, resistividade elétrica relativamente elevada e indução residual relativamente baixa quando submetido a uma magnetização cíclica, remetem à utilização de um material denominado “aço silício ou aço elétrico”, como normalmente são conhecidos no mercado.

Este material ferromagnético possui propriedades que implicam, em baixa relutância, conseqüentemente em pequena absorção de corrente magnetizante e de potência relativa de magnetização, baixa perda por correntes parasitas (correntes de Foucault) e também baixa histerese. Maiores eficiências podem ser conseguidas utilizando-se aço-silício de grãos orientados que apresentam alta permeabilidade quando excitados no sentido da laminação e baixíssimas perdas magnéticas específicas (watts por unidade de massa).

Chama-se de circuito magnético a região onde se desenvolvem o conjunto das linhas de força do campo magnético ou, simplesmente, fluxo magnético. Este pode ser determinado pela Equação 2.8 [20].

$$\Theta = \mathbf{B} * \mathbf{S}$$

Equação 2.8

2.5. Forma do arco elétrico para alguns processos de soldagem

Como ponto de partida para uma boa eficiência do controle da deflexão do arco elétrico por oscilação magnética, estima-se que o campo produzido pela bobina deva atuar na região de soldagem, mais especificamente estar direcionado para o arco elétrico. Cada processo possui um formato de arco característico, então, baseado em Lancaster [21], a Figura 2.8 ilustra alguns formatos de arco elétrico.

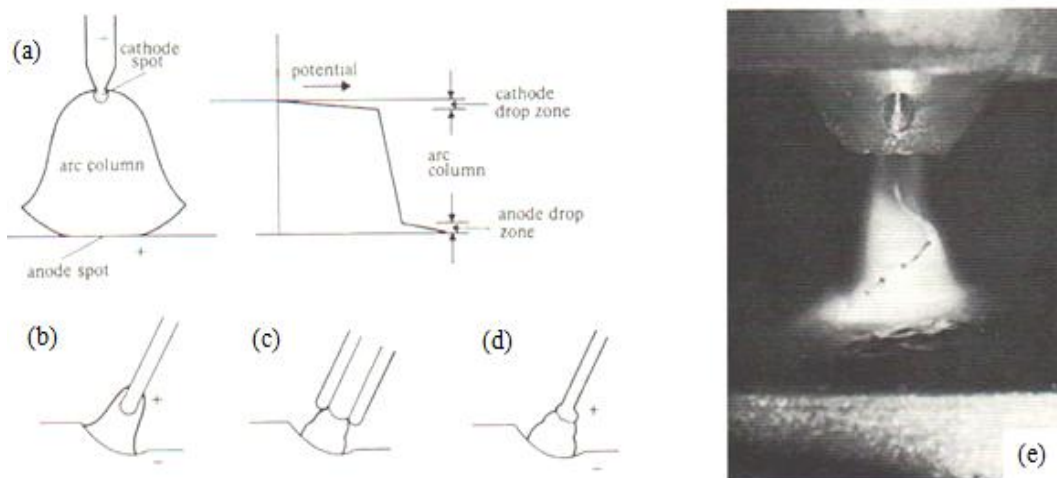


Figura 2.8: Arcos elétricos: (a) GTAW, (b) GMAW, (c) SMAW, (d) GMAW-MAG (CO₂), (e) GMAW-MIG eventual deposição em forma espiral [21].

Este estudo trata de um sistema de controle da movimentação do arco elétrico do processo GMAW, desta forma, no decorrer da dissertação poderá ser observado que o formato da Figura 2.8 (b) foi o adotado nas simulações.

2.6. Utilização de oscilação magnética no processo GTAW com alimentação automática de arame

Marques [22] conseguiu movimentar o arco elétrico no processo GTAW de forma similar ao modelo proposto por Greene [15].

Alguns dos principais resultados apresentados por Marques foi, reduzir de 27 (processo manual) para 14 (processo mecanizado) o número de passes de solda para o preenchimento de um chanfro; evitar a ocorrência de descontinuidades inerentes do processo de soldagem manual e melhorar o aspecto visual de cordões de solda entre os passes. A Figura 2.9 apresenta o equipamento utilizado e a Figura 2.10 apresenta o os passes sucessivos de solda.

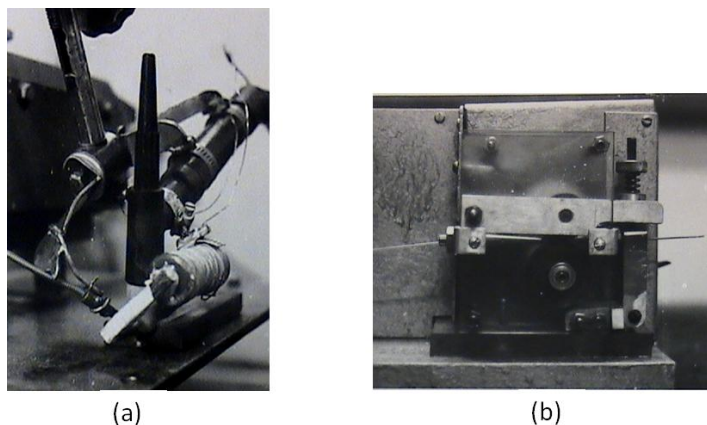


Figura 2.9: Sistema proposto por Marques [22]. (a) posicionamento da bobina; (b) alimentador de arame.

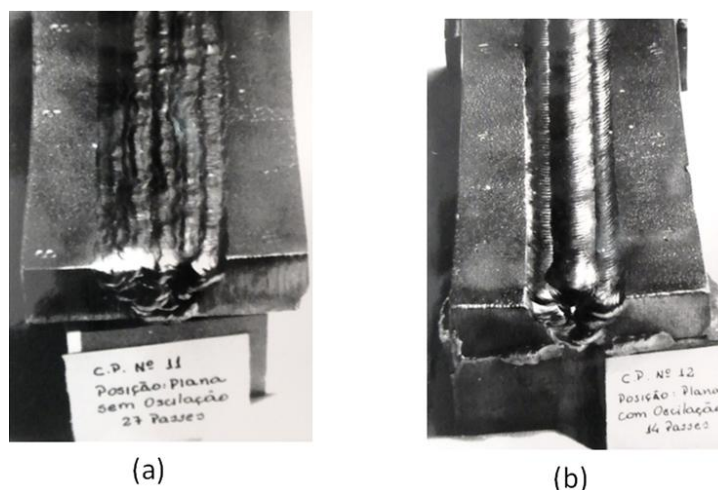


Figura 2.10: Corpos de prova conforme Marques [22]. (a) 27 passes; (b) 14 passes.

2.7. Utilização de oscilação magnética no processo GTAW sem e com alimentação automática de arame

A empresa AP Automation [23,24] comercializa um sistema de oscilação magnética capaz de movimentar o arco elétrico do processo GTAW tanto na soldagem autógena como com alimentação automática do arame (conhecido como TIG mecanizado). As figuras 2.11 e 2.12 apresentam a deflexão de arcos TIG obtidas com esse equipamento na soldagem com e sem o uso de metal de adição.

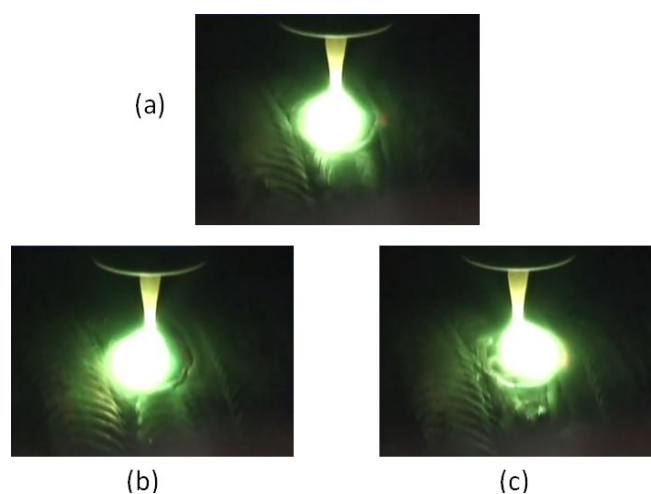


Figura 2.11: Soldagem GTAW autógena. (a) arco na posição central, (b) arco à esquerda, (c) arco à direita.

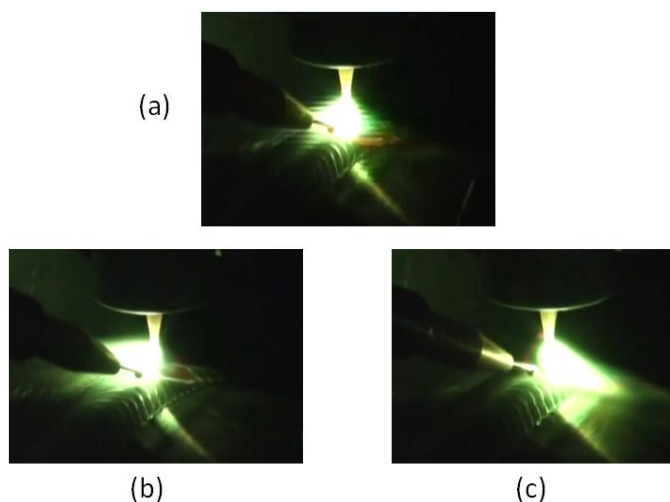


Figura 2.12: Soldagem GTAW (alimentação automática de arame). (a) arco na posição central, (b) arco à esquerda, (c) arco à direita.

2.8. Utilização da oscilação magnética no processo FCAW

Andrade [25], em seu trabalho, conseguiu movimentar o arco elétrico no processo FCAW. Ele utilizou forma de onda quadrada com frequências de 2Hz, 5Hz e 20Hz para execução do passe de raiz. Na dissertação de Andrade [25] foi possível visualizar as imagens da gota de metal fundido acompanhando o arco elétrico tanto na transferência metálica por curto-circuito como na globular. Este estudo sugere também que, em soldagem sobre chapa, quanto maior a frequência utilizada, tanto maior a penetração de metal de solda. A Figura 2.13 apresenta a bobina e o núcleo posicionados referente à tocha de soldagem. A Figura 2.14 apresenta o resultado dos cordões executados.

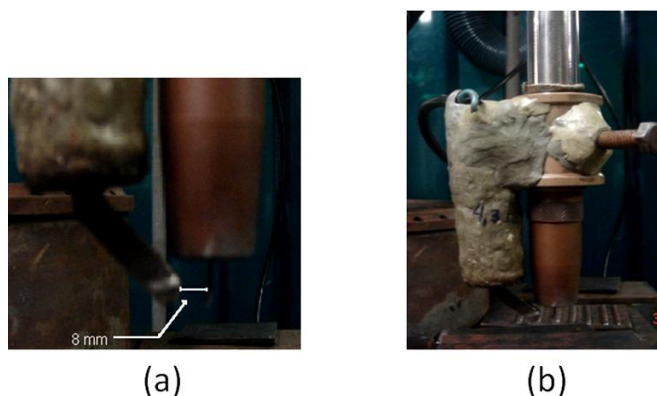


Figura 2.13: Montagem proposta por Andrade [25]. (a) distância do núcleo até o arame-eletrodo; (b) fixação da bobina na tocha.



Figura 2.14: Cordões de solda [25]. Frequências utilizadas de 2Hz, 5Hz e 20Hz.

2.9. Utilização da oscilação magnética, tipo de onda quadrada, no processo GMAW

Soares [26], similarmente a Andrade [25], movimentou o arco elétrico no processo GMAW utilizando forma de onda quadrada a frequências de 5Hz, 10Hz e 20Hz. No trabalho de Soares [26], também foi possível notar melhorias na penetração do metal de solda, entretanto, em ambos os estudos, não se conclui quem é o responsável por este efeito; se o campo magnético atuante ou a oscilação do arco em função da forma de onda gerada. Figura 2.15.

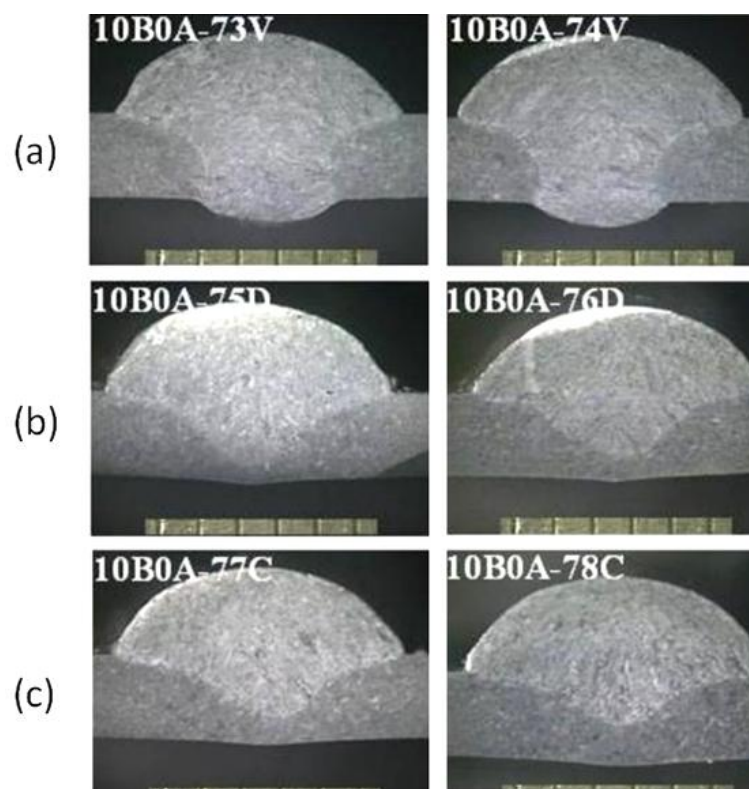


Figura 2.15: Cordões de solda [26]. (a) 20Hz; (b) 10Hz; (c) 5Hz.

2.10. Utilização de campo magnético na soldagem RSW

Li [27] relata sobre os resultados benéficos da utilização de campo magnético, simples ou duplo, para a obtenção de união de peças com o processo de soldagem RSW. Na Figura 2.16, pode-se notar os efeitos do campo magnético aplicado em um ou em ambos os lados das chapas.

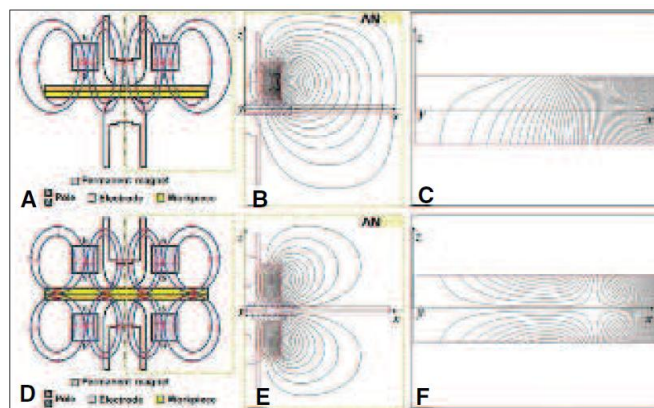


Figura 2.16: Ação do campo magnético na soldagem RSW. (a) até (c) campo magnético sobre as chapas, (d) até (f) campo magnético em ambos os lados.

Com a utilização deste recurso, foi possível melhorar as propriedades mecânicas da união, tais como: tensão de cisalhamento, ductilidade e fratura por tração. Como característica geométrica, nota-se que o ponto de solda apresenta aumento do diâmetro e uma leve depressão no centro comparando-se com um ponto de solda realizado pelo método convencional. Figura 2.17.

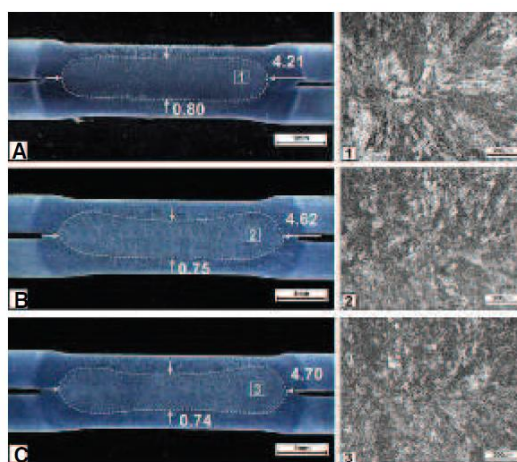


Figura 2.17: Solda, com e sem atuação do campo magnético. (a) tradicional, (b) campo magnético sobre a chapa superior, (c) campo em ambos os lados.

2.11. Influência do formato da ponta do indutor eletromagnético na soldagem GTAW

Guilherme [28] realizou estudos sobre o efeito da geometria das extremidades do núcleo do eletroímã sobre a deflexão do arco de soldagem. Figura 2.18.

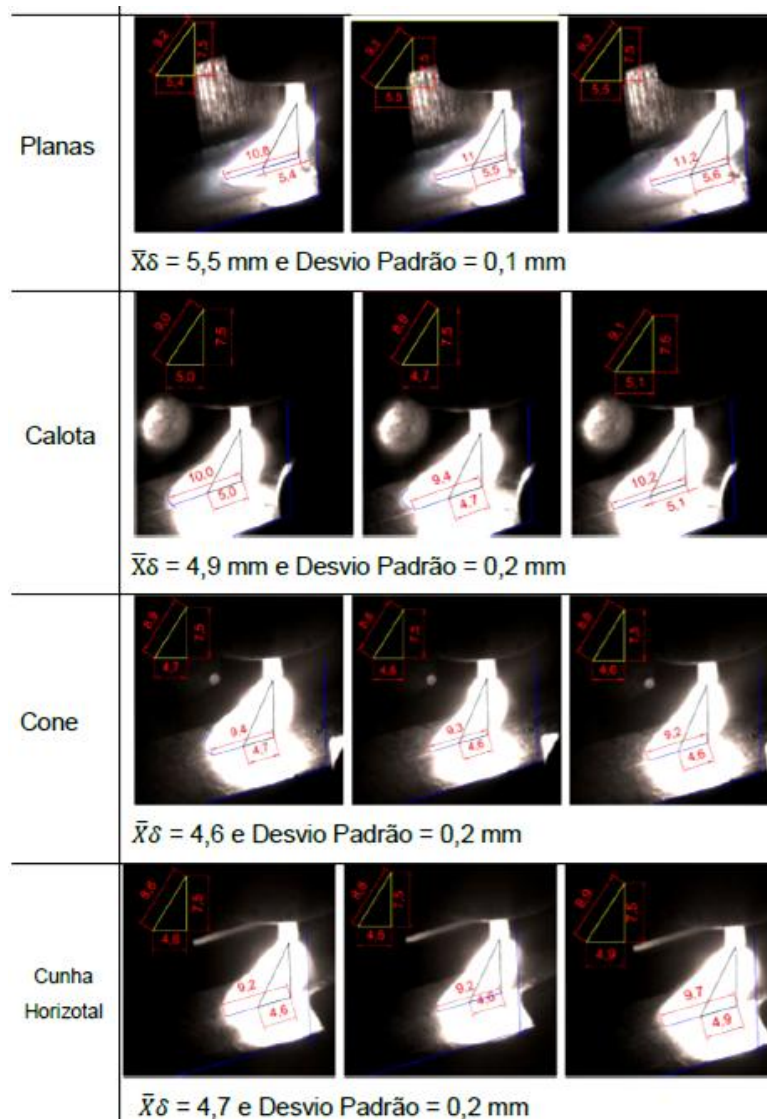


Figura 2.18: Características do arco.

Com este estudo foi possível comprovar alterações da forma e intensidade da deflexão de um arco de soldagem quando altera-se o formato da ponta do eletroímã.

Também, verificou-se que as pontas com maiores áreas direcionadas para a região do arco elétrico produziram maiores deflexões.

2.12. Utilização da oscilação magnética em soldagem de chanfro profundo (*Narrow Gap*)

KANG e NA [29] conseguiram excelentes resultados na deposição de solda dentro de chanfro profundo (*Narrow Gap*) utilizando a oscilação magnética do arco elétrico, inclusive com ótima sobreposição de cordões. Inicialmente utilizando-se simulação numérica para posteriormente serem realizados experimentos, os resultados demonstraram, principalmente, maior aproveitamento de tempo na execução da soldagem e mínimas distorções em paredes grossas. Para tanto foram utilizadas densidade de fluxo magnético com 25, 50, 75 Gauss o que remete à análise de que, para deflexões significativas, será necessário maior potência do conjunto bobina e núcleo. A Figura 2.19, mostra a forma construtiva da tocha de soldagem, intensidade das deflexões conforme o valor do campo magnético e a sobreposição dos sucessivos cordões de solda.

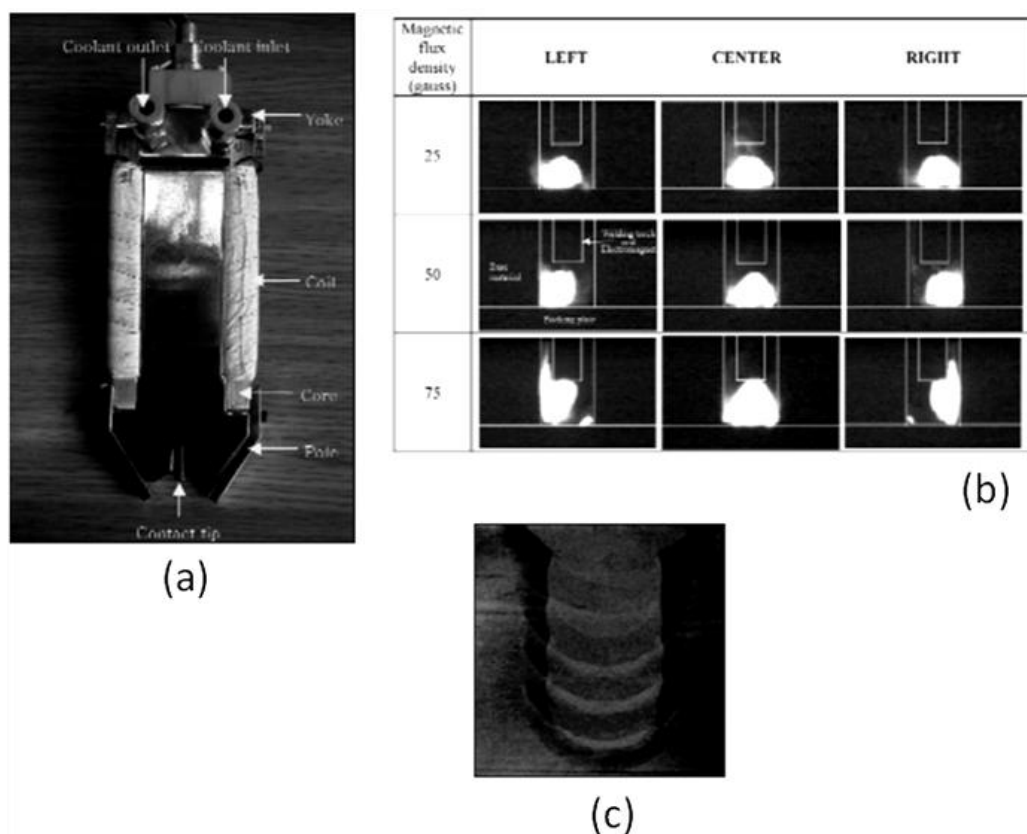


Figura 2.19: Efeitos da Oscilação magnética em chanfro profundo. (a) tocha de soldagem, (b) movimentação do arco, (c) sobreposição de cordões.

2.13. Soldagem do passe de raiz em tubulação, utilizando robô dedicado

Atualmente, a soldagem de dutos em campo, ainda é executada na maior parte, pelo processo manual, uma pequena quantidade de forma mecanizada e o passe raiz, pela importância que representa, necessita de soldadores com alto nível de qualificação específica (a realidade aponta para um número reduzido desses profissionais no mercado).

A Figura 2.20, tirada em 2007 na refinaria da Petrobrás em São Sebastião (litoral do Estado de São Paulo), apresenta um equipamento dedicado para soldagem de tubulação. Pode-se notar que se trata de uma soldagem de difícil acesso e o equipamento de tamanho reduzido é capaz de executar o trabalho onde uma pessoa, provavelmente, não conseguiria fazê-lo facilmente.



Figura 2.20: Soldagem utilizando equipamento robotizado.

Entre os benefícios que podem ser alcançados pela utilização da soldagem robotizada, lista-se a redução do retrabalho, a melhoria da qualidade, o aumento da confiabilidade, o aumento da segurança e melhoria das condições de trabalho para o operador.

A lista de vantagens se estende com ergonomia (não será o operador quem executará a soldagem, principalmente fora de posição), aumento da rapidez de execução, facilidade para o reposicionamento do conjunto robótico e alta taxa de deposição de material oferecido pelo processo GMAW, redução no número de ensaios não destrutivos (uma vez assegurada a repetibilidade do processo e qualidade da solda, os ensaios poderão passar a ser executados por amostragem), otimização do tempo de soldagem (processo contínuo sem a necessidade de substituição de vareta entre passes e fadiga do operador), menor desperdício de consumíveis, mão-de-obra não necessita de alta qualificação, menor quantidade de cordões de solda para ser concluída uma junta. A Figura 2.21 apresenta alguns dos benefícios citados anteriormente.

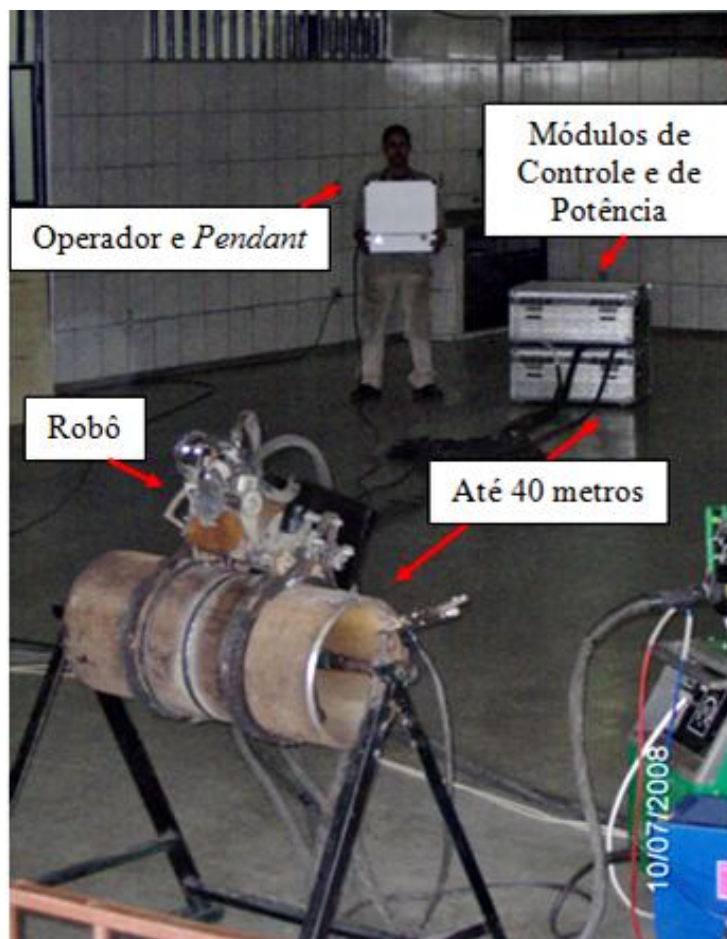


Figura 2.21: Sistema robótico controlado à distância.

A Figura 2.22 apresenta o conjunto do equipamento de soldagem mencionado na Figura 2.20 onde: (a) cilindro de gás, (b) alimentador de arame, (c) máquina de solda, (d) manipulador robótico, (e) pendant, (f) módulo de controle, (g) módulo de potência, (h) cabos, (i) sistema de refrigeração.

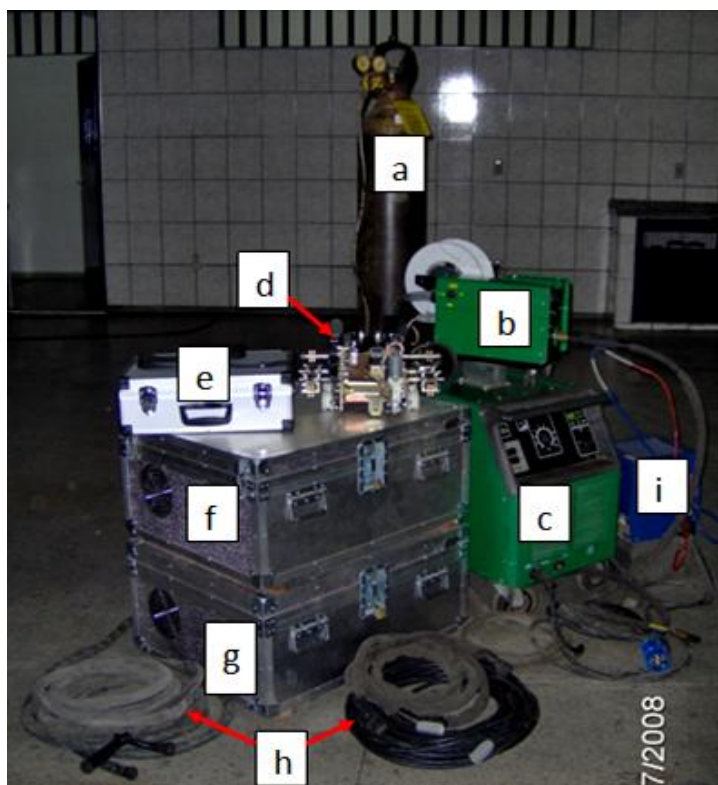


Figura 2.22: Sistema Orbital para soldagem de tubulação.

Este sistema robótico, desenvolvido por uma empresa brasileira utilizando tecnologia nacional, está apto (testado e aprovado por testes de Ultrassom) a executar soldas de enchimento e acabamento utilizando arame tubular (FCAW) ou sólido (GMAW), porém, um histórico adquirido junto desta mostrou que o passe de raiz ainda apresenta retrabalhos na ordem de 20% (por razões já mencionadas anteriormente).

O alto padrão de qualidade exigido pelo mercado define a busca contínua pela excelência na realização de juntas desde a raiz até o acabamento, sendo assim, a utilização do controle da oscilação magnética para o passe de raiz pretende oferecer recursos a um sistema robótico e auxiliá-lo nesta difícil missão.

Enfim, existe uma somatória de fatores que resulta na busca acirrada por maior produtividade entre empresas que executam soldagem de tubulações em campo, cujo resultado esperado, além da redução de custos, é a eficácia ímpar para cada união soldada.

3. Metodologia

A metodologia usada foi:

1. Construção e avaliação do sistema de deflexão do arco;
2. Testes exploratórios de soldagem, com e sem o uso de oscilação do arco;
3. Testes qualitativos e quantitativos de soldagem;

A construção e avaliação do sistema de deflexão foi feita em etapas sequenciais, que foram:

- Obtenção de algumas bobinas com potências diversas. Foram estas: 6,7W, 10W e 12W;
- Fabricação de núcleos para as bobinas de forma a direcionar as linhas de fluxo do campo magnético para a região de soldagem. Mais especificamente para o arco elétrico;
- Construção de um protótipo do sistema oscilador magnético;
- Verificação qualitativa da orientação e medição da distância de alcance do campo magnético;
- Teste de funcionamento do sistema de controle da oscilação utilizando-se uma montagem permitindo a movimentação controlada de um fio condutor simulando o arco elétrico;
- Testes exploratórios de funcionamento do sistema de controle utilizando-se soldagem GTAW;
- Medição da intensidade do campo magnético obtido em função da potência da bobina e distância de atuação referente ao arco elétrico. Para tanto utilizou-se um Teslâmetro;
- Testes exploratórios utilizando-se o processo GMAW, sem e com o controle da oscilação do arco elétrico;
- Confecção de corpos de prova “sem e com defeito”, com disposições adequadas para a execução de soldagem na posição plana;

- Testes exploratórios e controlados de soldagem em chanfro, na posição plana, sem a utilização do oscilador magnético;
- Testes exploratórios e controlados de soldagem em chanfro, na posição plana, com a utilização do sistema protótipo de controle do movimento do arco elétrico por oscilação magnética;
- Análises qualitativas, utilizando-se macrografias, filmagens, fotografias tanto do arco como dos cordões de solda e cortes dos corpos de prova, sem e com atuação do sistema protótipo de controle do movimento do arco elétrico por oscilação magnética;
- Análises quantitativas, determinando-se do centro de massa dos cordões em relação a referências cartesianas “X” e “Y”. Para tanto, foram traçadas a linha de fusão e o contorno dos cordões de solda. Utilizou-se recurso computacional para realizar medições das soldas, sem e com o controle da oscilação magnética.
- Comprovação por análise estatística (teste de hipótese) da eficiência do sistema de controle da movimentação do arco elétrico por oscilação magnética.

4. Equipamentos

4.1. Soldagem

Para a execução das soldagens foi utilizado:

- Conjunto do robô antropomórfico com 6 graus de liberdade da marca MOTOMAN modelo SK 6 composto por: (a) painel central, (b) tocha de soldagem GMAW, (c) trocador de calor (refrigeração a água), (d) *pendant*, (e) manipulador robótico, (f) alimentador de arame com dupla roldana, (g) transformador-retificador (tensão constante) modelo Moto Arc 450 – Motoman, (h) magazine para carretel de arame e (i) mesa de trabalho. Figura 4.1.

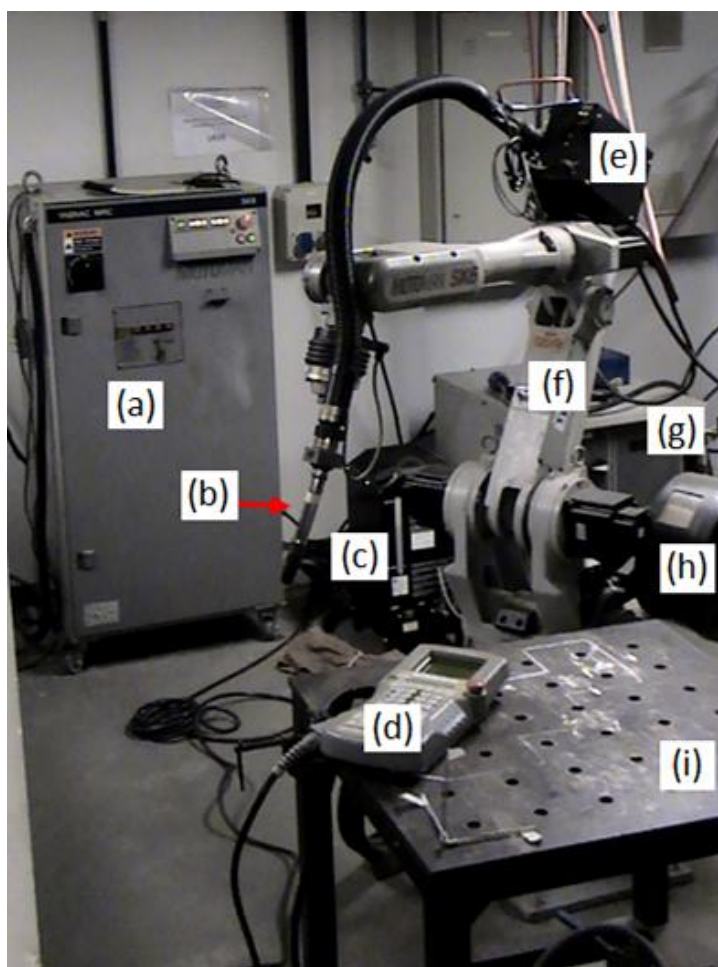


Figura 4.1: Conjunto do robô antropomórfico.

4.2. Indutor eletromagnético – núcleo e bobina.

Utilizando 33 lâminas de aço-silício com $0,25\pm 0,03\text{mm}$ de espessura, fabricou-se o núcleo da bobina. O objetivo foi obter geometria e dimensões adequadas para que, quando dispostas umas sobre as outras, as lâminas formassem um perfil circular de modo a acomodarem-se, sem folga, dentro da bobina. Desta forma foi conseguida área frontal da ponteira igual a $80\pm 2\text{mm}^2$. A Figura 4.2 apresenta o projeto para construção da ponteira, do núcleo em forma de “U” e a montagem final. Este formato característico foi utilizado nas soldagens preliminares com a intenção de promover maior concentração de campo e menor relutância magnética na região ao entorno da soldagem.

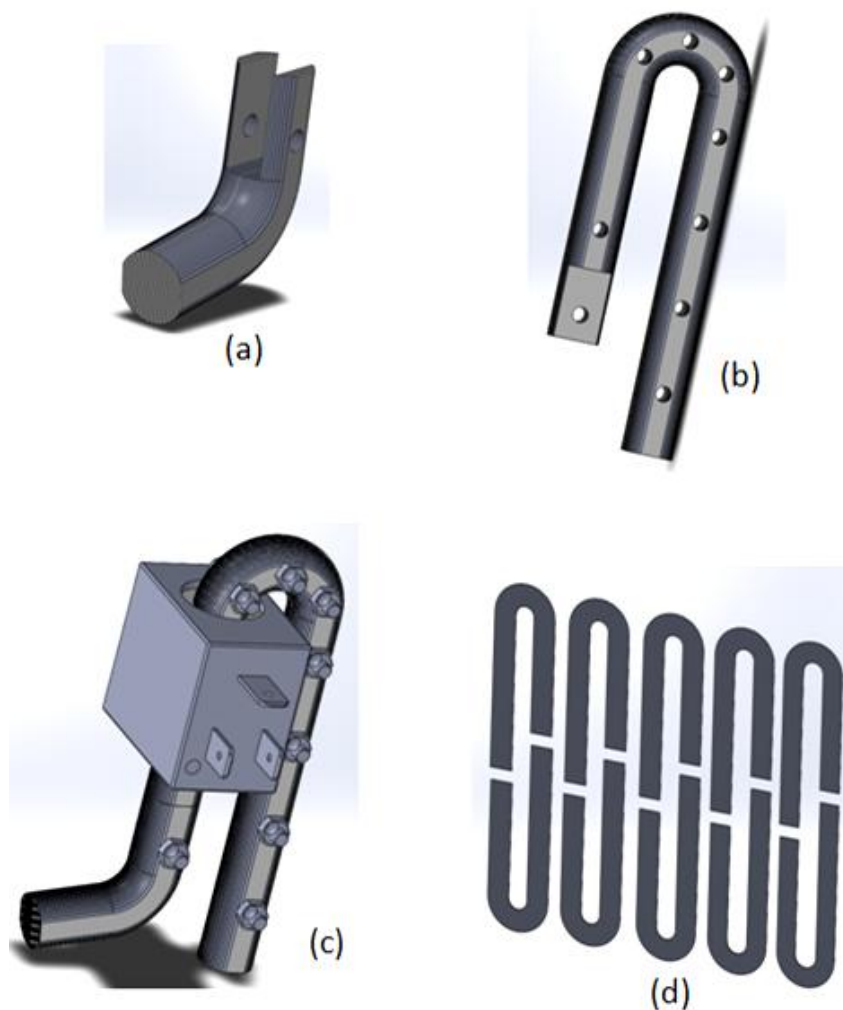


Figura 4.2: Projeto do núcleo em forma de “U”. (a) ponteira, (b) Corpo do núcleo, (c) montagem, (d) lâminas.

Baseado em Guilherme [28], fabricou-se também um núcleo sem a curvatura oposta à ponteira (denominado núcleo reduzido), Figura 4.3. Esta nova forma foi utilizada nas soldagens definitivas objetivando aumentar a área frontal do direcionador de fluxo magnético. Sendo assim, a ponteira recebeu mais 16 lâminas de cada lado totalizando uma área frontal de $134\pm 3\text{mm}^2$.

Conforme havia sido demonstrado por Greene [15], bobinas e seus respectivos núcleos são capazes de defletir o arco elétrico em um processo de soldagem. Durante as pesquisas não foram encontradas literaturas que informassem sobre a intensidade adequada do campo magnético gerado, sendo assim, foram adquiridas comercialmente bobinas com tensão fixa de 12V, potências nominais de 6,7W; 10W e 12W, todas limitadas à corrente máxima que cada uma suporta. O fabricante destas é a empresa Parker Hannifin Corporation. A Figura 4.3 apresenta os conjuntos montados (escala em milímetros).

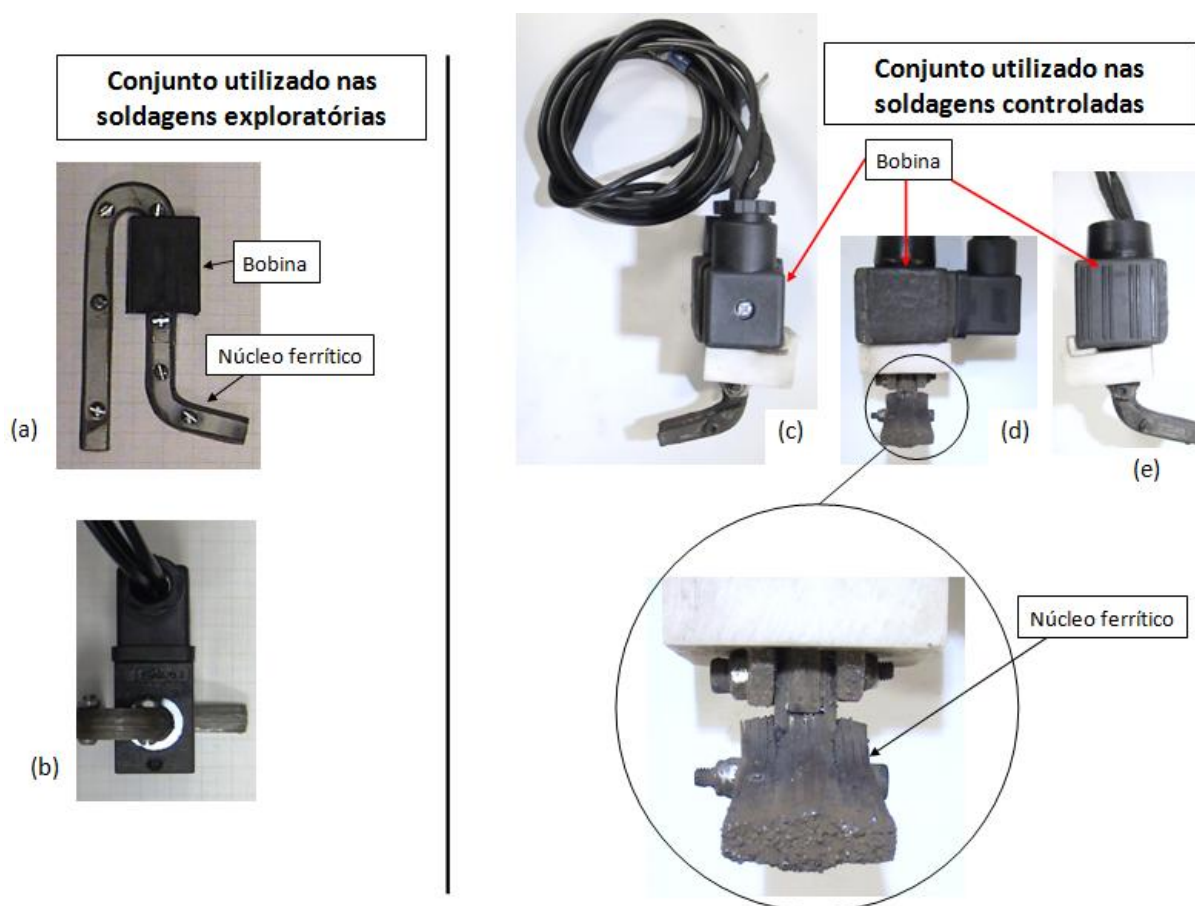


Figura 4.3: Conjuntos montados. (a) núcleo em forma de “U”- vista lateral, (b) vista superior, (c) núcleo reduzido - vista lateral, (d) vista frontal, (e) vista lateral oposta.

4.3. Inversor de polaridade para o gerador de campo magnético.

O esquema elétrico da Figura 4.4 representa o dispositivo que efetua a alternância do campo magnético utilizado para excitar a bobina defletora L1.

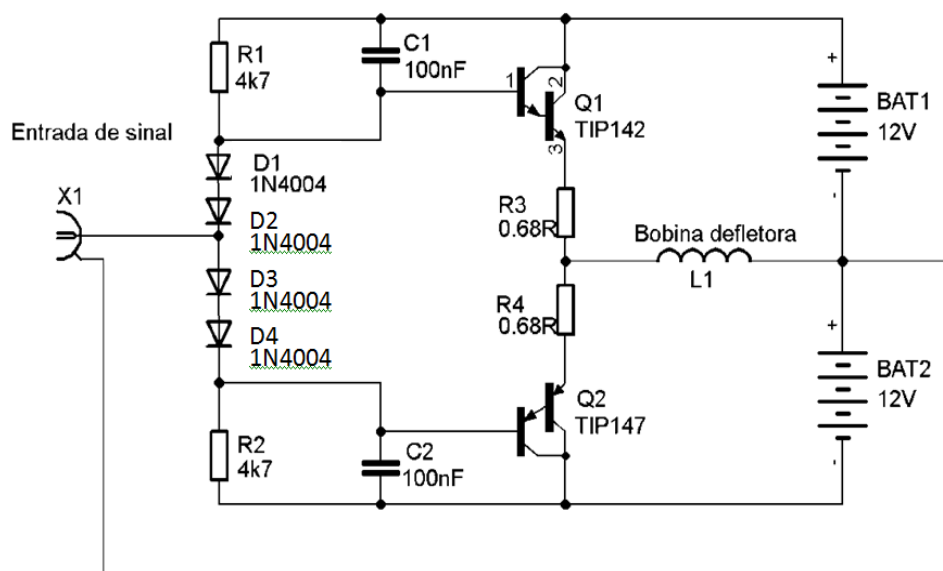


Figura 4.4: Esquema elétrico do dispositivo para a alimentação da bobina defletora do arco elétrico.

O circuito em questão pode ser qualificado como um amplificador de potência e é alimentado com fonte simétrica de $+12,0 \pm 0,5V$ e $-12,0 \pm 0,5V$.

Dois transistores Darlington Q1 e Q2, em configuração complementar, controlam a corrente de saída. Eles ajudam a compatibilizar a alta impedância de saída do gerador com a baixa impedância da carga indutiva apresentada pela bobina defletora.

Dois resistores R3 e R4 colocados no circuito de emissor dos transistores de potência estabilizam termicamente a corrente quiescente do amplificador Classe AB. Para polarizar os transistores na Classe AB, foram utilizados quatro diodos de silício excitados pelos resistores R1 e R2 de $4k7\Omega$. Os capacitores C1 e C2, ambos de $100nF$, ligados entre base e coletor, ajudam a evitar oscilações indesejáveis.

O símbolo, X1, representa o conector ligado ao gerador de sinais.

A função do inversor de polaridade é alimentar a bobina com uma corrente suficientemente alta a fim de defletir o arco elétrico. Assim, é possível alternar o sentido do campo para a direita e para a esquerda conforme a forma de onda, amplitude e frequência produzidas em um dispositivo chamado Gerador de Sinais.

A Figura 4.5 apresenta a montagem física do inversor de polaridade.

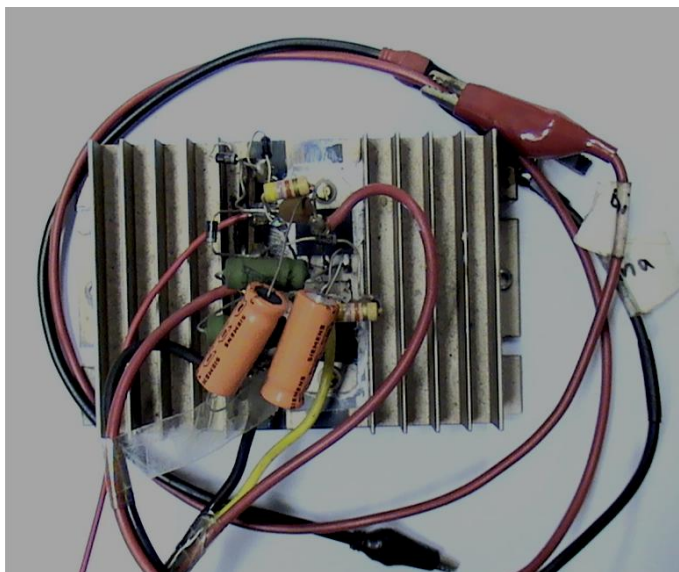


Figura 4.5: Montagem do inversor de polaridade.

4.4. Sistema controlador da oscilação magnética

O sistema para controlar e movimentar o arco elétrico por oscilação magnética durante o processo de soldagem foi composto por equipamentos interligados, conforme apresentado na Figura 4.6 e diagrama esquemático, Figura 4.7. São eles: (a) inversor de polaridade, (b) bobina e núcleo, (c) osciloscópio, (d) regulador de simetria, (e) fonte variável, (f) gerador de sinais, (g) liga/desliga oscilação à esquerda, (h) liga/desliga oscilação à direita.

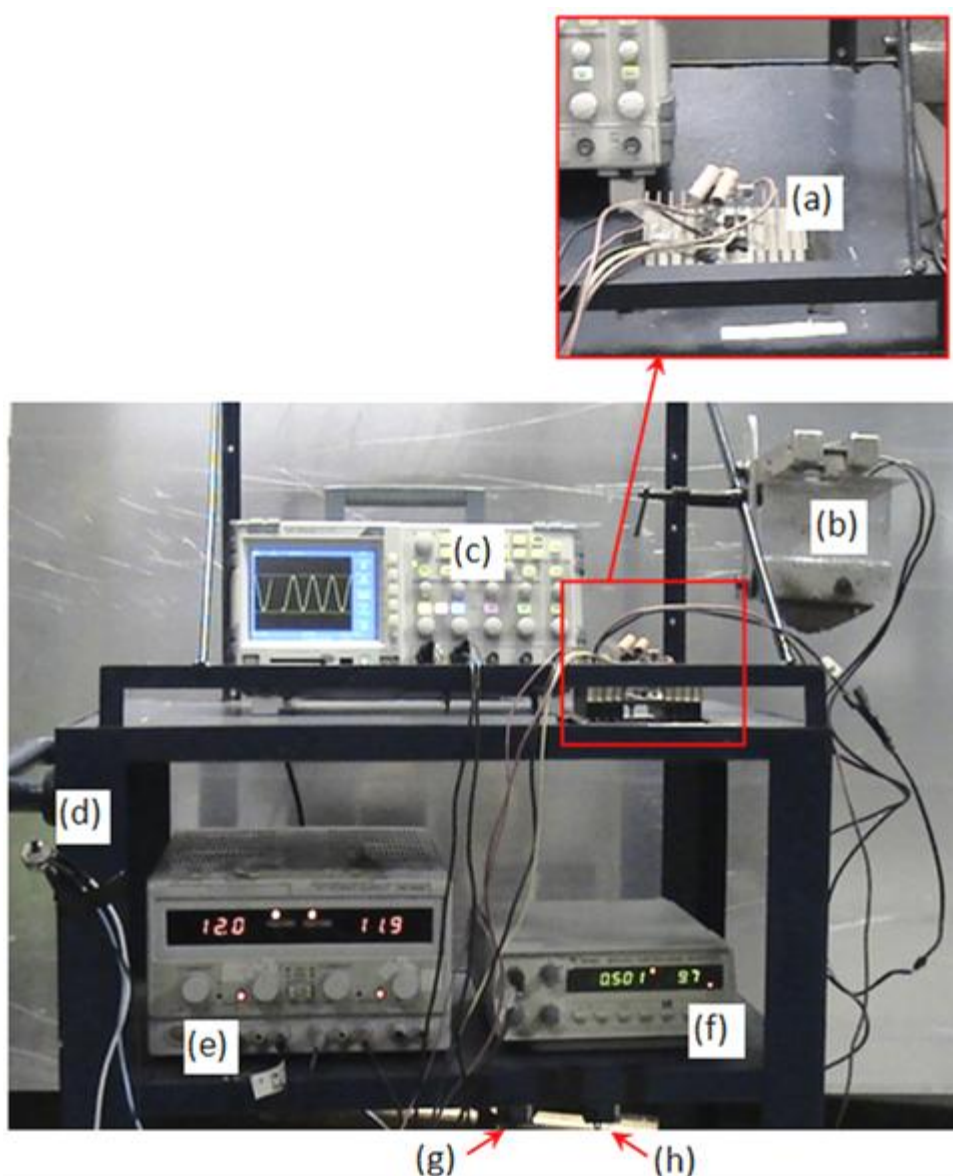


Figura 4.6: Equipamentos para controlar a deflexão do arco elétrico.

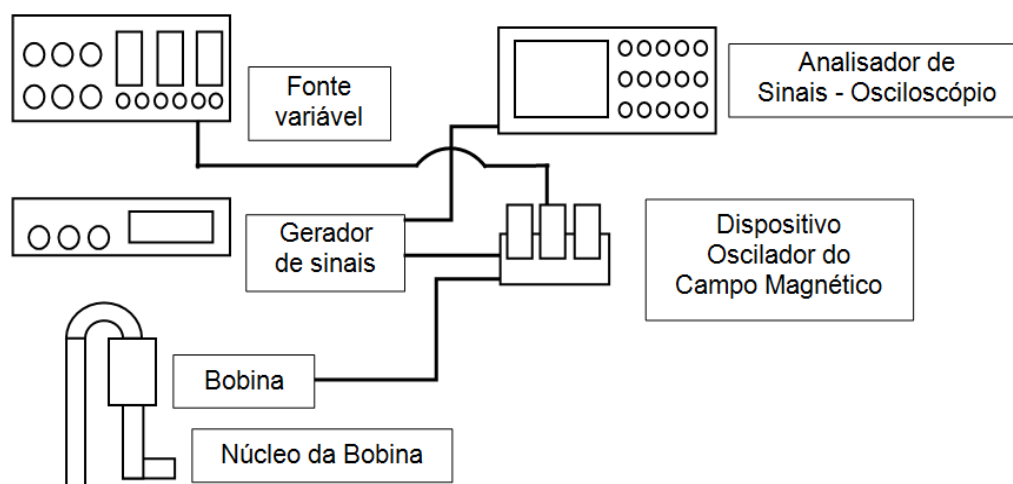


Figura 4.7: Diagrama esquemático de montagem do sistema oscilador magnético.

A fonte variável de tensão (fabricante POLIMED, modelo DC POWER SUPPLY PMI) é simétrica, digital de 0 até 30V e corrente de 0 até 5A, leitura de tensão elétrica com resolução de 0,1V, leitura de corrente elétrica com resolução de 0,1A. Sua função é fornecer tensão constante de $12,0 \pm 0,5V$ para a bobina.

O Gerador de Sinais (fabricante Minipa, modelo MFG, leitura de frequência com resolução de 0,001Hz; leitura de amplitude com resolução de 0,1V) produz diferentes formas de ondas com diferentes amplitudes e frequências para enviar ao inversor de polaridade. Este por sua vez, amplifica e transmite a inversão do sentido de corrente para a bobina (antes ou durante a soldagem). Esta última gera campo magnético no seu interior e o transfere para o núcleo, direcionando assim, o fluxo para o arco elétrico.

O monitoramento das características dos sinais elétricos produzidos pelo sistema é tarefa do osciloscópio que está ligado entre o gerador de sinais e o inversor de polaridade. Este mostra a forma de onda, amplitude e frequência do sinal gerado.

4.5. Equipamentos

Objetivando verificar a estabilidade do funcionamento do sistema de oscilação magnética, utilizou-se um multímetro da marca FLUKE, modelo 289 (leitura de tensão com resolução de 0,001V; leitura de corrente com resolução de 0,01A) para conferir a simetria no fornecimento de tensão de $12,0 \pm 0,5V$; um osciloscópio de 4 canais da marca TEKTRONIX, modelo TPS 2024 B; e para medir a intensidade do campo magnético gerado na ponta do núcleo da bobina utilizou-se um Teslâmetro da marca PHYWE, Figura 4.8. Uma filmadora SONY Handycam DCR-DVD305, capacidade 30 quadros por segundos, foi utilizada para registrar as soldagens, Figura 4.9.

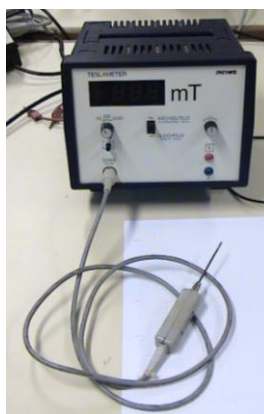


Figura 4.8: Medidor de campo magnético – Teslâmetro



(a)



(b)

Figura 4.9: Registros das soldagens. (a) vista frontal, (b) vista lateral.

4.6. Dispositivo de soldagem GTAW para teste preliminar de funcionamento do oscilador magnético.

A fim de obter informações preliminares sobre o correto funcionamento e posicionamento relativo do núcleo da bobina até o arco elétrico, foi utilizado um equipamento de soldagem a arco elétrico pelo processo GTAW (arco elétrico estável) e um anodo de cobre. Figura 4.10.

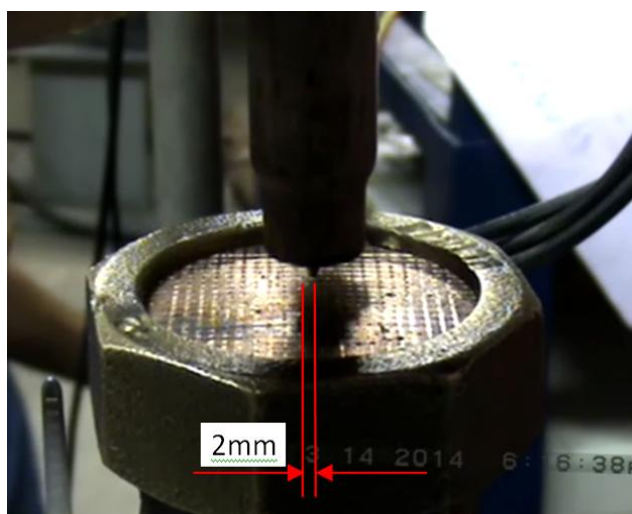


Figura 4.10: Montagem de um conjunto GTAW para obter arco elétrico estável.

Na base de cobre refrigerada com fluxo contínuo de água a temperatura ambiente, observa-se traços com linhas verticais e horizontais que distanciam-se $2,0 \pm 0,3\text{mm}$ entre si. As marcações auxiliam na medição do deslocamento do arco pela ação do sistema de oscilação magnética.

4.7. Dispositivo de fixação do conjunto oscilador magnético para processo GMAW.

Para posicionar o dispositivo indutor de campo magnético (bobina e núcleo) próximo da região de soldagem, fabricou-se um suporte regulável, utilizando-se alumínio. O corpo da tocha de soldagem mostrou-se um excelente pilar de sustentação, fixação e referencial para o acoplamento do dispositivo. A montagem e posicionamento, tanto do suporte como do indutor eletromagnético, podem ser visualizados na Figura 4.11.

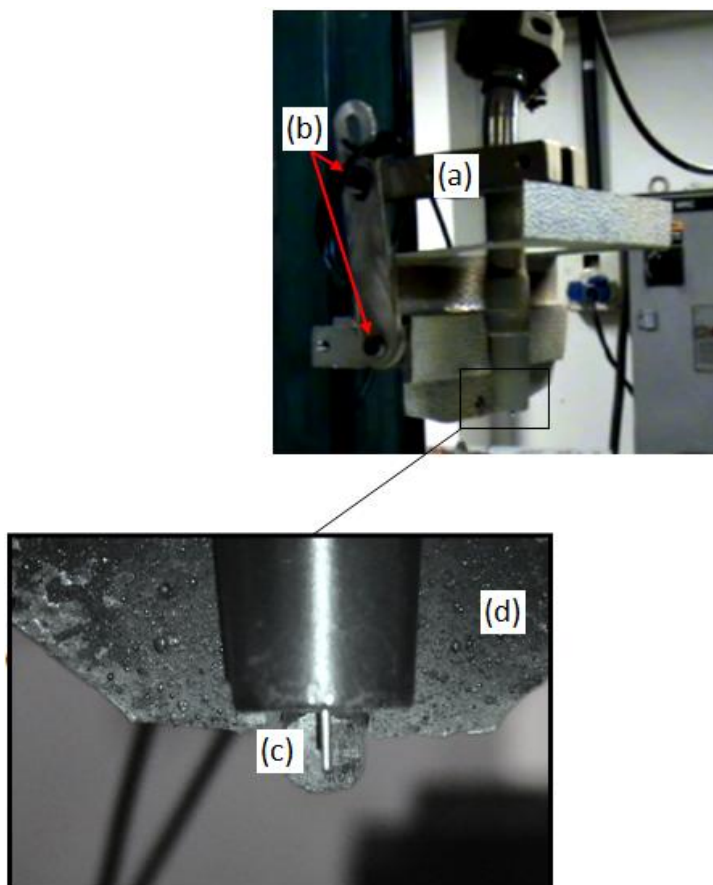


Figura 4.11: Montagem oscilador magnético. (a) braço fixador; (b) articulações; (c) núcleo da bobina; (d) painel anti-respingo.

5. Materiais utilizados

Como consumíveis, utilizou-se arame sólido, código E70S-6, diâmetro 1,2mm, produzido pela Belgo Mineira – Bekaert e mistura de gás com 75% Ar e 25% CO₂.

Para a execução das soldagens, foram fabricadas por usinagem peças “sem e com defeito” a partir de chapas de aço de baixo carbono ABNT 1008/1010. As características, identificações e marcações destas, seguiram o padrão conforme as Figuras 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4.

As dimensões mais importantes que devem ser observadas na peça “sem defeito” são: a altura do “nariz” identificado por “A” e ângulo do chanfro, Figuras 5.1 e 5.2. Os valores finais destas estão nos Anexos 1 e 2.

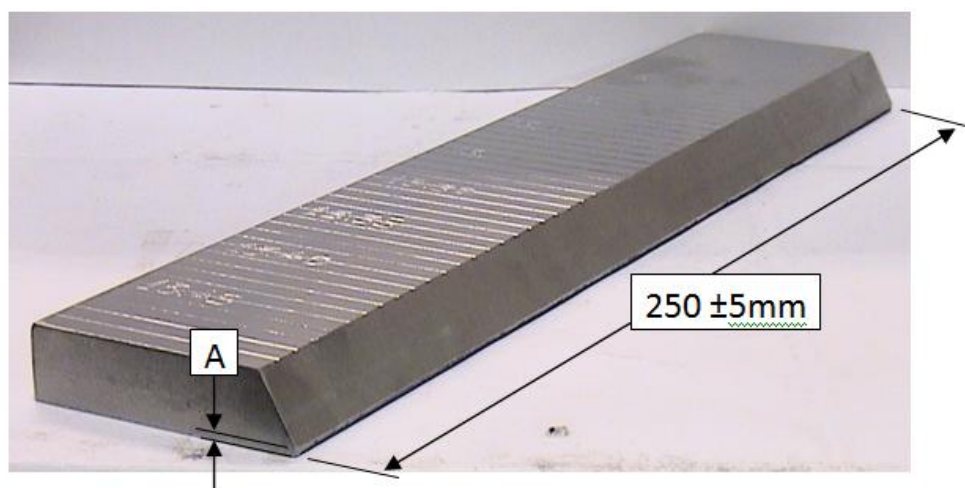


Figura 5.1: Peça “sem defeito”.

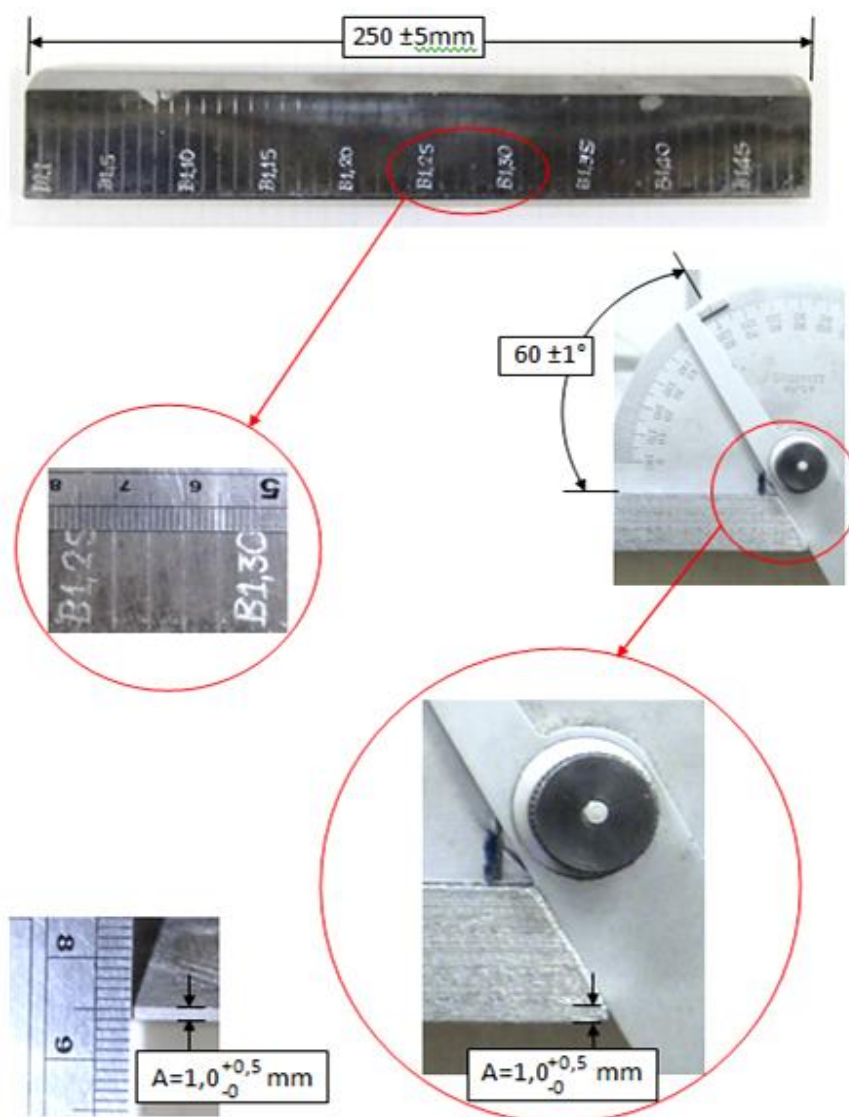


Figura 5.2: Preparação das peças “sem defeito”.

As dimensões mais importantes que devem ser observadas na peça “com defeito” são: a altura do “nariz” identificado por “A”, altura do defeito “B”, profundidade do defeito “C” e ângulo do chanfro, Figuras 5.3 e 5.4. Os valores finais destas estão nos Anexos 1 e 2.

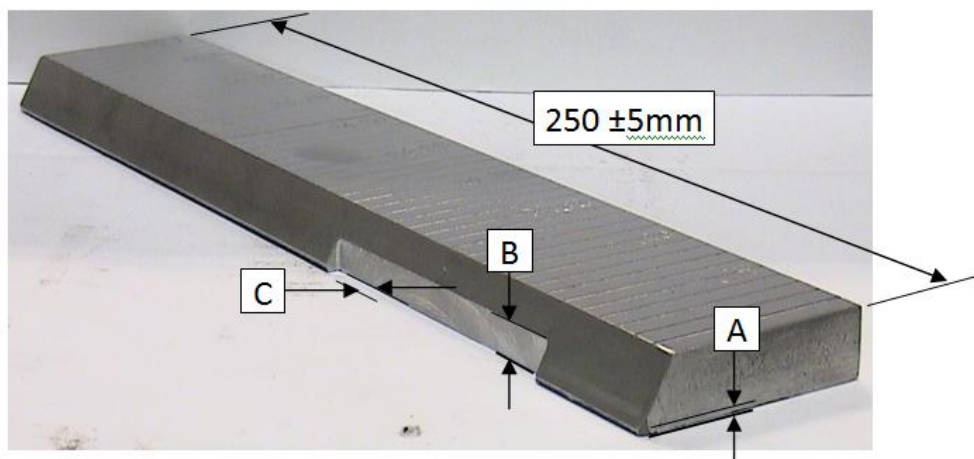


Figura 5.3: Peça "com defeito".

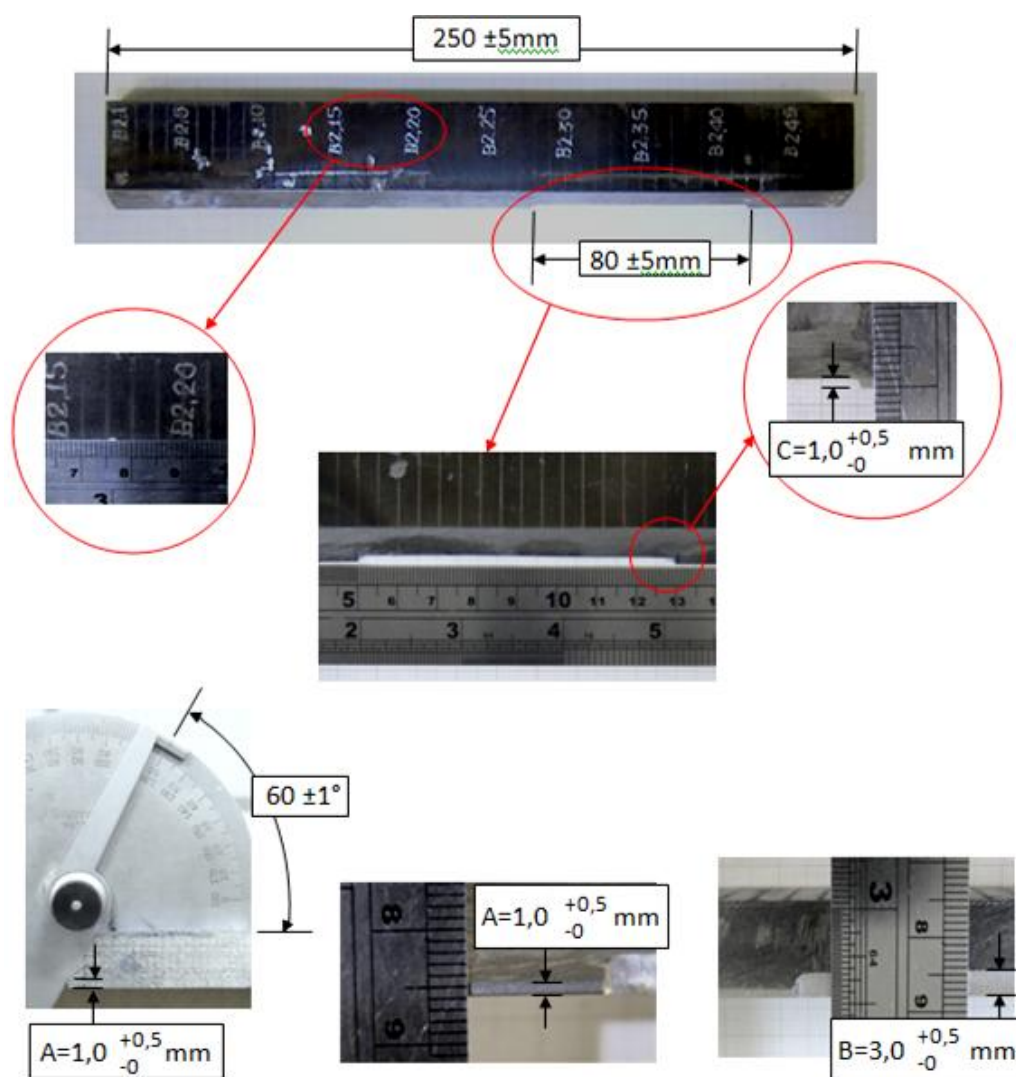


Figura 5.4: Preparação das peças "com defeito".

5.1. Combinação, montagem e travamento das peças para serem formados os corpos de prova

Anterior às soldagens, as peças “sem e com defeito”, foram combinadas, posicionadas, montadas e travadas conforme Figura 5.5, Figura 5.6 e Figura 5.7 a fim de evitar deformações térmicas inerente à soldagem.

Os corpos de prova para avaliação do efeito da oscilação foram montados a partir de duas peças. Uma delas apresenta apenas o chanfro com 60° e altura do nariz de $1 \pm 0,5$ mm, Figuras 5.1 e 5.2. A outra possui um entalhe sobreposto ao chanfro conforme as Figuras 5.3 e 5.4. Assim cada montagem de corpo de prova apresenta região “sem e com defeito” sendo que este último pode estar a esquerda ou a direita em relação à direção de soldagem. As dimensões mais importantes que devem ser observadas são, a distância de afastamento da raiz “D” e “E” que localizam-se nas regiões “sem e com defeito”. Os valores finais destas estão nos Anexos 1 e 2.

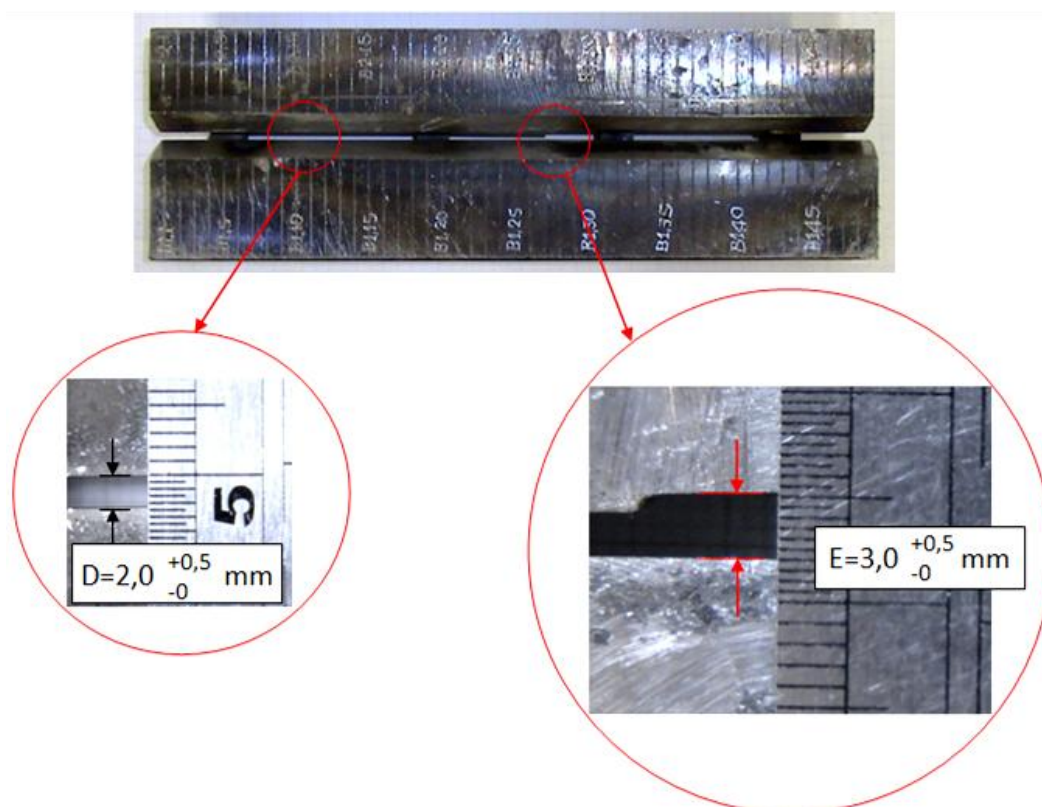


Figura 5.5: Montagem dos corpos de prova, “sem e com defeito”.

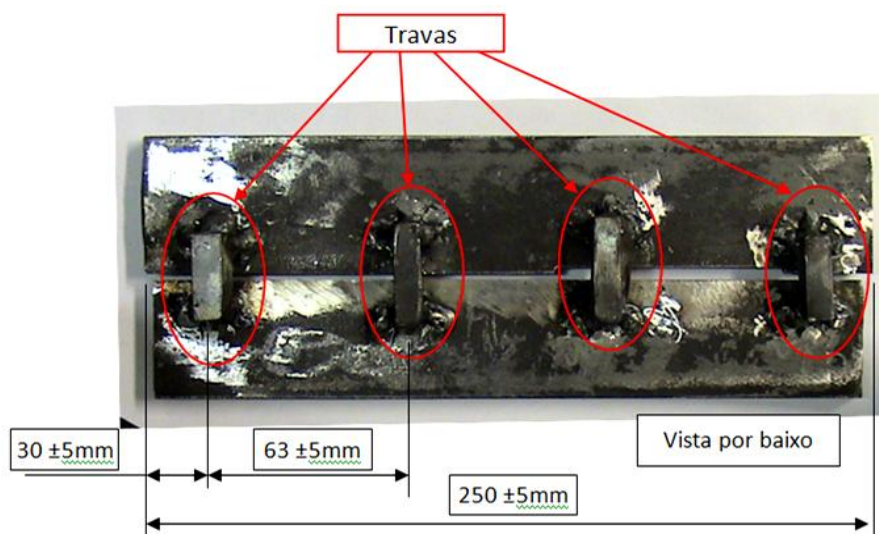


Figura 5.6: Posicionamento das travas nos corpos de prova.



Todas as travas foram confeccionadas com entalhe na região central, de forma a não haver interferência na geometria e nem na solidificação do cordão de solda.

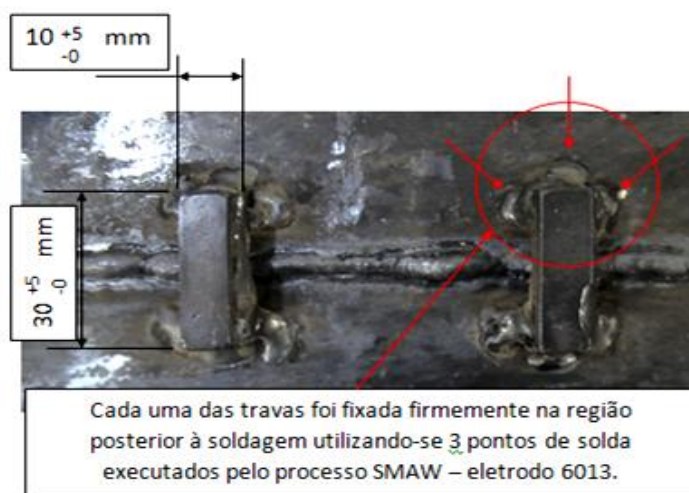


Figura 5.7: Fixação das travas nos corpos de prova.

5.2. Identificação dos corpos de prova

Inicialmente foram traçadas linhas horizontais, espaçadas de 5 em 5 milímetros em todas as peças. A primeira linha da peça B1 recebeu a denominação de B1.1. A linha cinco da mesma recebeu a marcação B1.5 e assim sucessivamente. Para a montagem dos corpos de prova, as linhas de cada peça foram alinhadas conforme apresentado na Figura 5.8. Sendo assim, a peça B2 montada com a peça B1 passou a ser denominada: corpo de prova B2xB1. O fato do índice “1”, algumas vezes, aparecer antes do índice “2” em denominações de corpos de prova, isso não possui qualquer significado específico. Foi apenas uma ordenação após as preparações. Estes raciocínios seguiram para as demais montagens.

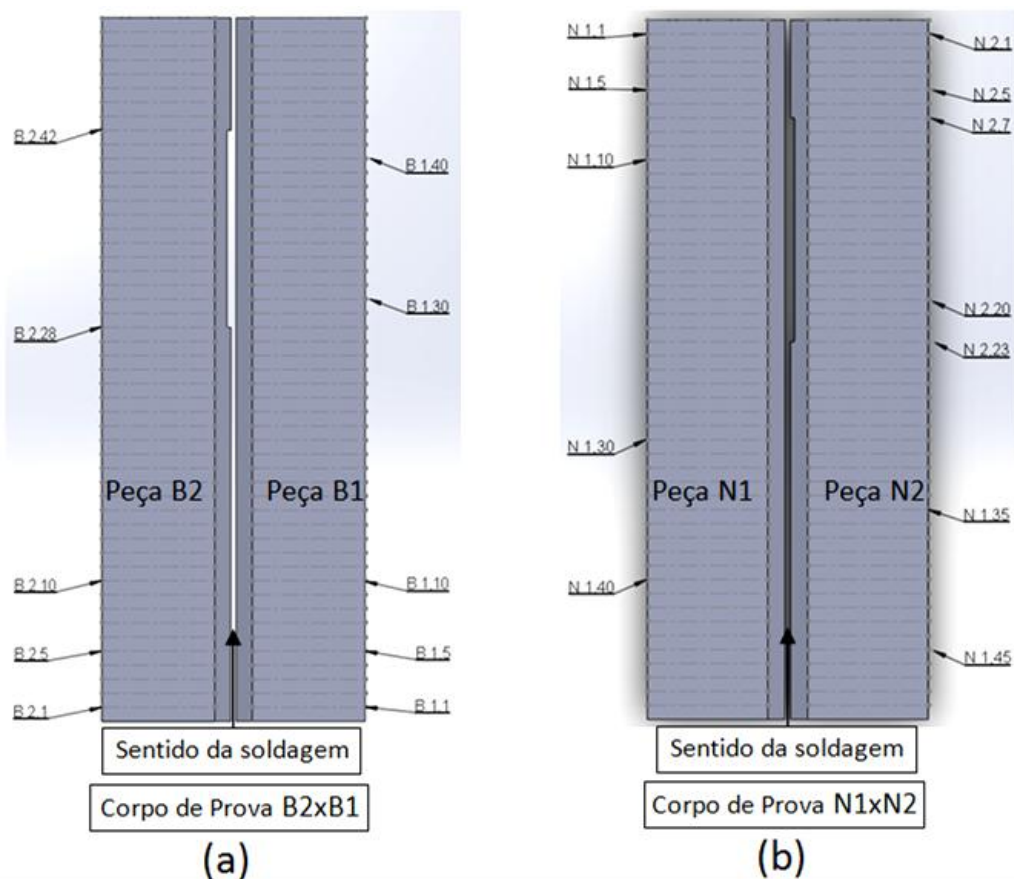


Figura 5.8: Identificação dos corpos de prova. (a) CP B2xB1, (b) CP N1xN2.

Vários corpos de prova foram soldados, inicialmente com diferentes parâmetros e padrões de oscilação do arco. Os melhores resultados apresentados foram usados para as avaliações quantitativas e estão listados abaixo.

- CP B2 x B1 = solda executada com controle da oscilação magnética; onda senoidal, simétrica e frequência 1,5Hz. Defeito à esquerda do sentido da soldagem.
- CP BA2 x BA1 = solda executada com controle da oscilação magnética; onda senoidal, simétrica e frequência 1,5Hz. Defeito à direita do sentido da soldagem.
- CP D2 x D1 = solda executada com controle da oscilação magnética; onda senoidal, simétrica e frequência 1,5Hz. Defeito à esquerda do sentido da soldagem.
- CP O1 x O2 = solda executada sem controle da oscilação magnética. Defeito à esquerda do sentido da soldagem.
- CP N1 x N2 = solda executada sem controle da oscilação magnética. Defeito à direita do sentido da soldagem.
- CP I 1 x I 2 = solda executada com controle da oscilação magnética; onda quadrada, deslocada para a direita, frequência 0,5Hz. Defeito à esquerda do sentido da soldagem.
- CP P2 x P1 = solda executada com controle da oscilação magnética; onda quadrada, deslocada para a direita, frequência 0,5Hz. Defeito à direita do sentido da soldagem.

6. Resultados e Discussão

Diversos tipos de testes exploratórios forneceram informações como:

- identificação do campo magnético produzido pela bobina, medição da sua intensidade e posicionamento mais adequado referente ao arco de soldagem. Ainda preliminarmente, as soldagens permitiram estabelecer parâmetros adequados para a realização de cordões de solda sobre chapa e em chanfro.

Os testes para avaliação qualitativa e quantitativa, executados dentro do chanfro, forneceram informações sobre a atuação e não atuação do controle da deflexão do arco elétrico por oscilação magnética.

6.1. Resultados exploratórios

Antes de se estabelecer o arco elétrico para a realização de soldagens, fizeram-se necessárias simulações com o intuito de adquirir conhecimento quanto ao comportamento tanto do sistema de controle desenvolvido como do próprio arco elétrico em possíveis situações de soldagem.

6.1.1. Verificação da orientação e medição da distância significativa de alcance do campo magnético

Utilizando uma bobina de 6,7W, realizaram-se os testes para avaliação qualitativa e quantitativa da deflexão sob a ação de um campo magnético gerado aplicando-se tensão de $12,0 \pm 0,5V$ defletindo um condutor de eletricidade [10-12] por onde passa corrente elétrica de 5A.

Um fio fino de cobre simulou o comportamento do arco no momento da soldagem. A Figura 6.1 apresenta: (a) vista lateral (bobina e núcleo), (b) vista frontal do condutor defletido 6mm para a esquerda, (c) condutor na posição central e (d) condutor defletido 6mm para a direita. Ao fundo está papel milimetrado.

Estes testes serviram para compreender melhor como de daria a deflexão e permitir uma avaliação um pouco mais quantitativa do fenômeno.

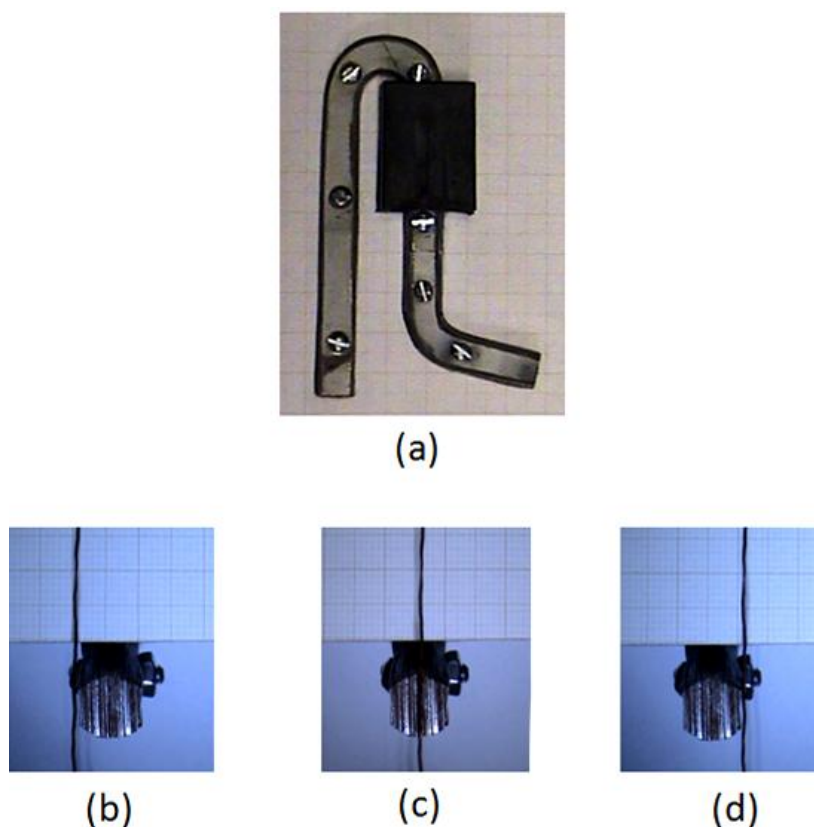


Figura 6.1: Atuação do oscilador magnético.

Ainda com esse objetivo, efetuou-se a montagem da Figura 6.2. Esta permitiu a visualização do comportamento das linhas de fluxo magnético e também foi possível observar a região de atuação do campo. Para isso utilizou-se pó metálico aplicado sobre papel milimetrado e a figura formada indicou algumas dimensões relacionadas ao campo e as linhas de fluxo magnético em diferentes direções e planos.

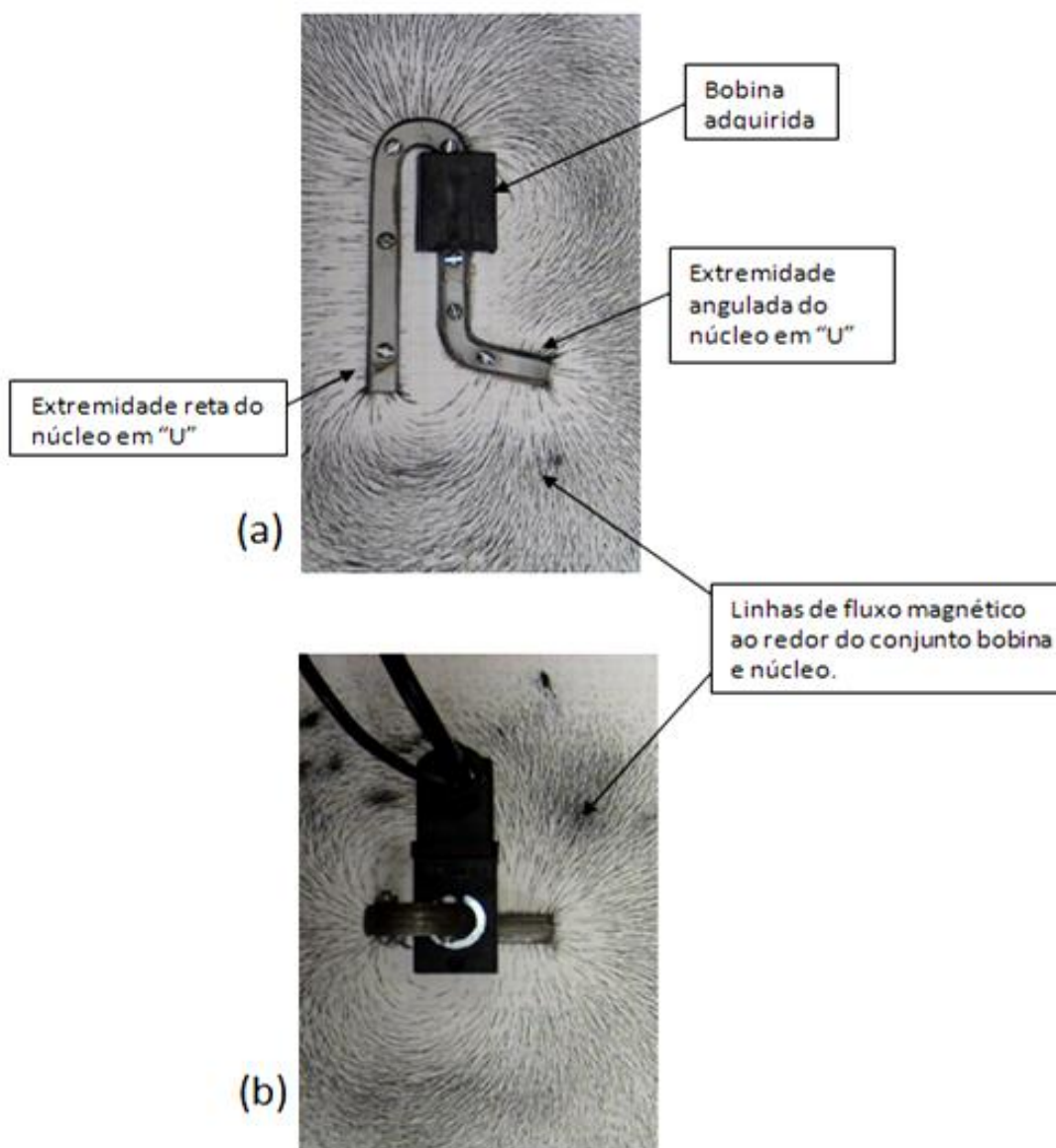


Figura 6.2: Linhas de fluxo geradas pela bobina. (a) Vista lateral, (b) Vista superior.

6.1.2. Região de atuação do campo magnético

Para facilitar a visualização das linhas de fluxo magnético atuando na região da soldagem, Figura 6.3 e Figura 6.4, utilizou-se o recurso de imprimir em papel a imagem da tocha (com transparência), da chapa e do arco elétrico. Posteriormente, os desenhos impressos foram recortados e posicionados sobre as linhas de fluxo.

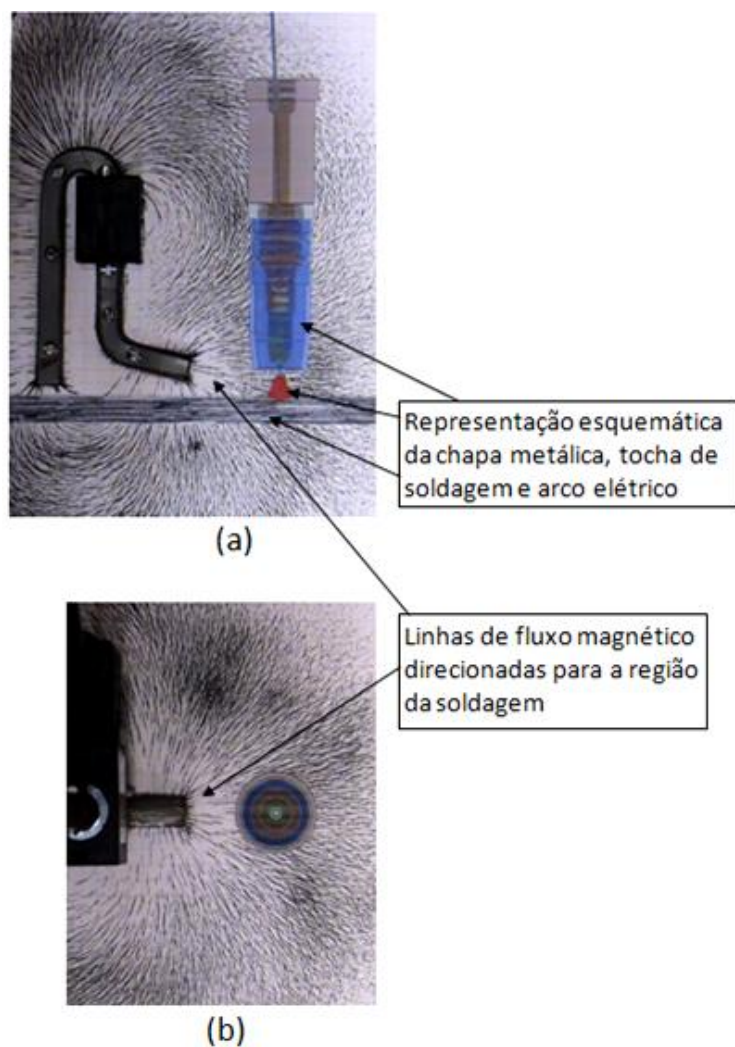


Figura 6.3: Visualização das linhas de fluxo. (a) Vista lateral, (b) Vista superior.

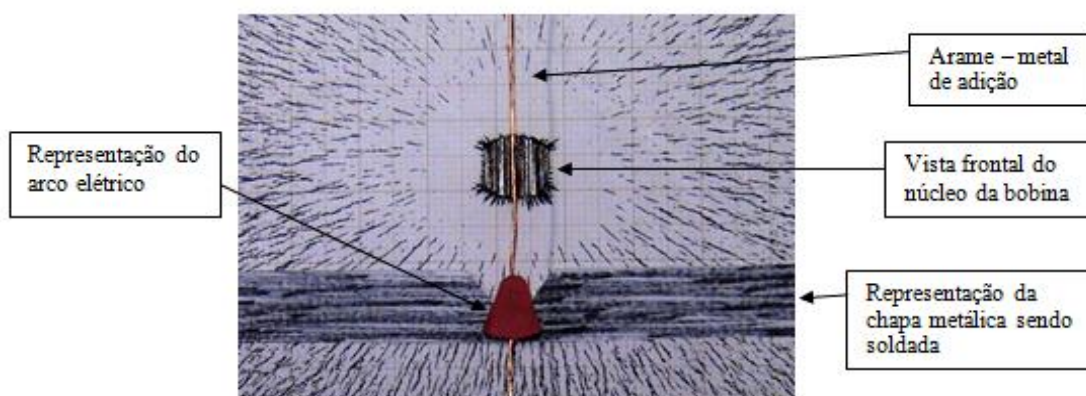


Figura 6.4: Linhas de fluxo magnético. Vista frontal.

6.1.3. Tipos de ondas geradas pelo sistema oscilador magnético

O oscilador magnético que foi desenvolvido utiliza um gerador de sinais que produz formas de ondas diferentes: senoidais, triangulares e quadradas, Figura 6.5 e promove a inversão do movimento da direita para a esquerda conforme o sentido da corrente que passa pela bobina. Quando a corrente é positiva (região acima da linha vermelha do gráfico) o movimento oscilatório ocorre para a direita. Analogamente, corrente negativa (região abaixo da linha vermelha) a oscilação dá-se para a esquerda.

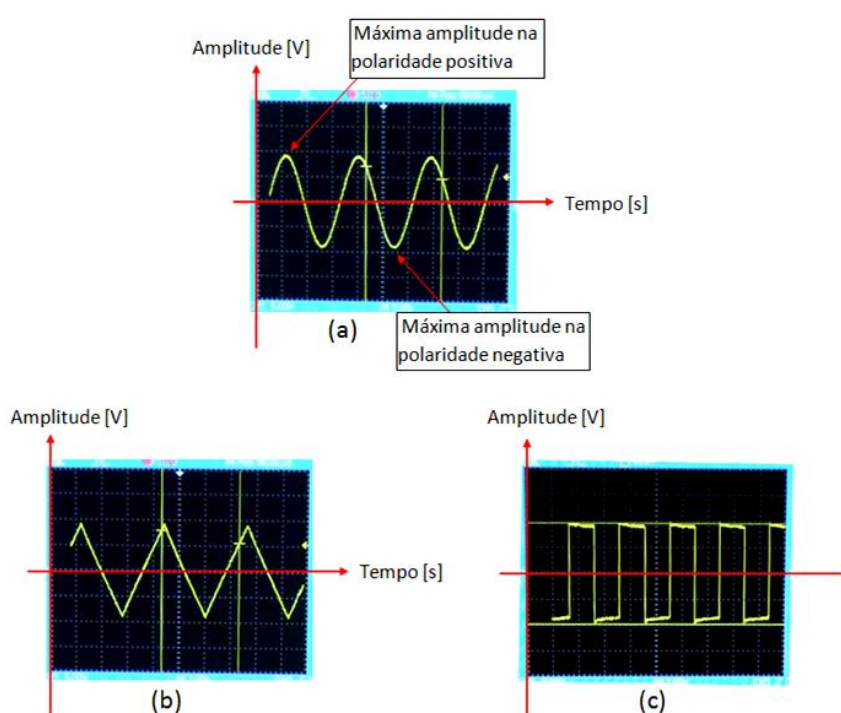


Figura 6.5: Característica das ondas. (a) senoidais, (b) triangulares, (c) quadradas.

A Figura 6.6 apresenta vários arranjos disponíveis para a movimentação do arco elétrico por oscilação magnética. Por exemplo: (a) onda triangular simétrica com frequência de 2Hz e amplitude de 9,8V, (b) onda triangular simétrica com frequência de 0,5 Hz e amplitude de 9,8V, (c) onda triangular simétrica com frequência de 0,2Hz e amplitude de 9,8V, (d) onda triangular simétrica com frequência de 2Hz e amplitude de 4V, (e) onda senoidal simétrica com frequência de 2Hz e amplitude de 9,8V, (f) onda senoidal simétrica com frequência de 0,5Hz e amplitude de 9,8V, (g) onda senoidal simétrica com frequência de 0,2Hz e amplitude de 9,8V, (h) onda senoidal simétrica com alta frequência de 2Hz e amplitude de 4V, (i) onda quadrada simétrica com

frequência de 1Hz e amplitude de 9,8V, (j) onda quadrada com frequência de 1Hz, amplitude de 9,8V e inversão acelerada para a direita, (k) onda quadrada com frequência de 1Hz, amplitude de 9,8V e inversão acelerada para a esquerda, (l) onda dente de serra com frequência de 0,5Hz, amplitude de 9,8V e inversão acelerada para a esquerda.

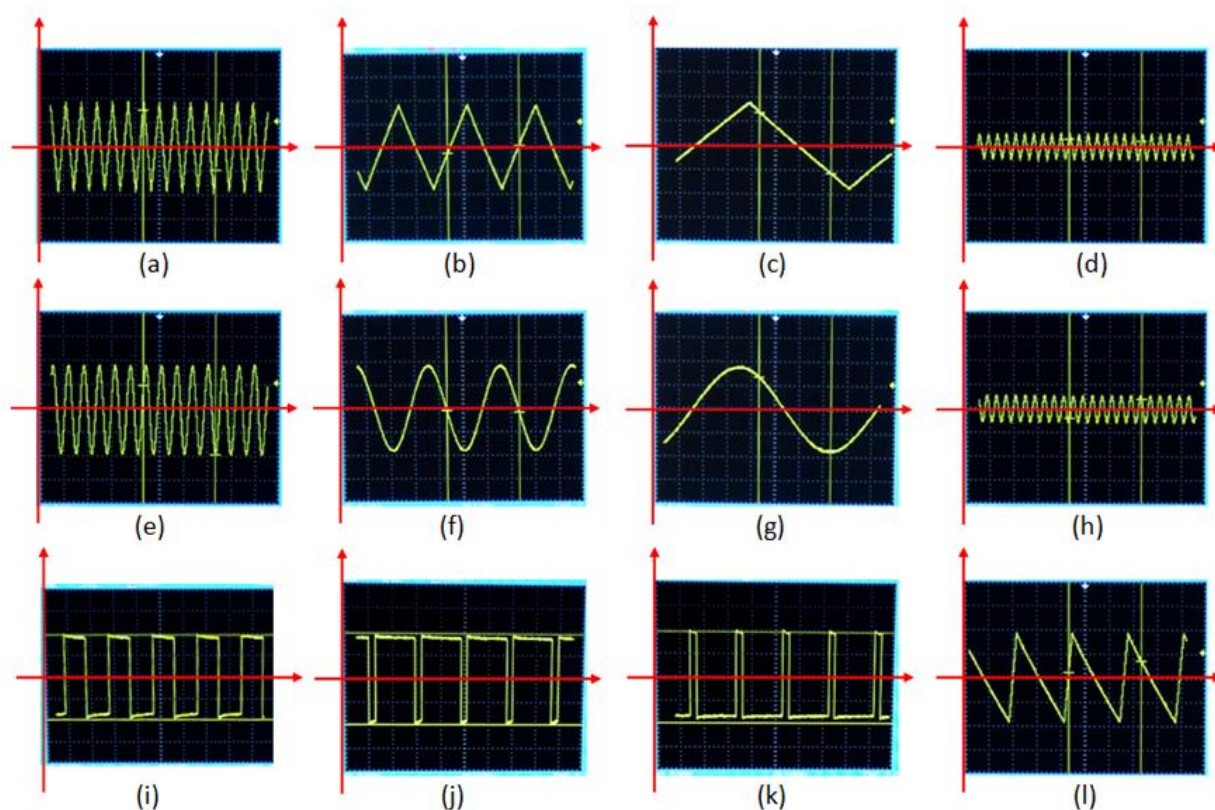


Figura 6.6: Tipos de ondas utilizadas para a oscilação do arco elétrico.

Desta forma, pode-se observar o fio condutor (que simula o arco) oscilar de um lado para outro com características diversas realizando deflexões rápidas, amplas, lentas, aceleradas, desaceleradas, enfim, o sistema permite inúmeras alternativas para simular os movimentos de um soldador experiente, lembrando que aqui estão representadas algumas possibilidades.

O dispositivo desenvolvido permitiu ajustar valores de frequência entre 0,1Hz e 10Hz e deslocamentos de 1mm até 6mm para cada lado.

Estes recursos podem ser facilmente aumentados utilizando-se bobinas com maiores potências e modulador de sinais com outras características.

6.1.4. Simulação da atuação do oscilador magnético defletindo o arco elétrico para execução do passe de raiz

Sabe-se que o aço com temperatura acima da zona de transformação de fase ferrita/austenita, perde suas características magnéticas [31-34], porém, experimentalmente consegue-se visualizar que as gotas do metal de adição contidas pelo arco o acompanham segundo sua movimentação [23-25]. A tocha de soldagem GMAW tem entre suas funções: distribuir o gás protetor sobre a região da poça de fusão e também conduzir energia elétrica que faz com que o arame eletrodo se funda pouco abaixo da face inferior do bico de contato. Em laboratório, executou-se uma montagem conforme a Figura 6.7 de forma a permitir que o fio condutor articulasse na região logo abaixo do bico de contato para que a atuação do sistema de controle de oscilação magnética do arco elétrico possibilitasse movimentar a representação de um arco elétrico.

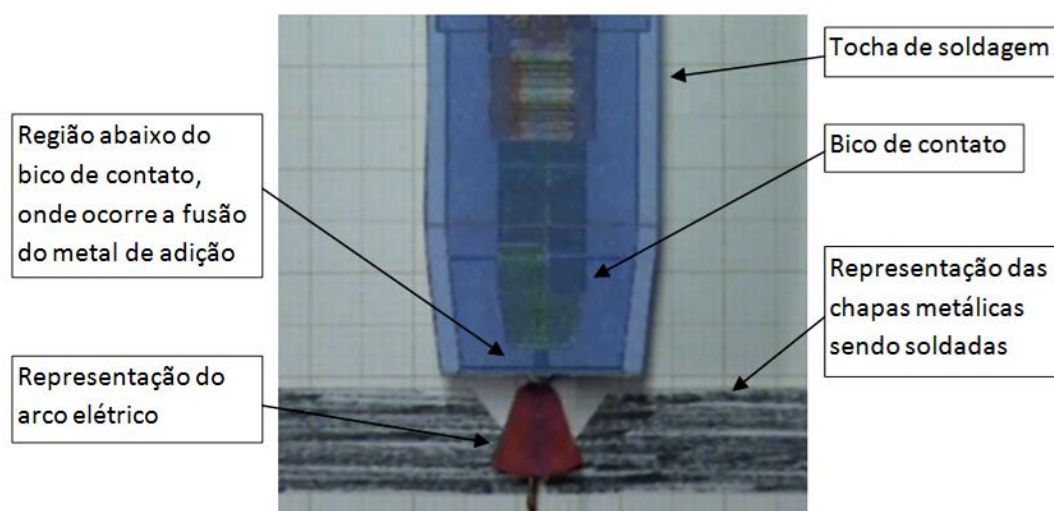


Figura 6.7: Montagem que permite a articulação do arco abaixo do bico de contato.

Mais uma vez, as combinações entre formas de ondas, frequências e amplitudes promoveram uma vasta gama de possibilidades para a movimentação da simulação do arco elétrico.

As imagens da Figura 6.8 foram produzidas a partir da filmagem onde estavam sendo praticadas várias combinações com o intuito de observar o funcionamento do sistema oscilador magnético conduzindo a representação do arco elétrico, alternadamente de um lado para outro.

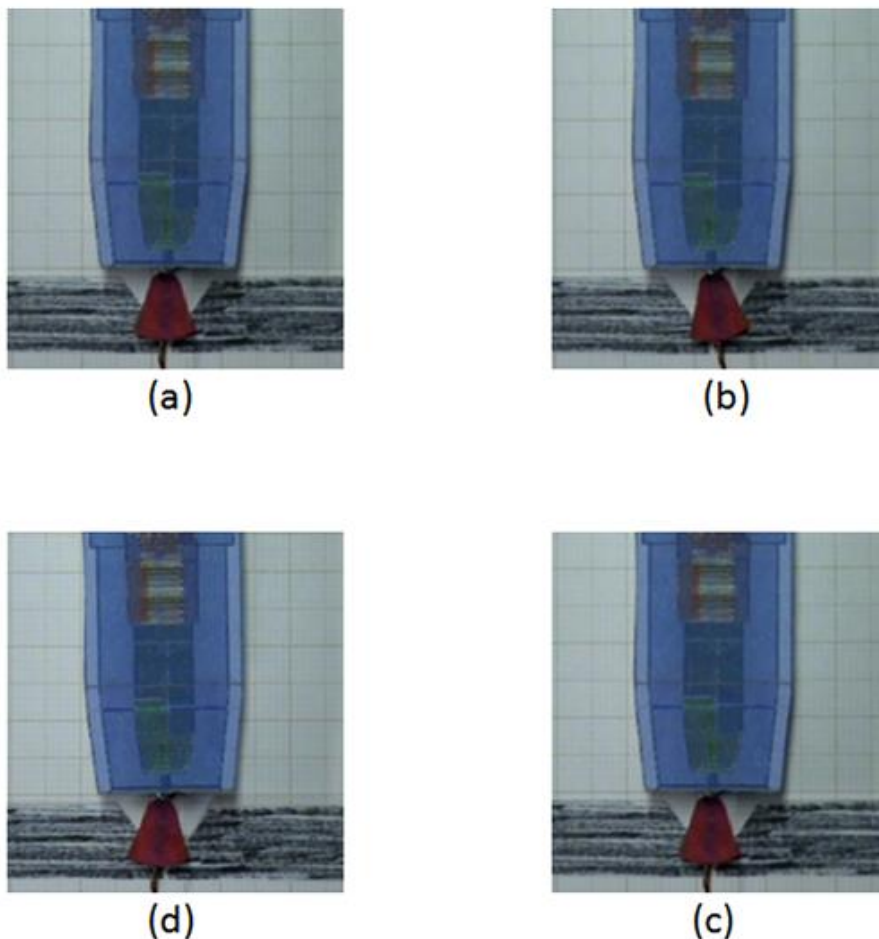


Figura 6.8: Oscilação do arco elétrico. (a) posição central, (b) articulação à direita, (c) retorno à posição central, (d) articulação à esquerda.

O passe de raiz é talvez a etapa mais difícil da soldagem, pois, como já foi dito, o mau posicionamento das peças exige do soldador, perícia, habilidade e experiência para que a solda possua características tais que garantam uma base robusta e isenta de imperfeições para suportar aos demais cordões que serão depositados sucessivamente até o preenchimento total da junta.

A sequência de soldagem necessita ser executada adequadamente para que toda a união permaneça isenta de imperfeições. Inclusão de escória, falta de fusão, trinca, são exemplos de descontinuidades que podem ocorrer durante o processo. Experiências de campo mostram que, além da boa regulagem dos parâmetros de soldagem, o posicionamento do arco elétrico, espalhamento do metal de adição, formação da poça de fusão e movimentação do arco elétrico no momento preciso para levar ou retirar material de uma determinada posição, faz com que a união soldada possua características ótimas desde a raiz até o acabamento final. As imagens da Figura 6.9 foram produzidas a partir da filmagem que simula alguns posicionamentos inadequados das peças a unir, porém, muito comuns de acontecer durante a realização do passe de raiz. Também representa algumas possíveis soluções tais como, posicionamento do arco elétrico sobre uma região de grande massa metálica, deslocamento do metal de solda para uma região de pouca massa metálica, região que deve conter grande concentração de energia para a fusão de ambas as peças, deslocamento alternado do arco elétrico acima da região da raiz.

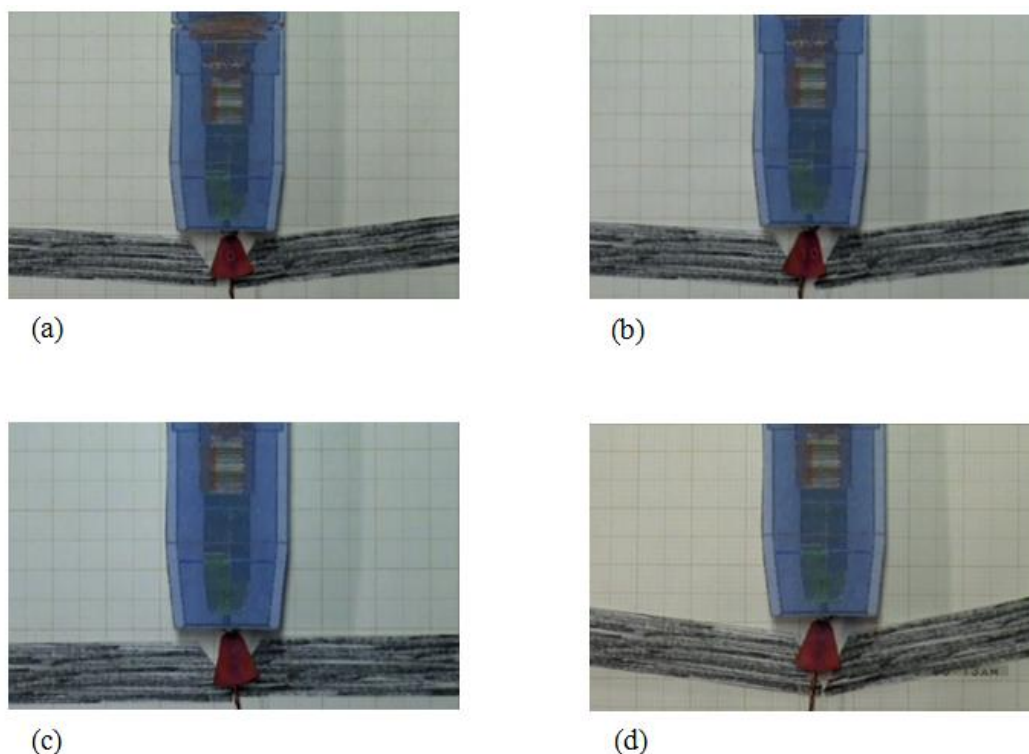


Figura 6.9: Exemplo de mau posicionamento de peças. (a) arco elétrico sobre massa metálica, (b) deslocamento do metal de solda, (c) concentração de energia em ambas as peças, (d) arco elétrico acima da raiz.

6.1.5. Atuação do sistema controlador da oscilação magnética em condições comparativas entre os processos GTAW e GMAW

De acordo com os resultados apresentados pelas montagens e simulações, o controlador de deflexão do arco elétrico por campos magnéticos oscilantes foi submetido a testes práticos reais. Por não ter sido encontrada nenhuma literatura específica que comentasse sobre a melhor combinação entre posicionamento, distância e potência da bobina de um indutor eletromagnético referente a um arco elétrico para os processos de soldagem, foram efetuadas várias tentativas até se estabelecer o melhor resultado. Utilizando-se um equipamento de soldagem GTAW para estabelecer um arco elétrico estável, foi possível verificar, experimentalmente, o desempenho do conjunto oscilador magnético em questão.

As imagens da Figura 6.10 foram produzidas a partir de filmagem e permitem visualizar a amplitude da deflexão do arco. Seguindo o padrão de medição da Figura 2.18 fez-se do eixo de simetria da tocha a referência vertical, então a Figura 6.10(a) mostra o arco sem deflexão. Testes exploratórios demonstraram que os melhores resultados impostos pelo oscilador quanto ao deslocamento lateral do arco ocorreram utilizando-se a bobina para potência de $12,0 \pm 0,5W$, distância entre a ponteira da bobina e o eletrodo $25 \pm 1mm$, distância entre eletrodo e anodo $5 \pm 0,5mm$, tensão 30V corrente 100A. comprimento $8 \pm 1mm$, intensidade de campo $2,0 \pm 0,2mT$, forma de onda senoidal, simétrica e frequência de 1Hz. Verificou-se também, que para esta potência de bobina, dimensões superiores a 26mm apresentaram deflexões inferiores a 6mm por lado (devido à perda de intensidade do campo magnético) e menores do que 24mm superaqueceram o núcleo pelo fato da proximidade com a fonte de calor. Nestas condições, o melhor deslocamento alcançado foi de 6mm para cada lado, Figura 6.10(b) e Figura 6.10(c). Notar que a base do arco apresenta-se de forma alongada caracterizando a deflexão lateral e o triângulo desenhado facilita a visualização da dimensão entre os centros (arco e tocha).

Vale ressaltar que, até esta etapa, está sendo realizada uma apuração de informações, pois, sabe-se que o comportamento do arco é característico para cada processo de soldagem e também é função dos parâmetros adotados, por exemplo: a rigidez do arco depende do *stick-out*, intensidade de corrente, gás de proteção, entre outros fatores.

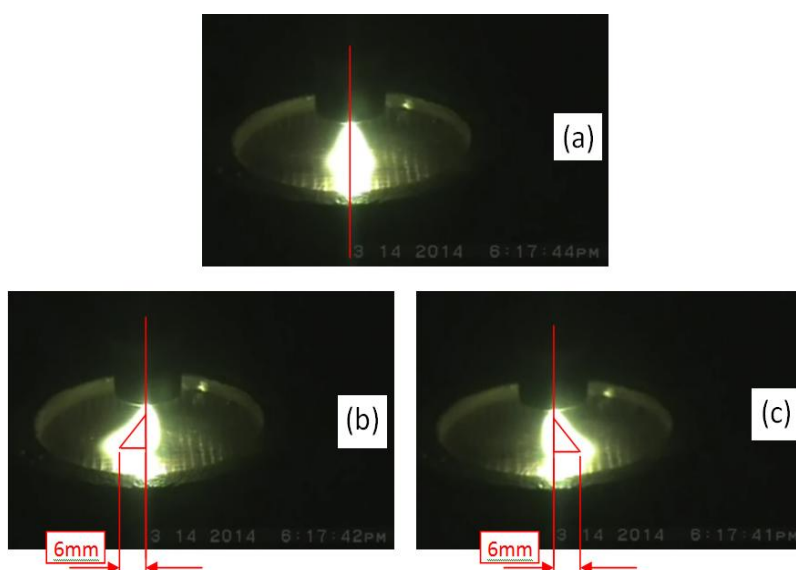


Figura 6.10: Fotos da deflexão do arco GTAW. (a) posição central, (b) e (c) defletidos.

A Figura 6.11 apresenta a medição da intensidade de campo magnético em função da distância de atuação, conforme descrito anteriormente.

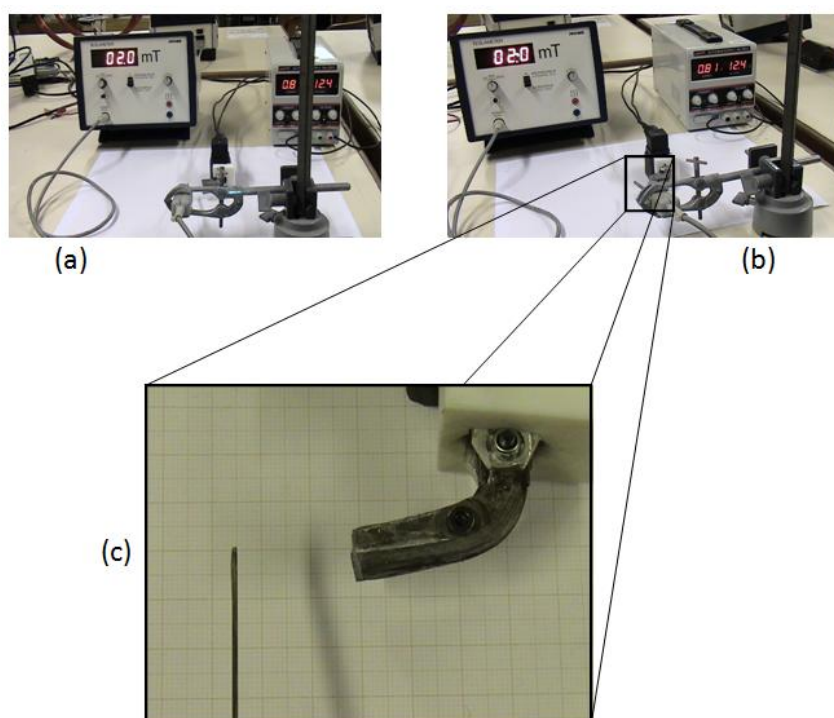


Figura 6.11: Medição do campo magnético. (a) visão geral dos equipamentos, (b) valor da medição, 2,0mT, (c) ampliação.

Com base nestes resultados, usou-se essas informações para experimentos com o processo GMAW. Figura 6.12.

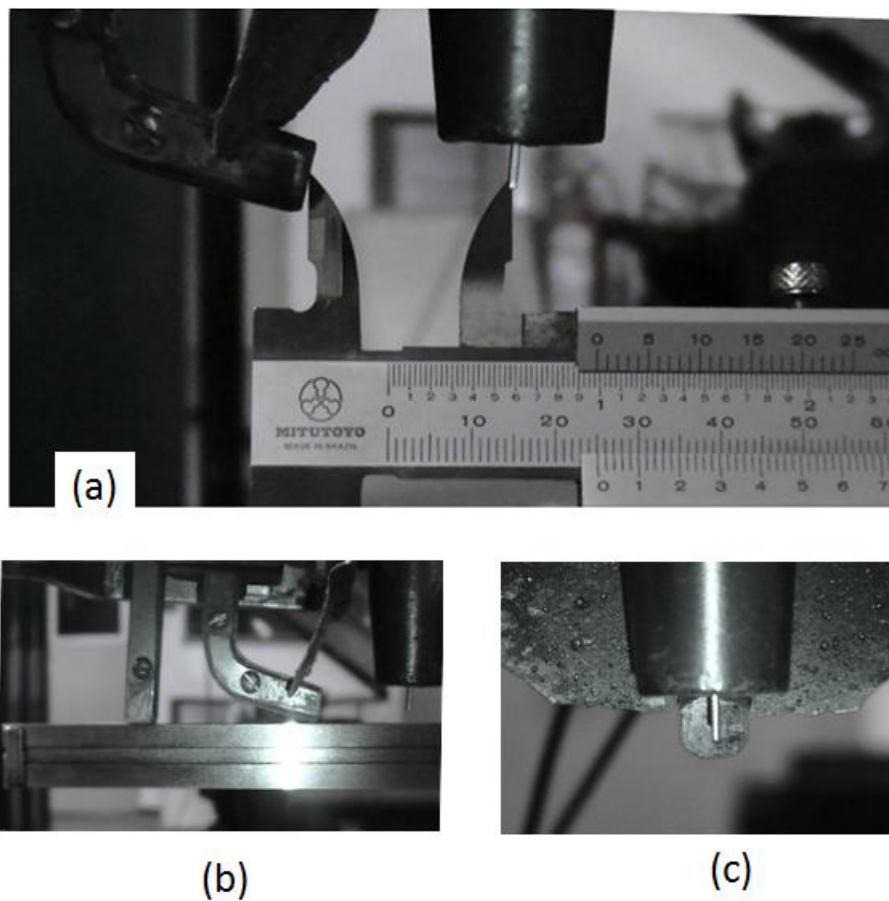


Figura 6.12: Posicionamento, alinhamento e distância eficaz da bobina. (a) do núcleo ao centro da tocha, (b) alinhamento, (c) centralização. Processo GMAW.

6.1.6. Atuação do sistema de oscilação magnética em soldagem sobre chapa utilizando-se o processo GMAW

Soldagens exploratórias com o processo GMAW foram realizadas a fim de se verificar o desempenho do sistema de controle da deflexão do arco elétrico por oscilação magnética nesse processo. Para tanto, utilizaram-se os seguintes parâmetros:

- Tensão elétrica = $22,0 \pm 0,5V$
- Corrente elétrica = $135 \pm 3A$
- Vazão de gás = $14,0 \pm 0,5$ l/m
- Velocidade de deslocamento da tocha = $1,8$ mm/s (incerteza conforme especificação do fabricante do robô MOTOMAN SK 6)
- Posição da tocha = vertical em relação à superfície de soldagem e sem inclinação lateral
- Distância do bico de contato até a peça = $22,0 \pm 0,5$ mm, da face inferior do bico de contato até a superfície da chapa.
- Oscilação magnética com onda senoidal simétrica, frequência $0,500 \pm 0,002$ Hz, tensão na bobina de $9,7 \pm 0,2$ V. Medidos no gerador de sinais.
- Gás de proteção = mistura de 75% Ar e 25% CO_2
- Modo de transferência = preferencialmente globular [11]

O processo de soldagem GMAW caracteristicamente apresenta arco elétrico mais turbulento. Este efeito é consequência do dinamismo da fusão do arame (metal de adição) formando gotas durante a alimentação contínua, pequenas flutuações da corrente ou tensão elétricas, deslocamento da tocha ao longo da direção de soldagem, transferência de metal dentro do arco, forças atuantes em função do jato de plasma, enfim, uma somatória de fatores que fazem com que o arco elétrico GMAW não se comporte similarmente a um arco GTAW. Sendo assim, os primeiros cordões de solda foram realizados sobre chapa na posição plana e a Figura 6.13 apresenta alguns quadros da filmagem realizada durante a soldagem.

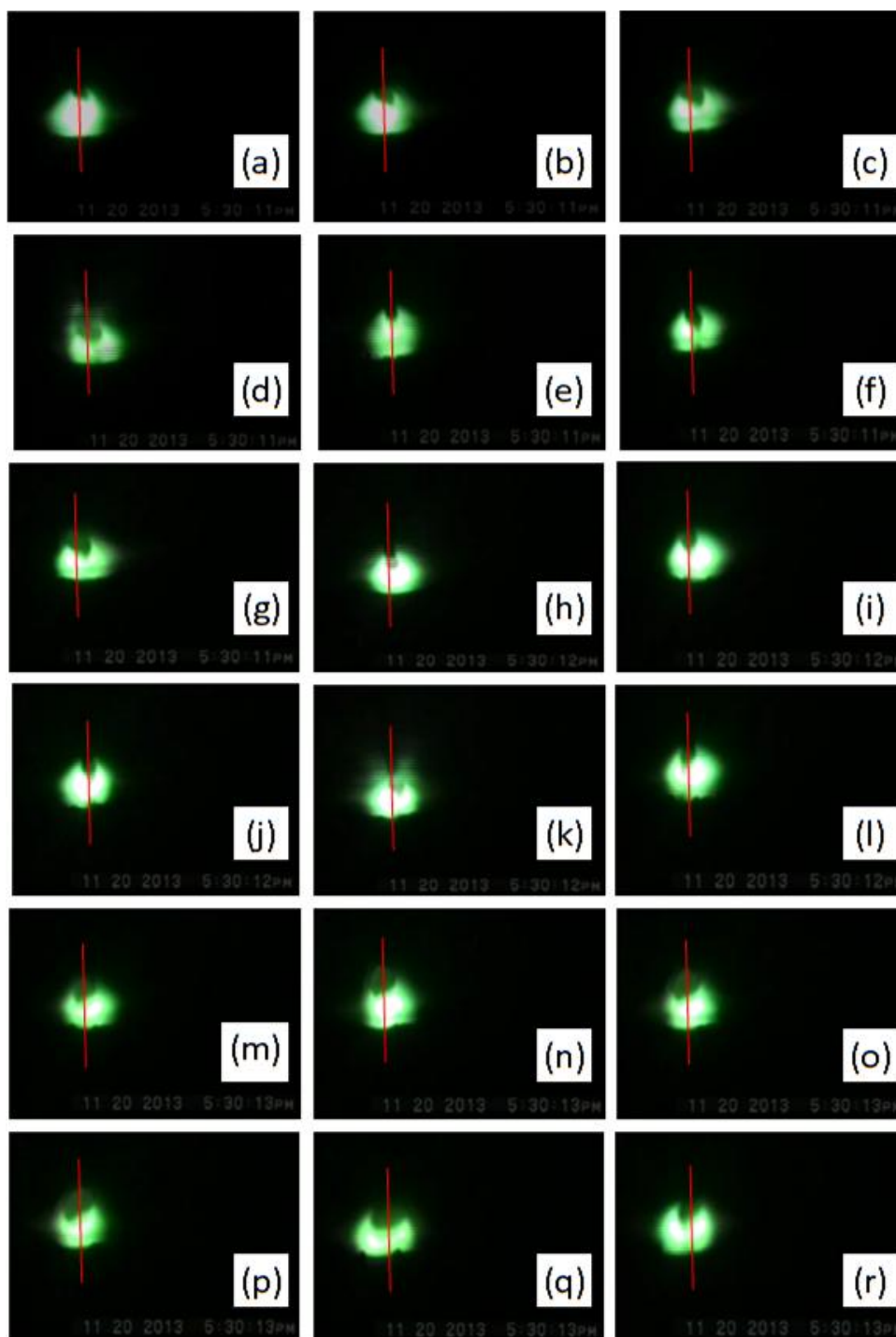


Figura 6.13: Fotos obtidas a partir da filmagem da atuação do oscilador magnético. Intervalo de 3 segundos.

Na Figura 6.13 pode-se observar que muitas vezes a gota de metal líquido tende a acompanhar o movimento do arco. A linha vertical traçada no centro geométrico do arame facilita a visualização das oscilações.

Isto indica que quando o arco está deslocado para um lado, parece que a gota de metal tende a acompanhá-lo e, portanto, formas de onda que mantêm o arco deslocado numa direção parecem favorecer também a deposição de metal mais naquela direção que no centro do chanfro.

Na sequência, executaram-se vários cordões de solda sobre chapa com as regulagens citadas no item 6.1.6 variando-se apenas a frequência. Os resultados obtidos podem ser observados nas Figuras 6.14 e 6.15, que apresentam as características de três cordões em particular. Genericamente, para esta etapa do trabalho, adotou-se a nomenclatura de frequência alta para o valor de 1,9Hz e frequência baixa para o valor de 0,5Hz.

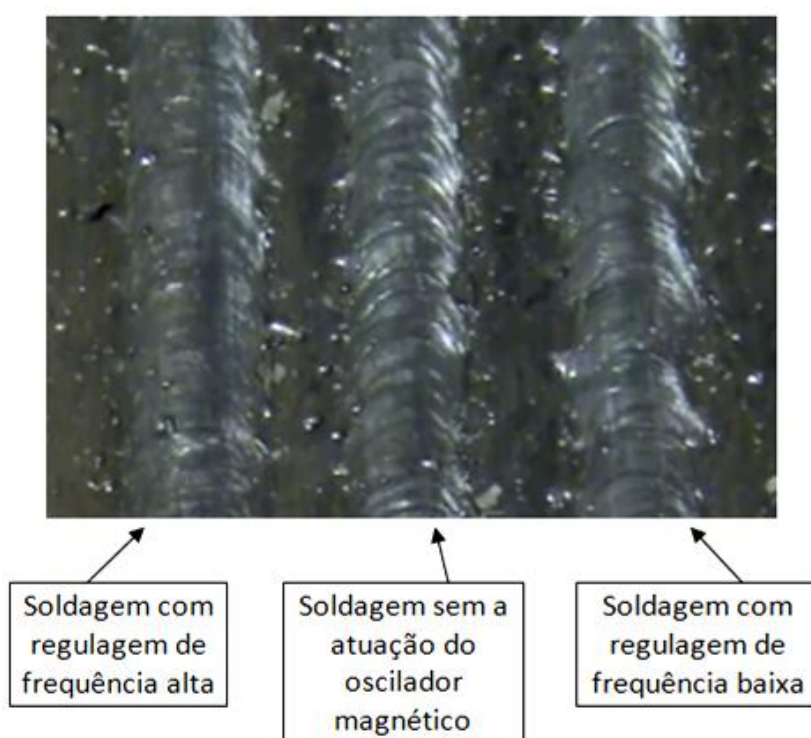


Figura 6.14: Características de três cordões de solda realizados sobre chapa.

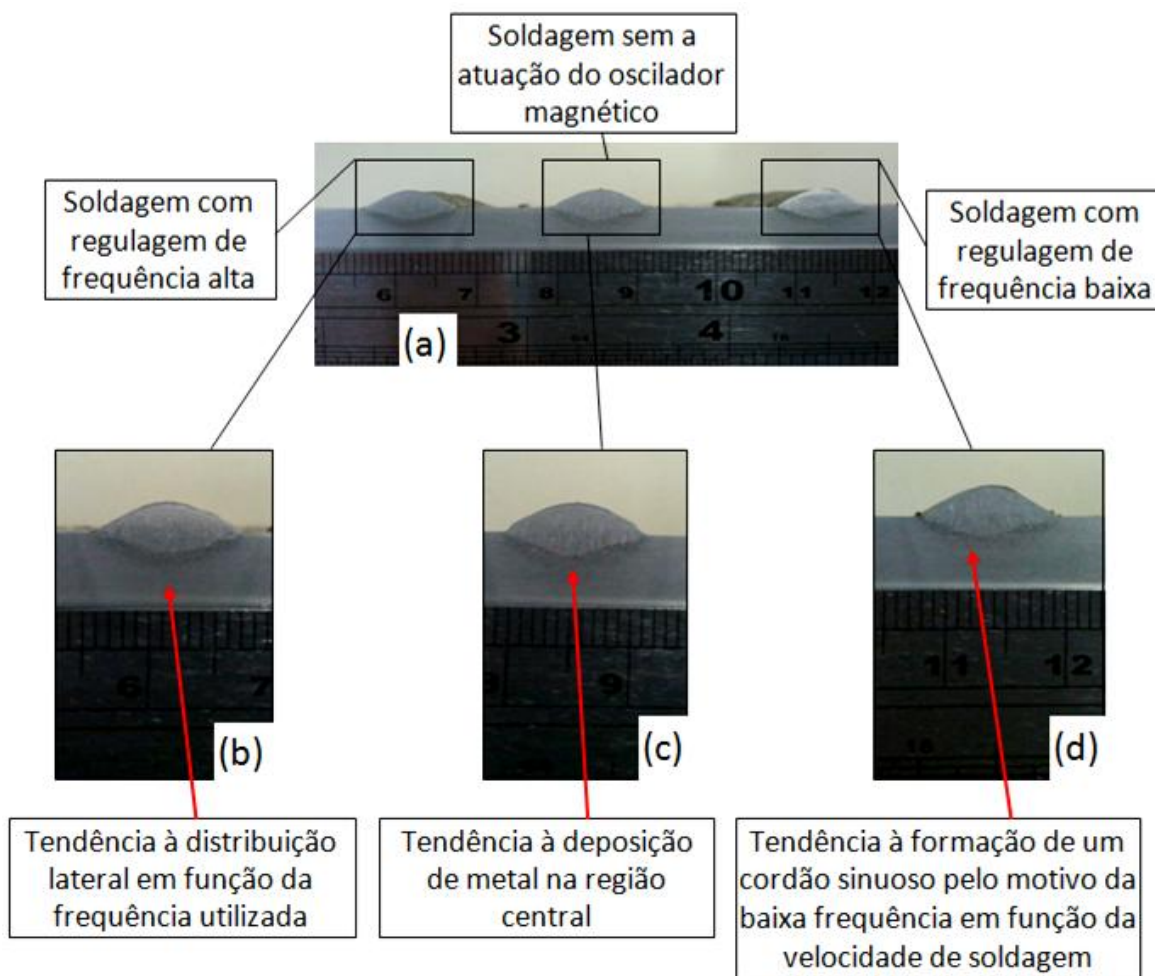


Figura 6.15: Soldagem sobre chapa. (a) vista frontal, (b) cordão sob frequência alta, (c) sem oscilação, (d) cordão sob frequência baixa.

6.1.7. Soldagem exploratória na posição plana, em chanfro, sem a atuação do controle da deflexão do arco elétrico por oscilação magnética. Corpos de prova “sem defeito”

Foram realizados vários experimentos utilizando-se corpos de prova “sem defeito”, com o intuito de encontrar parâmetros adequados para a soldagem do passe de raiz com o máximo de eficiência possível. A Tabela 1 apresenta o histórico destas soldagens.

Tabela 1: Soldagens exploratórias. Ajustagem dos parâmetros.

Tabela 1 - Ajustagem dos parâmetros de soldagem - C.Ps. "sem defeito"									
* Soldagens exploratórias, posição plana, no chanfro - Corpos de prova não marcados									
Parâmetros de soldagem									
Quantidade de C.Ps.	Tensão [V]	Corrente [A]	d.b.c.p. [mm]	Velocidade de soldagem [mm/s]	Gás de proteção	Vazão do gás [l/min]	Resultado		
2	20,5	190	16	2,5		18 l/min	Furou a raiz		
2	18,8	142	16	2,5			Penetração baixa; excesso de respingos; alguma porosidade sobre o cordão		
2	18,8	160	16	2,5			Penetração média; excesso de respingos; alguma porosidade sobre o cordão		
2	18,8	173	16	2,5					
1	18,8	173	16	1,7					
1	18,8	185	16	1,7		17 l/min	Furou a raiz; não está sendo possível visualizar a atuação do oscilador		
2	18,8	185	16	2,5					
2	18,8	193	18	2,5					
1	20,3	190	18	2,5	75%Ar 25%CO ₂	16 l/min	Furou a raiz; não está sendo possível visualizar a atuação do oscilador		
1	20,3	200	13	2,5			Penetração alta; cordão com boa aparência superficial		
2	20,3	185	20	2,5			Penetração alta; cordão com boa aparência superficial		
1	20,3	180	21	2,5			Penetração alta; cordão com boa aparência superficial		
2	21	170	22	2,2			Penetração alta; cordão com boa aparência superficial; é possível visualizar a oscilação do arco		
2	22	160	23	1,8		15 l/min	Penetração alta; cordão com boa aparência superficial; é possível visualizar a oscilação do arco		
1	23	150	24	1,7			Penetração média; cordão com boa aparência superficial; é possível visualizar a oscilação do arco		
2	24	140	25	1,6		14 l/min	Penetração boa; cordão com boa aparência superficial; é possível visualizar a oscilação do arco		
2	25	142	25	1,5			Penetração boa; cordão com boa aparência superficial; é possível visualizar a oscilação do arco		

Após estas 28 soldagens, foi possível comprovar a grande dificuldade para se obter uma situação única capaz de oferecer condições ideais para a execução do passe de raiz. Este procedimento pretendeu obter cordões de solda adequados sem o controle da oscilação na região “sem defeito” e desta forma, restringir a atuação do oscilador magnético somente na região “com defeito”.

As imagens da Figura 6.17 foram produzidas a partir da filmagem que registrou uma das soldagens. Para tanto, utilizou-se a filmadora descrita no item 4.5 com capacidade de 30 quadros por segundo.

Torna-se importante ressaltar que, sem a utilização da oscilação magnética o arco não sai de dentro do chanfro, mesmo com o dinamismo natural deste (item 6.1.6).

Realizando-se mais alguns poucos experimentos, chegou-se aos parâmetros descritos abaixo e estes foram os adotados para a realização do passe de raiz.

- Tensão elétrica = $25,5 \pm 0,5V$
- Corrente elétrica = $142 \pm 3A$
- Vazão de gás = $14,0 \pm 0,5 \text{ l/m}$
- Velocidade de deslocamento da tocha = $1,5 \text{ mm/s}$ (incerteza conforme especificação do fabricante do robô MOTOMAN SK 6)
- Posição da tocha = perpendicular em relação à superfície de soldagem e sem inclinação lateral
- Distância do bico de contato até a peça = $26,0 \pm 0,5\text{mm}$. Figura 6.16.
- Gás de proteção = mistura de 75% Ar e 25% CO_2
- Modo de transferência = preferencialmente globular [11]

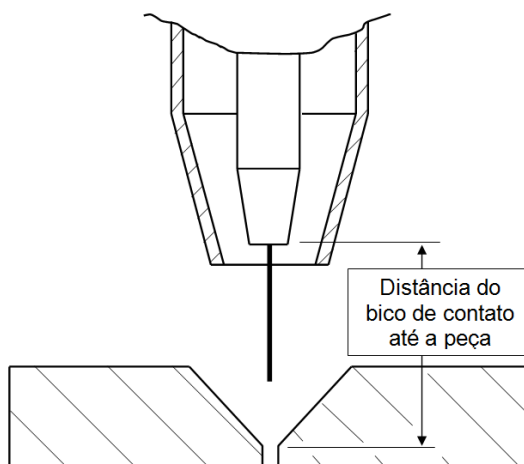


Figura 6.16: Referência para medição do bico de contato até a peça.

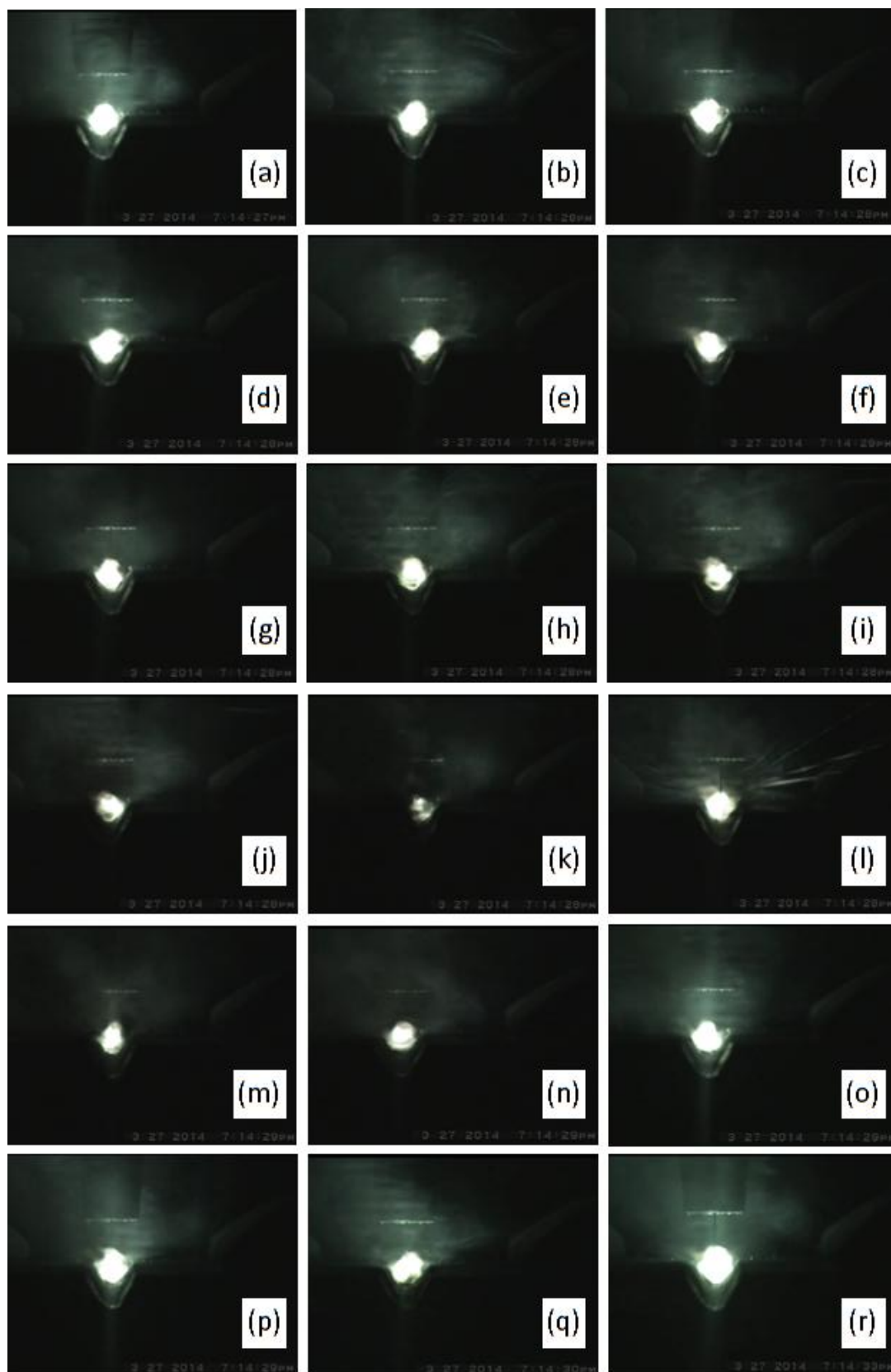


Figura 6.17: Fotos sem a atuação da oscilação magnética. De (a) até (r) intervalo de tempo: aproximadamente 6 segundos.

6.1.8. Soldagem exploratória na posição plana, em chanfro, com a utilização de oscilação magnética em corpos de prova “sem defeito”

Nesta etapa, foram efetuadas soldagens dentro de um chanfro, utilizando-se o processo GMAW com deflexão do arco por oscilação magnética.

Os experimentos realizados mostram que o arco elétrico desloca-se de um lado para o outro na região abaixo do bico de contato (onde ocorre a fusão do arame eletrodo).

A regulagem dos parâmetros para a soldagem foi a seguinte:

- Tensão elétrica = $25,5 \pm 0,5V$
- Corrente elétrica = $142 \pm 3A$
- Vazão de gás = $14,0 \pm 0,5$ l/m
- Velocidade de deslocamento da tocha = $1,5$ mm/s (incerteza conforme especificação do fabricante do robô de soldagem MOTOMAN SK 6)
- Posição da tocha = vertical em relação à superfície de soldagem e sem inclinação lateral
- Distância entre o bico de contato e a peça = $26,0 \pm 0,5$ mm
- Oscilação magnética com onda senoidal simétrica, frequência $0,5$ Hz, amplitude $9,7V$
- Gás de proteção = mistura de 75% Ar e 25% CO_2
- Modo de transferência = preferencialmente globular [11]

A Figura 6.18 foi obtida a partir de filmagem e mostra a atuação do sistema de oscilação magnética em intervalos de tempo onde nota-se o arco deslocado ora de um lado ora de outro.

Pode-se observar que quando a solda foi feita com uso de oscilação magnética nas condições indicadas, o deslocamento do arco é intenso e parte deste parece atuar fora do chanfro.

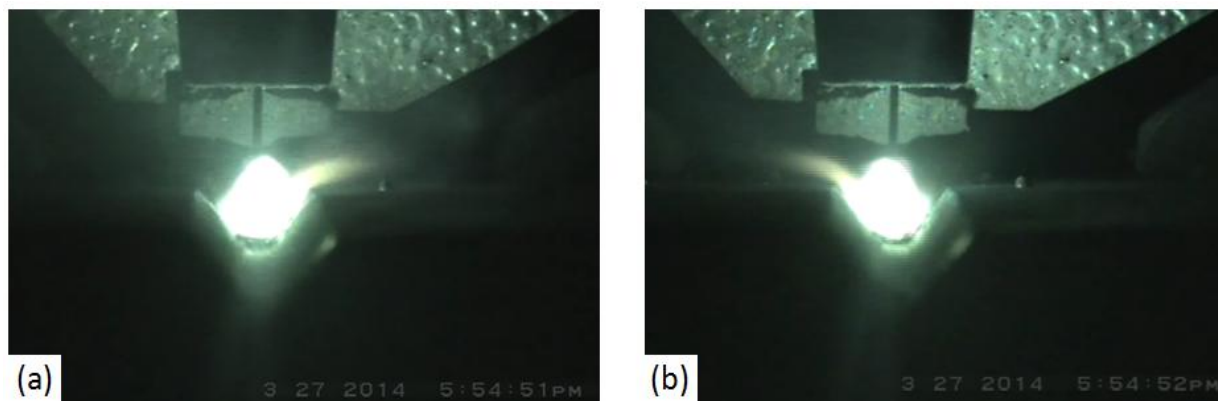


Figura 6.18: Atuação do oscilador magnético dentro do chanfro. (a) arco deslocado para a direita, (b) arco deslocado para a esquerda.

6.2. Experimentos quantitativos em corpos de prova “com defeito”

Utilizando-se os parâmetros e regulagens do item 6.1.8 foram executadas as soldagens do passe de raiz com a pretensão de completar a soldagem por todo o comprimento dos corpos de prova. Como padrão, os cordões iniciaram na região “sem defeito” e os experimentos mantiveram fixos todos os parâmetros de soldagem que foram feitas sem e com a atuação do oscilador magnético.

A forma como foram confeccionados, combinados e montados os corpos de prova, permitiu que o sistema oscilador magnético atuasse ou não ao longo da soldagem, pois, era possível ligar ou desligá-lo, fazer alterações tais como forma de onda, frequência e amplitude, antes ou dentro do defeito.

A Tabela 2 foi montada após a obtenção de resultados significativos, apresenta as características da atuação ou não da oscilação e também aponta em qual região foi aplicada.

Tabela 2: Resultados quantitativos conforme a atuação ou não da oscilação

Tabela 2 - Análise quantitativa												
* Soldagens exploratórias que representaram resultados satisfatórios - Corpos de prova não marcados												
Parâmetros da soldagem	Quantidade de C.Ps.	Oscilação região "sem defeito"			Resultado na região "com defeito"			Oscilação região "com defeito"			Resultado na região "com defeito"	
		Forma de onda	Frequência [Hz]	Tensão na bobina [V]	"sem defeito"	"com defeito"	Forma de onda	Frequência [Hz]	Tensão na bobina [V]	"sem defeito"	"com defeito"	
Tensão = $25,5 \pm 0,5V$ Corrente = $142 \pm 3A$ Vazão de gás = $14,0 \pm 0,5$ l/min Velocidade da soldagem = $1,5$ mm/s d.b.c.p. = $26,0 \pm 0,5$ mm Gás de proteção = 75% Ar ; 25% CO ₂	4	sem oscilação	sem oscilação	sem oscilação	1 completou	1 não completou	/////	/////	/////	/////	/////	
					2 não completaram	2 não completaram						
					1 completou	1 completou						
					25% de aprovação							
	3	Senoidal; Simétrica	1,5	9,7	1 completou	1 não completou	/////	/////	/////	/////	/////	
					2 completaram	2 completaram						
					66,66% de aprovação							
	2	Senoidal; Simétrica	1,5	9,7	2 completaram	/////	Quadrada; 90% do período à direita	0,5	9,7	/////	2 completaram o defeito à direita	
					100% de aprovação							
	2	Senoidal; Simétrica	1,5	9,7	2 completaram	/////	Quadrada; 90% do período à esquerda	0,5	9,7	/////	2 completaram o defeito à esquerda	
					100% de aprovação							

Em todos os experimentos, o arame eletrodo foi posicionado no centro da menor distância entre os narizes das peças (região “sem defeito”). Fez-se com que os desvios provocados pelo *cast* e *helix* ficassem alinhados longitudinalmente com o afastamento entre as peças. Pode-se notar na Figura 6.19 que: (a) representa a curvatura do arame ora localizado sobre o chanfro à direita, ora na face oposta. Este efeito não foi permitido durante as soldagens; (b) arame eletrodo alinhado com a direção da soldagem; (c) vista inferior com o arame no centro da menor distância entre as peças; (d) vista inferior mantendo-se o centro da menor distância entre as peças.

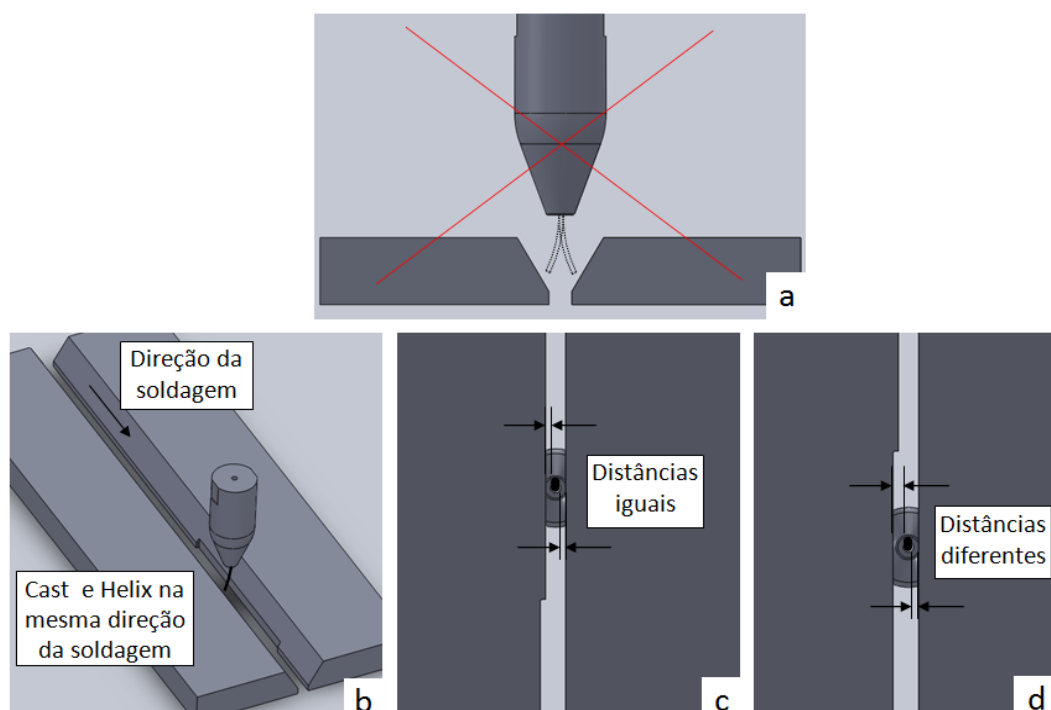


Figura 6.19: Alinhamento do arame eletrodo referente ao chanfro.

6.2.1. Resultado das soldagens, sem e com oscilação magnética

A Tabela 2 informa que sem a atuação da oscilação magnética, soldagens dentro de chanfros nas regiões “sem e com defeito”, podem ou não ser bem sucedidas ao longo de toda extensão; dos quatro cordões executados sem oscilação, dois deles furaram a raiz ainda na região “sem defeito”, um passou pela região “sem defeito”, porém, furou a raiz na região “com defeito” e um completou toda a extensão do corpo de prova. Quantitativamente o resultado foi de 25% de aprovação.

A Figura 6.20 apresenta as vistas, superior e inferior de uma peça soldada, evidenciando a característica do cordão de solda feito sem o uso de oscilação magnética, que furou a raiz ainda na região “sem defeito” e interrompeu a soldagem.

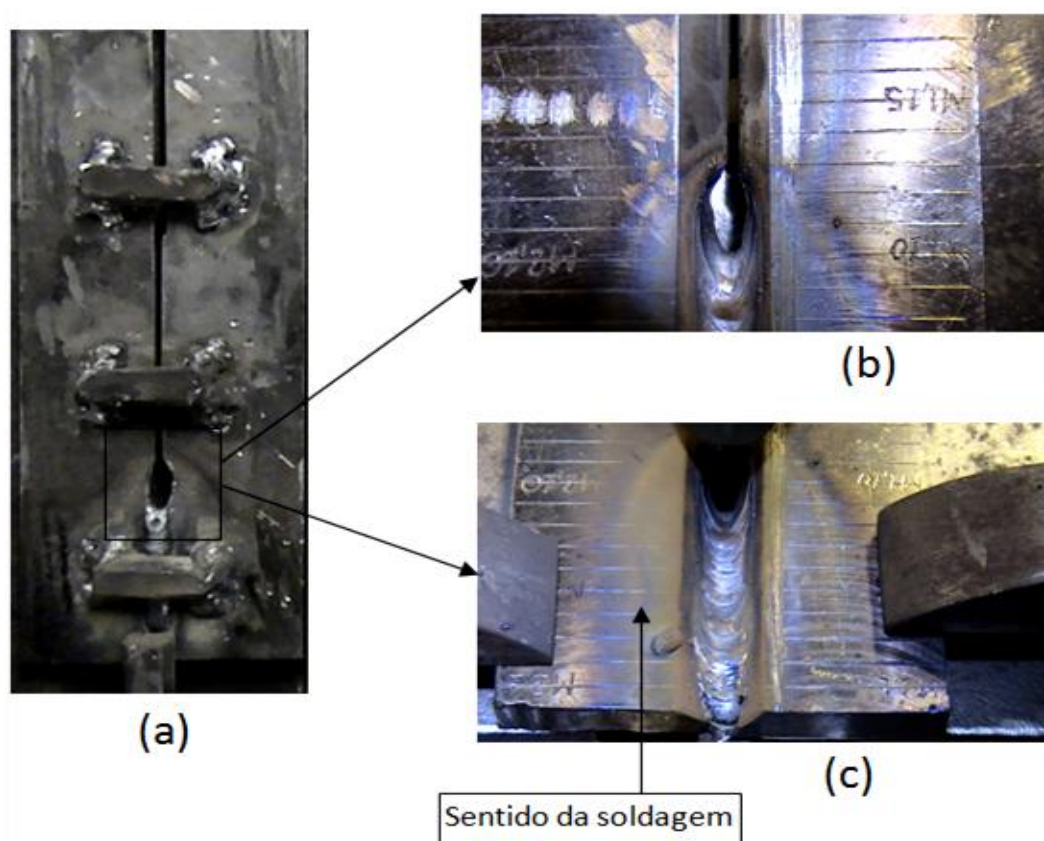


Figura 6.20: Soldagem na região “sem defeito” e não utilizando a oscilação magnética. (a) vista inferior, (b) e (c) vista superior.

A Figura 6.21 apresenta as vistas, superior e inferior de um corpo de prova “sem defeito”, evidenciando as características dos cordões de solda sem a atuação do sistema de controle da oscilação magnética onde um cordão de solda obteve sucesso ao longo de toda extensão do corpo de prova.

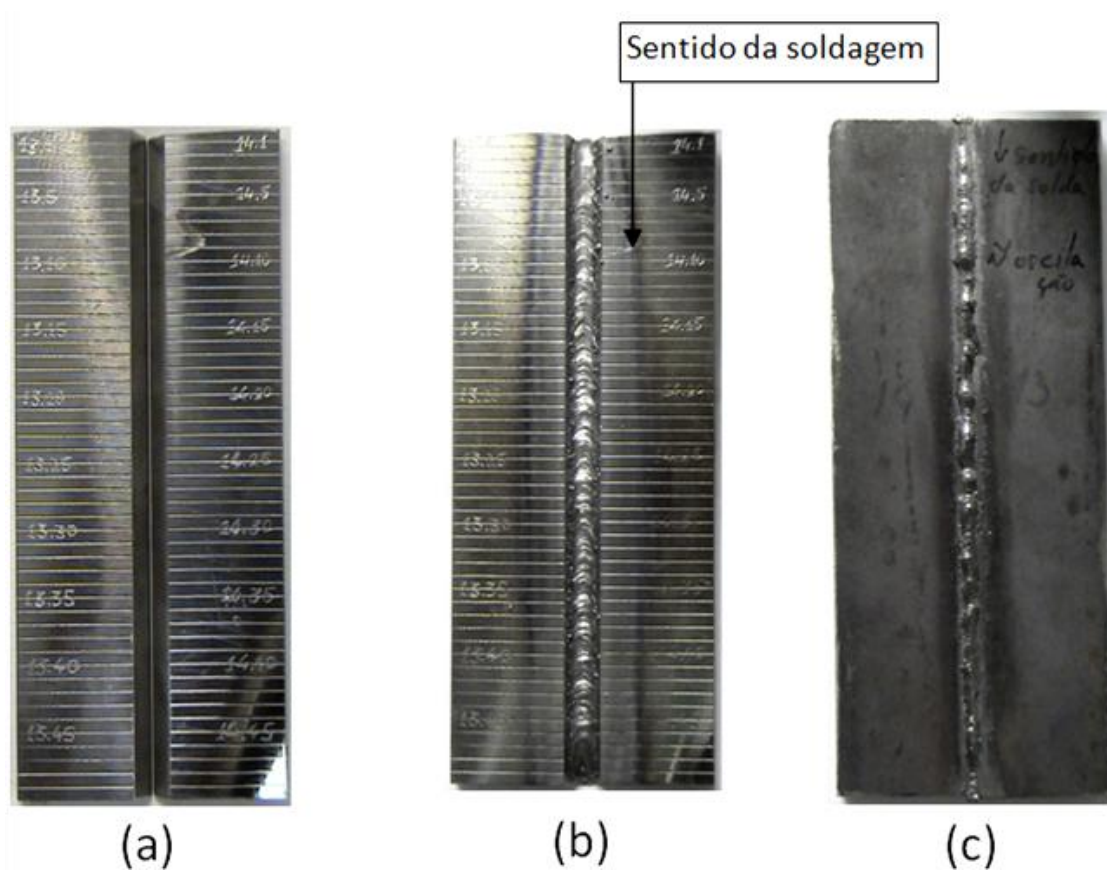


Figura 6.21: Corpo de prova “sem defeito”, soldagem não utilizando a oscilação magnética. (a) preparação; (b) cordão de solda; (c) vista inferior, cordão de solda no passe de raiz.

A Figura 6.22 apresenta as vistas, superior e inferior, de um corpo de prova soldado sem oscilação magnética onde nota-se que a raiz furo na região “com defeito”. Nesta condição, das duas soldagens que passaram pela região “sem defeito”, apenas uma não furo o passe de raiz.

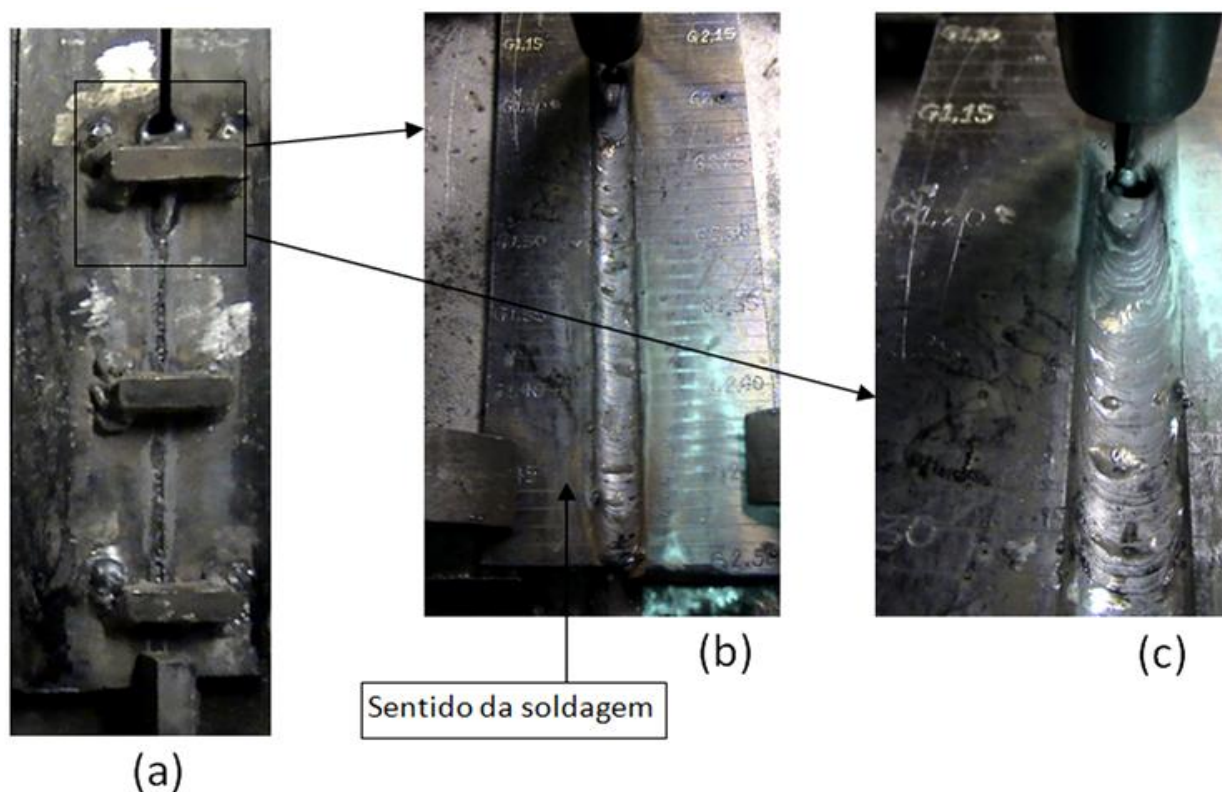


Figura 6.22: Soldagem na região “com defeito” sem a utilização da oscilação magnética. (a) vista inferior da região “com defeito”, (b) e (c) vista superior.

Pode-se observar na Tabela 2 que ao se utilizar os recursos da oscilação magnética e parâmetros conforme os anteriores (item 6.1.8), todas as três soldagens nas regiões “sem defeito” obtiveram êxito, ou seja, 100% de aprovação. Ainda nestas condições, houve sucesso em duas entre as três soldagens realizadas na região “com defeito”, ou seja, aprovação de aproximadamente 66,66%.

Ainda em caráter exploratório, executaram-se mais cordões de solda utilizando o recurso da regulagem da frequência, amplitude e escolha do tipo de onda gerada. A partir dos resultados obtidos, foi possível chegar a uma combinação onde a soldagem completou toda a extensão dos corpos de prova (regiões “sem e com defeito”).

Sendo assim, chegou-se à execução dos quatro últimos cordões de solda apresentado na Tabela 2. Pode-se notar que estes completaram a soldagem sendo dois com região de defeito à esquerda e outros dois à direita.

Durante a execução das soldagens, percebeu-se que cada condição de preparação de união de peças para o passe de raiz, necessita de uma regulagem específica. Outras disponíveis no equipamento de soldagem, tais como tensão e corrente elétricas, distância entre bico de contato e peça, velocidade de deslocamento da tocha de soldagem, também são relevantes. Em suma, este trabalho limitou-se então, a apresentar uma forma de controlar a movimentação do arco elétrico por oscilação magnética capaz de executar o preenchimento do passe de raiz, porém, não foi possível conseguir a condição ótima para todas as situações devido à quantidade de variáveis envolvidas no processo.

Para se confirmar os resultados da etapa anterior, foram repetidas as sete condições de soldagem com resultado favorável, indicadas na Tabela 3. Estes corpos de prova foram utilizados na análise da geometria do cordão, como será apresentado a seguir. Os resultados obtidos foram os mesmos da etapa anterior.

Tabela 3: Parâmetros de soldagem e oscilação para as soldagens controladas

Tabela 3 - Análise quantitativa							
* Soldagens controladas em corpos de prova marcados - Resultados somente na região "com defeito"							
Parâmetros da soldagem	Denominação	Oscilação			Localização do defeito		Número de cortes em cada CP, na região "com defeito"
		Forma de onda	Frequência [Hz]	Tensão na bobina [V]	à direita	à esquerda	
Tensão = 25,5 ± 0,5V Corrente = 142 ± 3A Vazão de gás = 14,0 ± 0,5 l/min Velocidade da soldagem = 1,5 mm/s d.b.c.p. = 26,0 ± 0,5mm Gás de proteção = 75% Ar ; 25% CO2	CP B2xB1	Senoidal; simétrica	1,5	9,7	////	sim	4
	CP BA2xBA1				sim	////	
	CP D2xD1				////	sim	
	CP O1xO2	sem oscilação	sem oscilação	sem oscilação	////	sim	
	CP N1xN2				sim	////	
	CP P2xP1	Quadrada; 90% do período à direita	0,5	9,7	sim	////	
	CP I 1xI 2	Quadrada; 90% do período à esquerda	0,5	9,7	////	sim	

Desses corpos de prova foram feitas análise de pelo menos quatro seções de cada região, isto é, "com e sem defeito".

A Figura 6.23 apresenta: (a) corpo de prova B2xB1, (b) vista inferior do corpo de prova B2xB1 na região “com defeito” à esquerda do sentido de soldagem, (c) corpo de prova BA2xBA1, (d) vista inferior do corpo de prova BA2xBA1 na região “com defeito” à direita do sentido de soldagem.

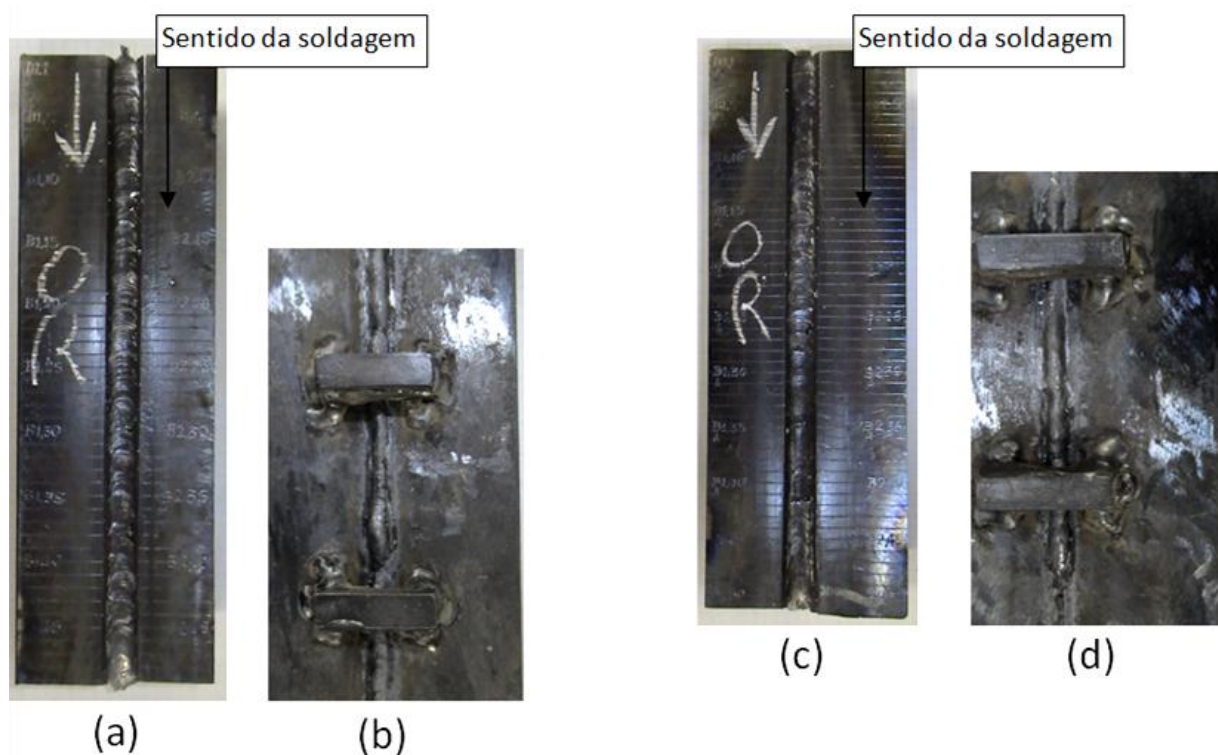


Figura 6.23: Soldagens que obtiveram sucesso nas regiões “sem e com defeito”.

Observar a característica da raiz na região “com defeito” (Figura 6.23(b), Figura 6.23(d)) que possui aparência mais uniforme comparando-se com a raiz executada sem a atuação da oscilação magnética, Figura 6.21(c).

As condições de oscilação que resultaram em passe de raiz sem furo foram diferentes na região “sem defeito” e “com defeito”, mantidos constantes os outros parâmetros de soldagem. Do ponto de vista de facilidade de fabricação, esse não é o resultado mais desejável, contudo indica que o uso de oscilação magnética pode contribuir de forma decisiva para evitar furos no passe de raiz.

6.2.2. Macrografias das soldas, sem e com a atuação do sistema controlador da deflexão do arco elétrico por oscilação magnética

Após a execução das soldagens do passe de raiz nos corpos de prova, mostrados na Tabela 3, foram realizados os cortes transversais nas uniões e efetuou-se macrografias (ataque químico com Nital 5%) a fim de serem verificadas as características particulares da seção de cada cordão (sem e com a atuação da oscilação magnética com defeito à esquerda ou à direita do sentido de soldagem).

As análises macrográficas foram realizadas nas superfícies cortadas transversalmente seguindo-se as marcações presentes na face dos corpos de prova. A Figura 6.24 exemplifica o mapeamento dos cortes em alguns corpos de prova.

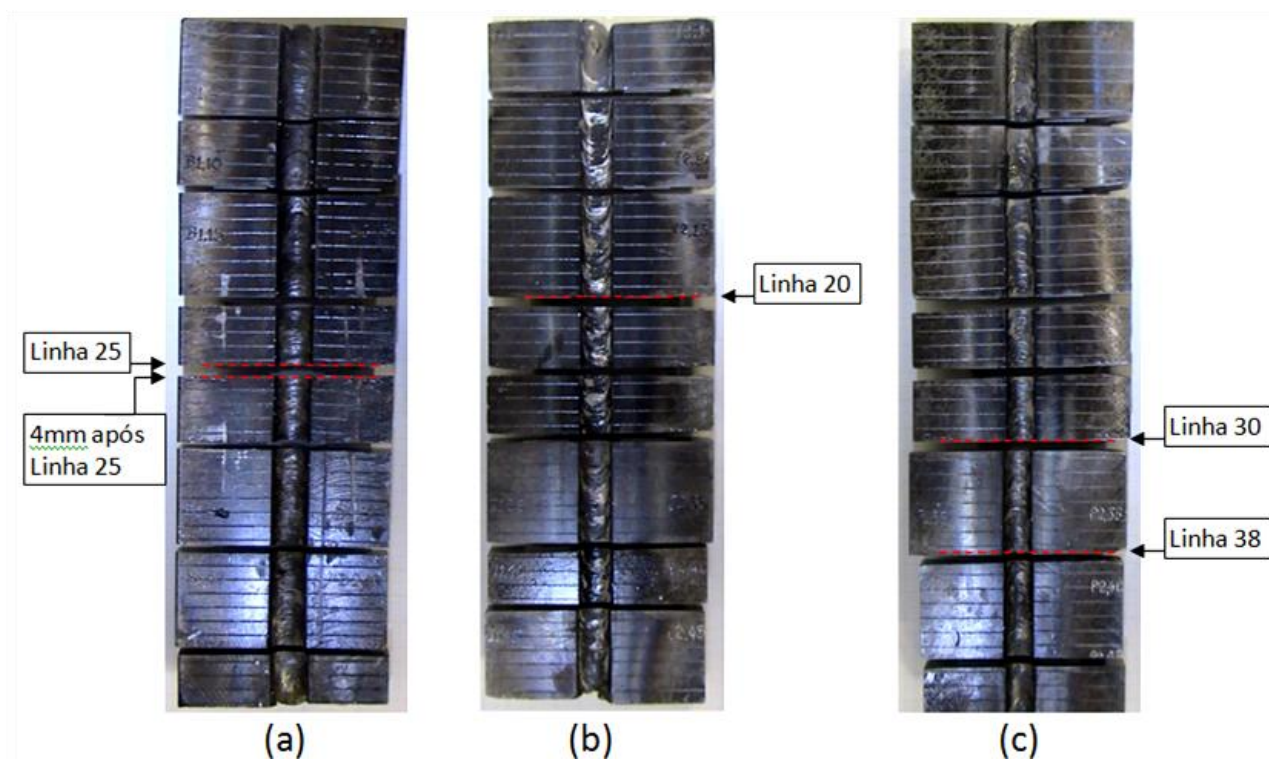


Figura 6.24: Mapa dos cortes nos corpos de prova. (a) B2xB1, (b) I1xI2, (c) P2xP1.

As macrografias a seguir apresentam os formatos característicos das soldas efetuadas conforme a atuação ou não da oscilação magnética. Estas também informam sobre a localização do corte estar na região sem ou com defeito.

Desde a Figura 6.25 até a Figura 6.32, apresenta-se a montagem de mosaicos montados a partir de micrografias que foram obtidas onde cada quadro que compõe o conjunto é uma fotografia ampliada 25 vezes tirada em um microscópio óptico. Isto foi feito para se localizar com precisão a linha de fusão e permitir traçar, em cada solda, a geometria inicial, após a preparação do chanfro. As marcações em vermelho indicam a linha de fusão entre o metal de base e o metal de solda e as marcações em preto indicam o prolongamento das faces dos chanfros dos corpos de prova.

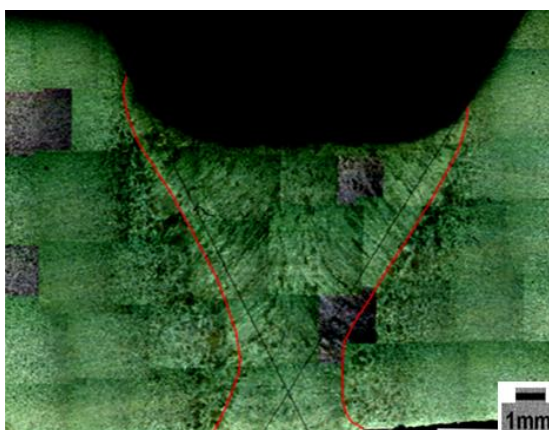


Figura 6.25: Corpo de prova O1xO2, sem uso de oscilação, região “com defeito”, lado esquerdo.

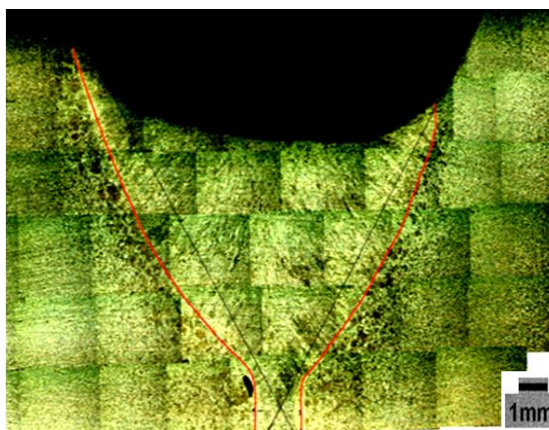


Figura 6.26: Corpo de prova O1xO2, sem uso de oscilação, região “sem defeito”.

A Figura 6.25, mostra o corte transversal no CP O1xO2 (corte a quatro milímetros após a linha 5, sem controle da oscilação e região “com defeito”, lado esquerdo). A Figura 6.26, também do CP O1xO2 (corte a quatro milímetros após a linha 38, sem controle da oscilação e região “sem defeito”). Analisando-se estas macrografias isoladamente, percebe-se que sem oscilação, o metal de solda apresenta ligeira tendência a maior penetração lateral na região “sem defeito”. Isto não garante este efeito em toda a extensão do cordão.

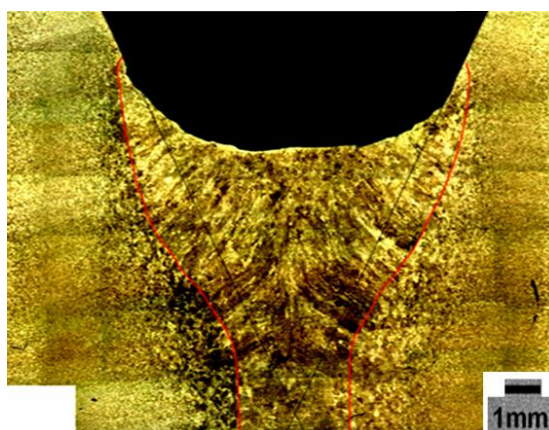


Figura 6.27: Corpo de prova D2xD1, com uso de oscilação, região “com defeito”, lado esquerdo.

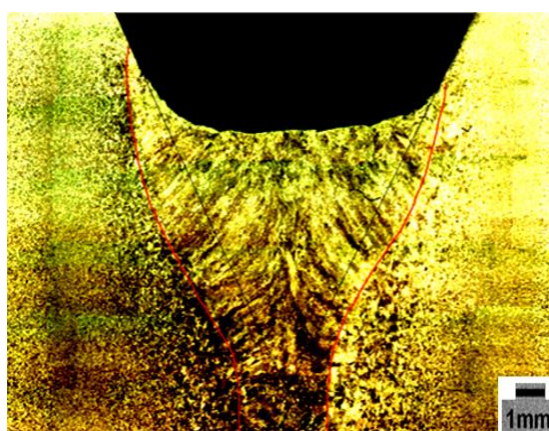


Figura 6.28: Corpo de prova D2xD1, com uso de oscilação, região “com defeito”, lado esquerdo.

Comparando-se as macrografias das Figuras 6.27 e 6.28 (ambas com o uso do controle da oscilação, forma de onda senoidal, simétrica, frequência 1,5Hz, região “com defeito”, lado esquerdo), nota-se que são bastante parecidas mostrando que esse tipo de oscilação tem grande potencial para ser usado em toda a extensão do passe de raiz, levando a soldas satisfatórias em regiões “sem e com defeito”. Contudo, a penetração nas regiões “sem e com defeito” foram diferentes.

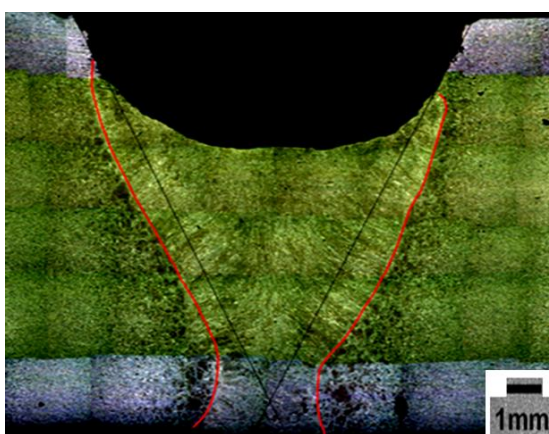


Figura 6.29: Corpo de prova I1xI2, corte a quatro milímetros após a linha 20, com uso de oscilação, forma de onda quadrada, 90% do período à esquerda, frequência 0,5Hz, região “com defeito”, lado esquerdo.

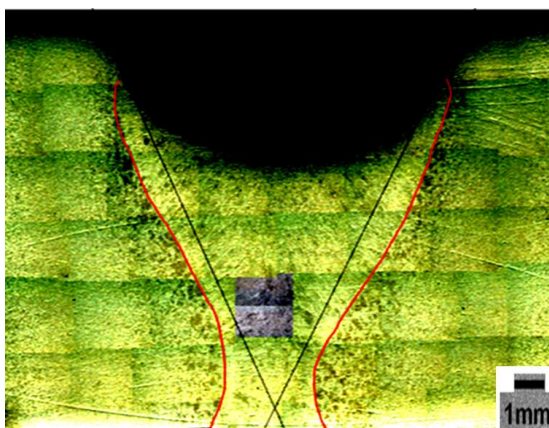


Figura 6.30: Macrografia no corpo de prova I1xI2, corte na linha 20, com uso de oscilação, forma de onda quadrada, 90% do período à esquerda, frequência 0,5Hz, região “com defeito”, lado esquerdo.

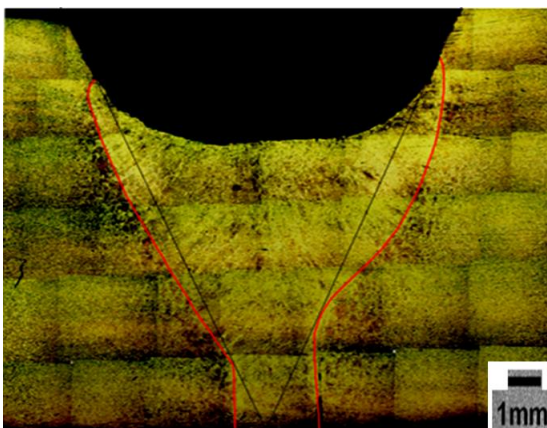


Figura 6.31: Corpo de prova P2xP1, com uso de oscilação, corte na linha 30, forma de onda quadrada, 90% do período à direita, frequência 0,5Hz, região “com defeito”, lado direito

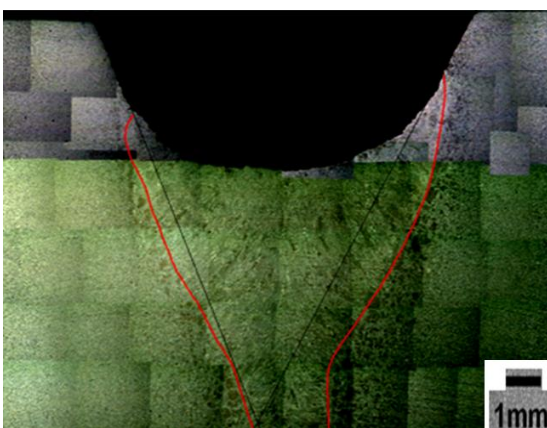


Figura 6.32: Corpo de prova P2xP1, com uso de oscilação, corte na linha 38, forma de onda quadrada, 90% do período à direita, frequência 0,5Hz, região “com defeito”, lado direito

Comparando-se as Figuras 6.29 até 6.32, novamente observa-se que as geometrias das soldas obtidas são bastante parecidas, com uma tendência de se produzir uma penetração lateral ligeiramente maior no lado para o qual o arco se desloca, quando se usa deflexão lateral em 90% do tempo em cada ciclo. Isto indica que este tipo de deflexão apresenta grande potencial no controle do passe de raiz em regiões “com defeito”, contudo o resultado esperado numa região “sem defeito” poderia não ser satisfatório, levando à falta de penetração.

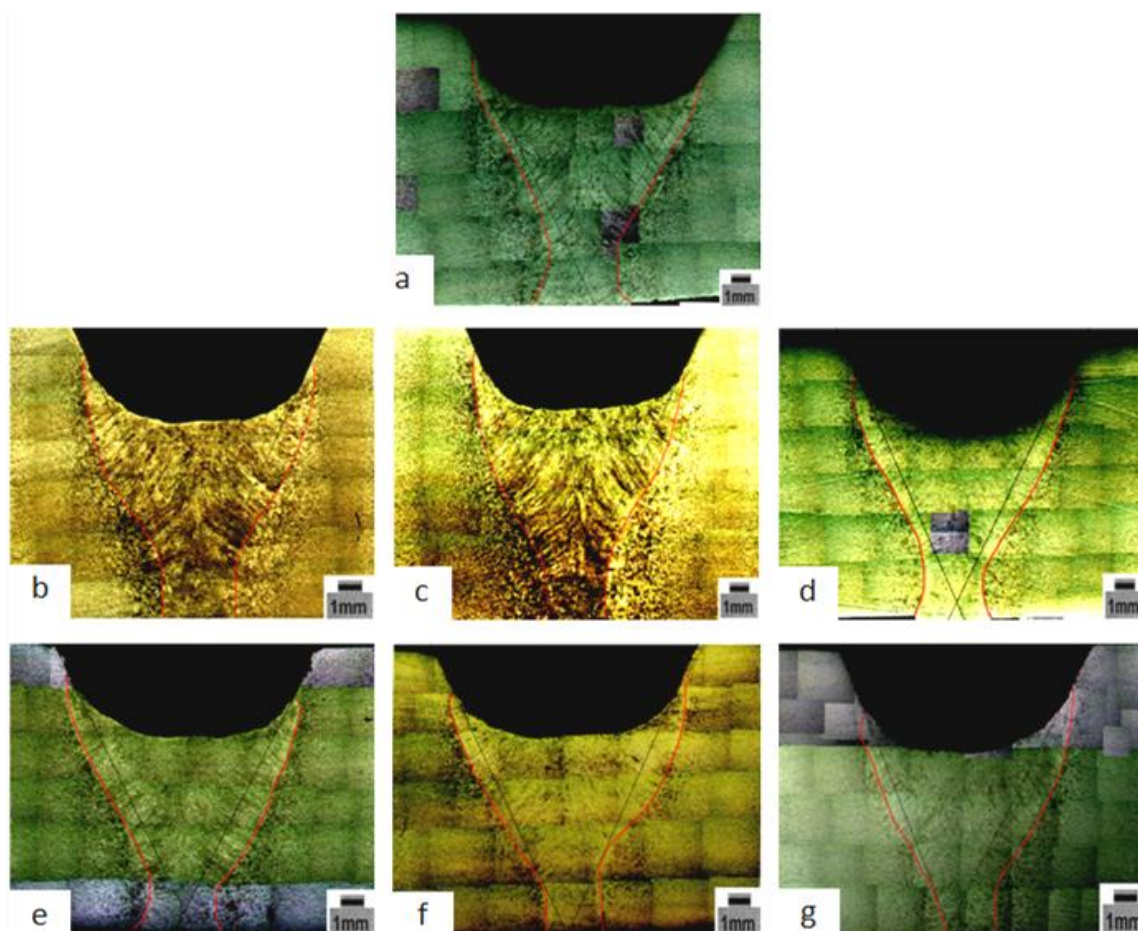


Figura 6.33: Comparações visuais entre cordões que utilizam ou não a oscilação.

Este agrupamento de imagens apresenta as várias condições de soldagem executadas. A Figura 6.33 (a) é a seção transversal de um cordão sem oscilação e todas as demais são cordões onde foram utilizadas a oscilação. Nota-se que a utilização da oscilação magnética do arco favorece maior penetração na lateral do chanfro. A nomenclatura dos corpos de prova e quantidades de macrografias efetuadas estão descritos no item 5.2 e Anexo 10.3.

Para melhor quantificar a deposição de material no passe de raiz em chanfros com o uso de diferentes condições de oscilação magnética do arco foi feita uma determinação do centro de massa dos cordões em cada condição experimental.

6.2.3. Medição e comparação dos cordões de solda executados, sem e com o controle do movimento do arco elétrico por oscilação magnética. Determinação do centro de massa dos cordões em relação a uma referência cartesiana X e Y.

Visualmente é possível notar algumas características nos cordões de solda, porém, partindo-se do princípio de que a interpretação visual depende da experiência e percepção do observador, realizou-se macrografia (ataque químico com Nital 5%) para cada seção transversal dos testes para permitir a quantificação dos deslocamentos laterais e assim confirmá-los.

Traçando-se a linha de fusão e o contorno dos cordões, computacionalmente determinou-se o centro de massa destes com o auxílio de um software de modelamento matemático. Para tanto, foi necessário calibrar o sistema. Para isso desenhou-se o corpo de prova em escala real e realizou-se a sobreposição da imagem fotográfica. Fazendo-se as traçagens conforme mostra a Figura 6.34, ajustou-se a imagem na espessura das linhas de construção com incerteza de $\pm 0,05\text{mm}$. Esta imprecisão não repercutiu em erros significativos para a resolução dos cálculos computacionais.

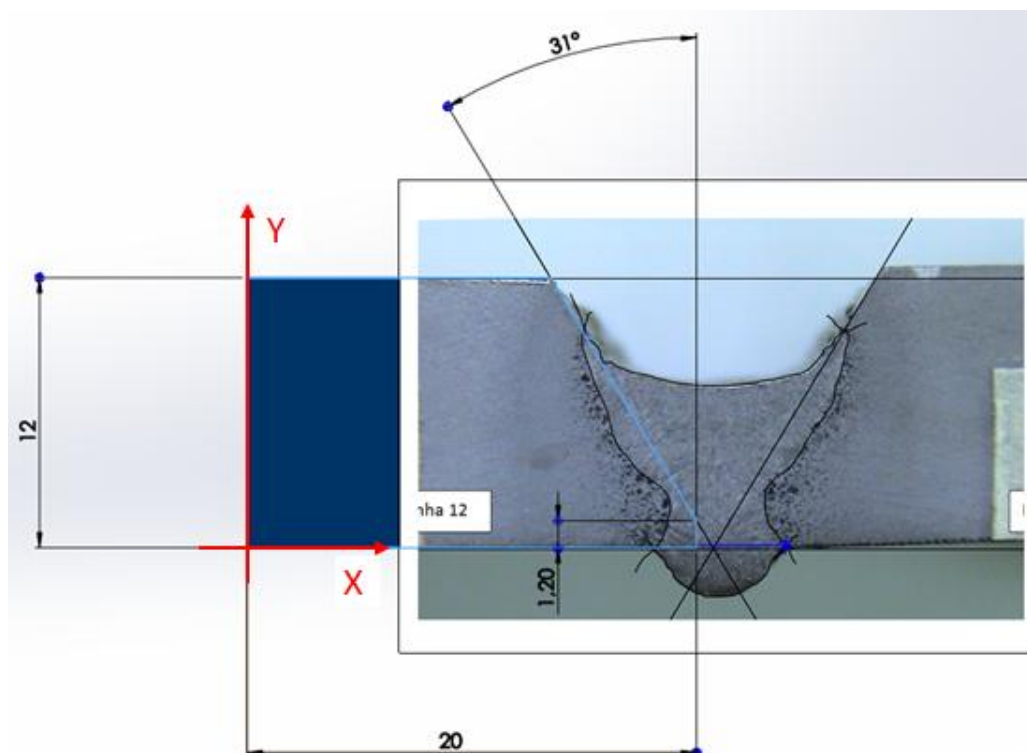


Figura 6.34: Adequação das escalas entre macrografia e modelo computacional.

Estes procedimentos demonstraram que independentemente das características geométricas do cordão, as coordenadas cartesianas “X” e “Y” fornecem valores quantitativos e indicativos da tendência de posição de material mais à esquerda ou mais à direita dentro do chanfro.

Adotando-se as coordenada Y=0mm e X=20mm como referência para o sistema de medição, o metal de solda com seu centro de massa tendendo à direita possui valores de “X” superiores a 20mm e quando são inferiores a 20mm no mesmo eixo, indica a posição do centro de massa tendendo à esquerda. Para o eixo “Y”, valores maiores do que zero indicam cordões com material mais espalhado nas laterais do chanfro e os valores mais próximo de zero indicam cordões concentrados na região inferior deste e, portanto maior penetração da raiz, com acúmulo de material na região inferior à borda inferior da chapa, o que não é desejável. Os valores dos resultados computacionais podem ser vistos nas tabelas do Anexo 10.3.

Importante salientar que estas indicações referem-se aos resultados segundo as regulagens aplicadas neste estudo visando comprovar o controle da movimentação do arco elétrico por oscilação magnética para passe de raiz.

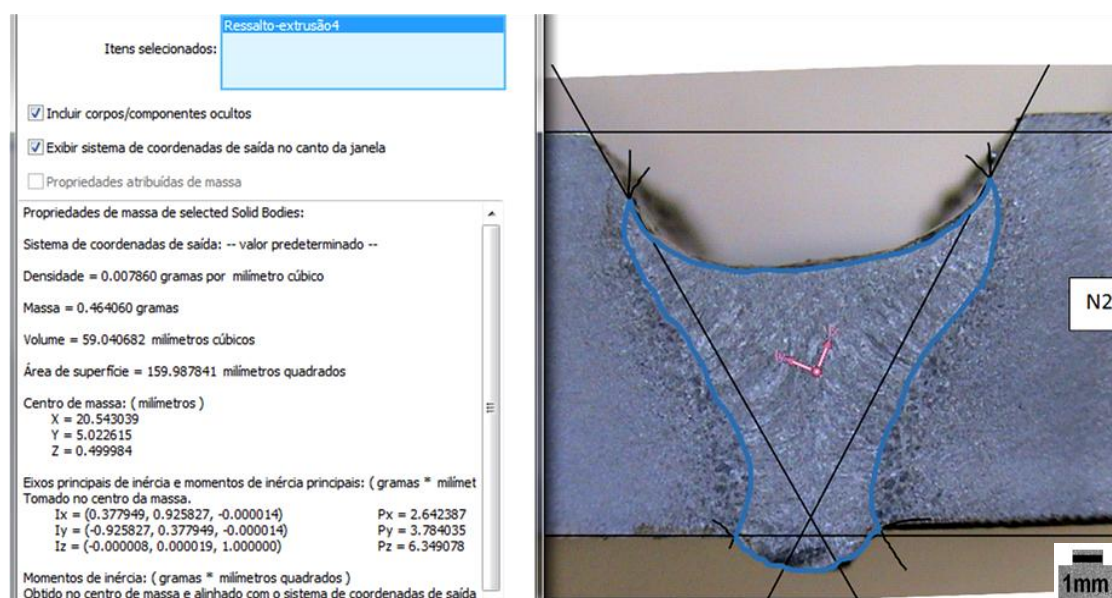


Figura 6.35: Traçagem e resultado dos cálculos para o corpo de prova N1xN2. Corte na linha 38. Sem oscilação magnética. Região “sem defeito”.

A Figura 6.35 apresenta a traçagem completa e o resultado dos cálculos do centro de massa para um cordão de solda. Outros exemplos são apresentados no Anexo 10.4. A tabela que está do lado esquerdo da macrografia apresenta os valores obtidos de centro de massa para este corpo de prova entre outras informações fornecidas pelo *software* usado. Nesta figura, os cálculos computacionais resultaram em $X=20,543039\text{mm}$ e $Y=5,022615\text{mm}$. Os eixos “Ix” e “Iy” que aparecem na região central do cordão de solda na figura resultaram em informações complementares fornecidas pelo *software* utilizado e não devem ser considerados neste trabalho.

A Tabela 4 apresenta um resumo dos resultados computacionais obtidos para os centros de massa dos corpos de prova utilizados para as análises.

Tabela 4: Resumo dos resultados computacionais para os centros de massa.

C.P.	Região "com defeito"		Oscilação	Média	
	esquerda	direita		X	Y
O1xO2	sim	////	////	20,7569	3,1122
N1xN2	////	sim	////	20,1893	3,4140
B2xB1 e D2xD1	sim	////	forma de onda senoidal, simétrica, frequência 1,5Hz	19,8406	4,1464
BA2xBA1	////	sim	forma de onda senoidal, simétrica, frequência 1,5Hz	20,4524	3,8742
I 1 x I 2	sim	////	forma de onda quadrada, 90% do período à esquerda, frequência 0,5Hz	19,6668	5,2474
P2xP1	////	sim	forma de onda quadrada, 90% do período à direita, frequência 0,5Hz	20,6742	5,7961

As tabelas completas estão no Anexo 10.3. Estas deram origem aos gráficos comparativos que estão apresentados no item 6.3 e Anexo 10.5 deste trabalho.

6.3. Gráfico das comparações entre cordões de solda executados, sem e com o controle do movimento do arco elétrico por oscilação magnética.

Em resumo, o passe de raiz sem uso da oscilação magnética pode ser feito sem a ocorrência de perfuração do chanfro na região “sem defeito” e nem na região “com defeito”, respectivamente em 50% e 25% dos casos. Todas as regiões “com defeito” soldadas com sucesso (sem perfuração) nesta etapa foram incluídas nas análises realizadas.

Com o uso de oscilação magnética na forma senoidal simétrica, frequência de 1,5Hz, foi possível completar o passe de raiz na região “sem defeito” em 100% dos corpos de prova testados. Essa regulagem foi usada sempre em muitos corpos de prova até o arco atingir a região “com defeito”, onde se testou outros parâmetros de oscilação.

A Figura 6.36 mostra a variação dos valores das coordenadas “X” e “Y” dos centros de massa de cordões depositados sem e com o uso de oscilação magnética senoidal na frequência de 1,5Hz em regiões “com defeito” à esquerda.

Na região “com defeito” à esquerda, sem o uso de oscilação, o material depositado ficou mais à direita. Na região “com defeito” à direita, também sem o uso de oscilação, o material ficou mais à esquerda (ver Figuras 10.1 e 10.2 do Anexo 10.4). Em ambas as condições houve excesso de penetração, ou seja, um acúmulo de material na parte inferior da superfície inferior do chanfro, isso é evidenciado pelos valores respectivos de “X” e menores valores de “Y” entre si, na Tabela 4.

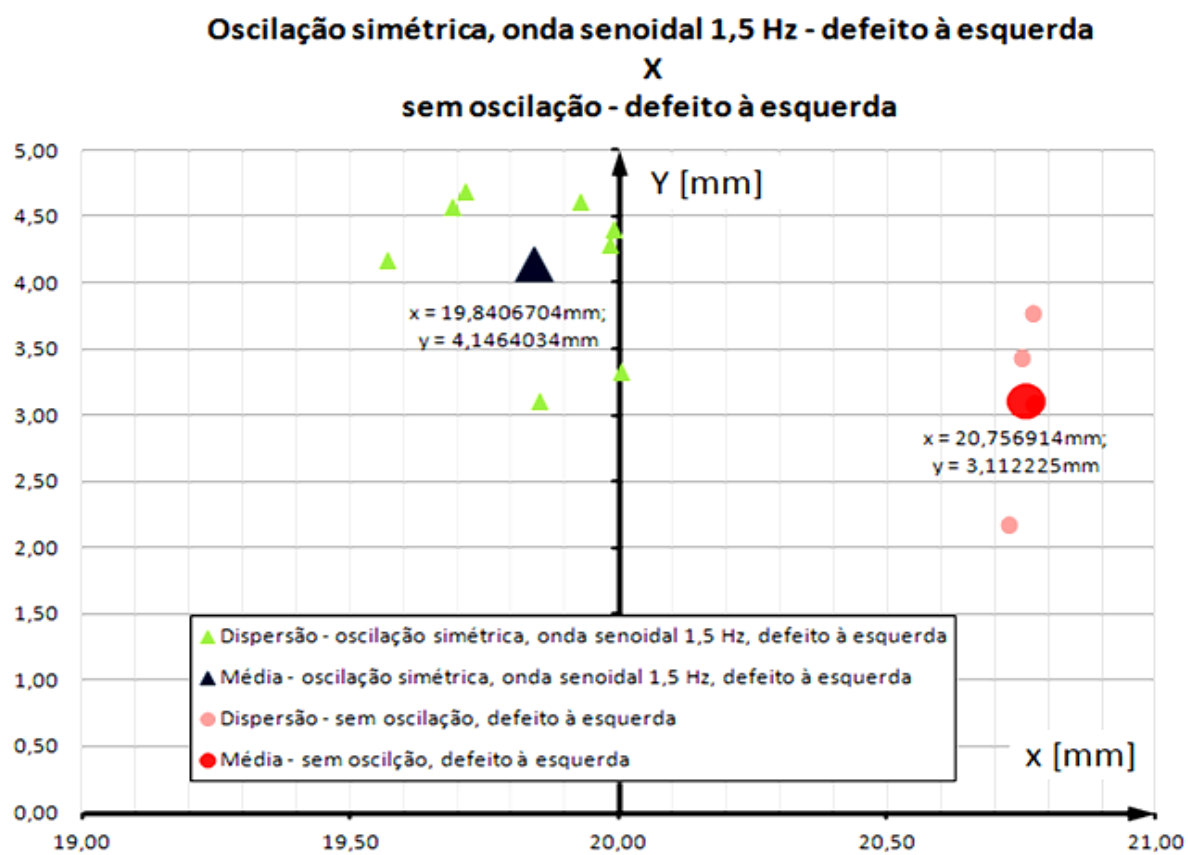


Figura 6.36: Gráfico comparativo entre as soldagens com oscilação, forma de onda senoidal, simétrica, frequência 1,5Hz e sem a oscilação. Defeito à esquerda.

Fazendo-se uma análise semelhante para outras situações, obtém-se o resultado apresentado na Figura 6.37.

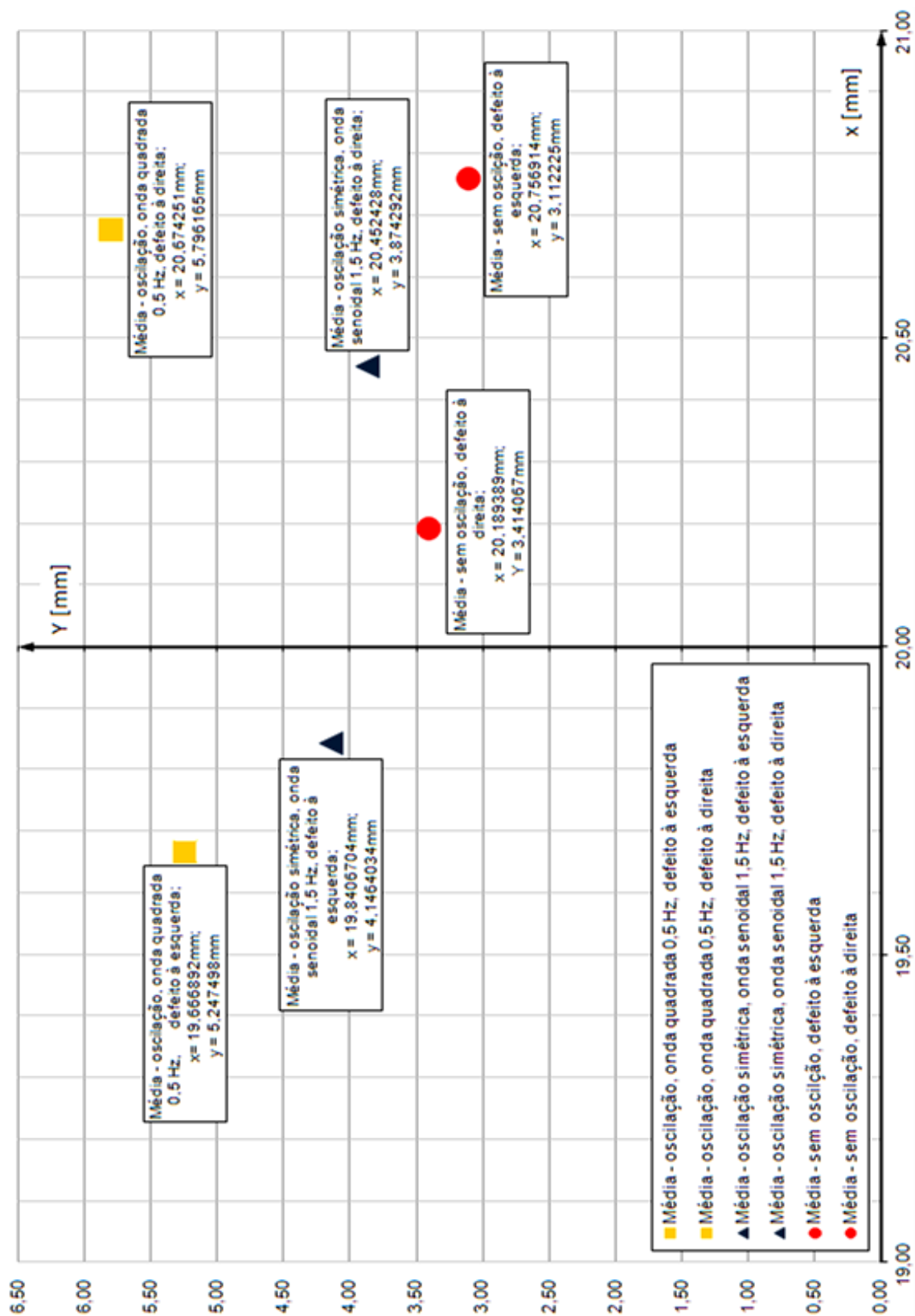


Figura 6.37: Gráfico comparativo entre as médias dos resultados das soldagens com diferentes condições de desvio magnético do arco elétrico.

Os pontos circulares se referem às soldagens sem a utilização da oscilação magnética. Nesta condição, pode-se perceber que o arco elétrico favorece a fusão mais localizada no centro do cordão, e resulta no acúmulo de metal de solda numa região abaixo da superfície inferior da chapa, ou seja, uma penetração excessiva, indicada também pelos menores valores absolutos de “Y”. Deve ser ressaltado que essa situação está no limite e que pequenas variações decorrentes das diversas outras variáveis de soldagem resultarão em furo da raiz e vazamento do metal depositado, como ocorreu em várias soldagens efetuadas. Observou-se também uma tendência do metal de solda se acumular no lado oposto ao defeito ou em outras palavras, sem oscilação magnética e com defeito à direita do sentido da soldagem, o centro de massa deslocou-se para a esquerda e vice-versa. Este é o resultado esperado, já que o espaço vazio maior está exatamente nessas regiões. Figura 6.38.

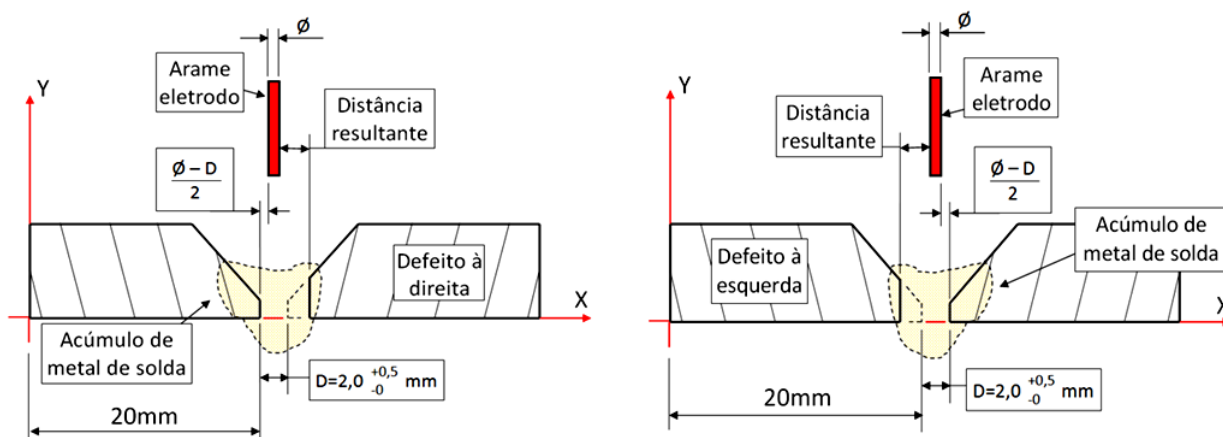


Figura 6.38: Sem oscilação, acúmulo de metal de solda à esquerda ou à direita

Os pontos triangulares representam a aplicação da oscilação magnética simétrica, com forma de onda senoidal e frequência de 1,5Hz. Comparando-se com a situação anterior, nesta condição é possível notar que a atuação da oscilação favoreceu o deslocamento do metal de solda para ambas as laterais dos chanfros, isto é uma distribuição mais simétrica em relação ao centro do chanfro e também uma diminuição da penetração excessiva, o que também é confirmado pelos maiores valores relativos encontrados para “X” e “Y”. Esse é um efeito altamente desejável na deposição de um passe de raiz; evitar fusão excessiva (furo) e falta de penetração nas laterais do chanfro (ver Figuras 10.3, 10.4 e 10.5 do Anexo 10.4).

Os pontos quadrados representam a oscilação com forma de onda quadrada e frequência de 0,5Hz, deslocada preferencialmente para o lado “com defeito”. Os resultados desta regulagem novamente indicam o efeito benéfico da oscilação magnética.

Finalmente, deve-se ressaltar que eventuais correções para a falta ou excesso de penetração poderiam ser feitas com variação de outros parâmetros de soldagem, como a corrente ou velocidade de soldagem por exemplo, ou uma combinação deles.

6.4. Considerações finais.

Os “defeitos” de preparação de chanfro utilizados nesse trabalho foram relativamente grandes e radicais em relação aos mais comumente encontrados na soldagem industrial, com transições geométricas e dimensionais bruscas. Assim, há menores possibilidades de um único conjunto de parâmetros de soldagem e deflexão magnética do arco ser adequado para deposição do passe de raiz de regiões com preparação adequada e não conforme, que seria a situação ideal para fabricação.

O uso de diferentes ajustes de deflexão para cada situação específica de chanfro inadequado tornaria a fabricação muito mais complexa, demorada e onerosa, embora seja uma possibilidade.

6.5. Comprovação, por análise estatística de teste de hipótese, da eficiência do sistema de controle da movimentação do arco elétrico por oscilação magnética para soldagem de passe de raiz.

Utilizando-se dos recursos da matemática estatística, foi realizada a análise comparativa entre os valores obtidos para a localização do centro de massa dos corpos de prova a fim de saber se os resultados apresentados sustentam a condição de serem significativos e conseqüentemente aceitos para a comprovação da eficiência da atuação do sistema de oscilação magnética.

Em linhas gerais, a análise consiste em verificar se as amostras podem ser consideradas como provenientes ou não de uma mesma população.

Primeiramente, foi realizado o teste de uma média com desvio-padrão desconhecido [37] e posteriormente aplicou-se o teste de hipótese referente ao valor real da diferença entre duas médias populacionais denominado de teste comparativo entre duas médias, sendo os dados não-emparelhados com desvio-padrão desconhecido das populações e desvio-padrão diferente das populações [37].

Como exemplo, assume-se a coordenada $X=19\text{mm}$ como sendo o valor médio do centro de massa de um corpo de prova denominado $W1 \times W2$ e $X=21\text{mm}$ para outro, denominado $Z1 \times Z2$. O teste de hipótese aponta a confiabilidade de W não pertencer a Z e vice-versa, visto que $X=19\text{mm}$ é uma média, portanto, os valores reais podem ser 19,1; 19,4; 18; 19,5 e também para $X=21\text{mm}$ poder-se-ia ter 21,3; 20,5; 20,4; 21,8 por exemplo.

Este procedimento compara a média obtida pelos cálculos computacionais em função do valor de referência, ou seja, $X=20\text{mm}$ e $Y=0\text{mm}$.

As Tabelas 5 e 6 apresentam um resumo dos resultados finais desses testes referente à coordenada "X" com confiabilidade entre 95% e 99% a favor do sistema de oscilação magnética que foi apresentado neste trabalho. As planilhas de cálculo estão no Anexo 10.6.

Tabela 5: Comparações em função de uma média desconhecida.

Resumo do cálculo estatístico - Média com desvio padrão desconhecido " \bar{X} " estabelecido = 20mm					
Corpo de prova	Oscilação	Defeito		\bar{X} encontrado [mm]	Confiabilidade [%]
		esquerda	direita		
B2 x B1 e D2 x D1	forma de onda senoidal, simétrica, frequência 1,5Hz	sim	///	19,840670	95
O1 x O2	///	sim	///	20,756914	99
BA2 x BA1	forma de onda senoidal, simétrica, frequência 1,5Hz	///	sim	20,452428	98
N1 x N2	///	///	sim	20,189389	98
I 1 x I 2	forma de onda quadrada, 90% do período à esquerda, frequência 0,5Hz	sim	///	19,666892	99
P2 x P1	forma de onda quadrada, 90% do período à direita, frequência 0,5Hz	///	sim	20,674251	99

Na Tabela 5 nota-se que o $\bar{X}_{\text{encontrado}}$ é significativamente diferente de 20mm, obedecendo-se as respectivas confiabilidades.

Tabela 6: Comparações em função de duas médias desconhecidas, diferentes e dados não-emparelhados, para \bar{X}_1 e \bar{X}_2 .

Resumo do cálculo estatístico - Comparação entre duas médias, dados não-emparelhados, desvio padrão desconhecidos e diferentes						
Corpo de prova	Oscilação	Defeito		\bar{X}_1 encontrado [mm]	\bar{X}_2 encontrado [mm]	Confiabilidade [%]
		esquerda	direita			
B2 x B1 e D2 x D1	forma de onda senoidal, simétrica, frequência 1,5Hz	sim	///	19,840670	///	99
O1 x O2	///	sim	///	///	20,756914	
BA2 x BA1	forma de onda senoidal, simétrica, frequência 1,5Hz	///	sim	20,452428	///	95
N1 x N2	///	///	sim	///	20,189389	
I 1 x I 2	forma de onda quadrada, 90% do período à esquerda, frequência 0,5Hz	sim	///	19,666892	///	99
O1 x O2	///	sim	///	///	20,756914	
P2 x P1	forma de onda quadrada, 90% do período à direita, frequência 0,5Hz	///	sim	20,674251	///	99
N1 x N2	///	///	sim	///	20,189389	

A Tabela 6 apresenta que as duas médias \bar{X}_1 e \bar{X}_2 não pertencerem à mesma população e, portanto são significativamente diferentes, obedecendo-se as respectivas confiabilidades.

Tabela 7: Comparações em função de duas médias desconhecidas, diferentes e dadas não-emparelhados para \bar{Y}_1 e \bar{Y}_2 .

Resumo do cálculo estatístico - Comparação entre duas médias, dados não-emparelhados, desvio padrão desconhecidos e diferentes						
Corpo de prova	Oscilação	Defeito		\bar{Y}_1 encontrado [mm]	\bar{Y}_2 encontrado [mm]	Confiabilidade [%]
		esquerda	direita			
B2 x B1 e D2 x D1	forma de onda senoidal, simétrica, frequência 1,5Hz	sim	///	4,146403	///	Diferença superior a 1mm. Não foi necessário calcular
O1 x O2	///	sim	///	///	3,112225	
BA2 x BA1	forma de onda senoidal, simétrica, frequência 1,5Hz	///	sim	3,874292	///	80
N1 x N2	///	///	sim	///	3,414067	
I 1 x I 2	forma de onda quadrada, 90% do período à esquerda, frequência 0,5Hz	sim	///	5,247498	///	Diferença superior a 1mm. Não foi necessário calcular
O1 x O2	///	sim	///	///	3,112225	
P2 x P1	forma de onda quadrada, 90% do período à direita, frequência 0,5Hz	///	sim	5,796165	///	Diferença superior a 1mm. Não foi necessário calcular
N1 x N2	///	///	sim	///	3,414067	

A Tabela 7 apresenta 80% de confiabilidade de que os valores “Y” dos corpos de prova BA2xB1 e N1xN2 não pertençam à mesma média. Isso não desqualifica os testes executados, pois nenhum dos corpos de prova desta análise furou a raiz. Essa discussão reforça o que foi apontado anteriormente quanto à necessidade de se aplicar regulagens específicas em regiões “com defeito”, sendo que os menores valores de “Y” aumentam a probabilidade de furar a raiz e valores maiores resultam em falta de penetração. Para as demais comparações as diferenças são superiores a 1mm e o cálculo da confiabilidade não foi realizado, pois, apresentariam confiabilidade mínima de 99%.

7. Conclusões

O trabalho realizado permite concluir que:

- Experimentalmente, este trabalho mostra que um campo magnético de $2,0 \pm 0,2 \text{ mT}$ a uma distância de $25 \pm 1 \text{ mm}$ utilizando-se uma bobina com potência para 12W e núcleo metálico composto por lâminas de ferro-silício é suficientemente forte para promover a deflexão do arco elétrico GTAW e GMAW. A distância entre o indutor eletromagnético e o arco também é informação importante, pois, o núcleo da bobina deve ficar posicionado adequadamente referente ao arco elétrico a fim de promover satisfatoriamente a deflexão deste.
- Nas condições estabelecidas neste trabalho, o máximo deslocamento lateral alcançado, tanto para a direita quanto para a esquerda, foi de aproximadamente 6mm para um arco elétrico GTAW e também para o arco GMAW, com os parâmetros de operação descritos na parte experimental.
- A oscilação magnética do arco permite modificar de forma significativa a geometria do passe de raiz feito pelo processo GMAW e pode contribuir para evitar a formação de descontinuidades como furos, falta de penetração lateral ou outro tipo de distribuição inadequada do metal depositado.
- Diferentes tipos de deflexão do arco elétrico podem ser mais eficientes para ajudar a deposição de passe de raiz em chanfros com diferenças de preparação/dimensões geométricas.

Na soldagem industrial, em campo ou chão de fábrica, pode ser que uma única regulagem permita completar os chanfros com variações geométricas até um certo nível, com ou sem o uso de deflexão magnética do arco.

O uso da deflexão magnética parece tornar maior essa possibilidade, em função da maior faixa de tolerância de variações indicada pelos resultados obtidos.

- A utilização do efeito de oscilação magnética de forma controlada é capaz de solucionar vários problemas durante a soldagem, porém, outros parâmetros tais como, velocidade de deslocamento da tocha de soldagem, distância entre o bico de contato e a peça, tensão e corrente elétricas, posicionamento relativo da tocha, entre outros, podem ser utilizados simultaneamente a fim sanar dificuldades onde a oscilação magnética, isoladamente, não basta.

- O sistema desenvolvido e utilizado mostrou ter possibilidades operacionais suficientes para os fins desejados.

8. Sugestões para trabalhos futuros

Os resultados obtidos nesse trabalho permitem sugerir como trabalhos futuros:

- Estudo de juntas comuns usadas na soldagem de tubulações;
- Estudo de desvios geométricos comuns na preparação de juntas de tubulações;
- Projeto de corpos de prova simulando juntas de tubulações e seus desvios;
- Estudo de defeitos comuns gerados na soldagem de passe de raiz de tubulações pelos processos GMAW e FCAW;
- Estudo de parâmetros adequados para soldagem mecanizada de passe de raiz pelos processos GMAW e FCAW;
- Estudo dos parâmetros de oscilação/deflexão magnética de arcos de soldagem para minimizar geração de defeitos nos passes de raiz pelos processos GMAW e FCAW.
- Fabricação de um sistema de deflexão do arco GMAW por oscilação magnética com tamanho reduzido para ser utilizado em tocha para trabalhos manuais.

9. Bibliografia

- [1] BENARDOS, Nicholas de; OLSZEWSKI, Stanislas. **Process of and Apparatus for Working Metals by the Direct Application of the Electric Current**. Patente de 1887.
- [2] MARQUES, Paulo Villani; MODENESI, Paulo José; BRACARENSE, Alexandre Queiroz. **Soldagem Fundamentos e Tecnologia**, 3ª edição. Editora UFMG, 2009. 363 páginas. Capítulo 2.
- [3] CRC EVANS. EQUIPMENT, WELDING MACHINES. Disponível em: <http://www.crc-evans.com/equipment/welding-equipment/p600>. Acesso em: 17/10/2013. Título: CRC EVANS.
- [4] POLYSOUDE. PRODUCTS, MECHANIZED WELDING & CLADDING, ORBITAL WELDING BY POLYSOUDE CARRIAGE WELDHEADS POLYCAR 60. Disponível em: <http://www.polysoude.com/>. Acesso em: 17/10/2013.
- [5] FELIZARDO, Ivanilza et al. **Método de Aplicação da Soldagem: Manual, Mecanizado ou Automatizado**. In: CONGRESSO NACIONAL DE SOLDAGEM, XXXII CONSOLDA, 10, 2006, Belo horizonte - MG.
- [6] FELIZARDO, Ivanilza et al. **Qualificação do Procedimento de Soldagem de Tubulações Utilizando Robô Orbital**. In: CONGRESSO NACIONAL DE SOLDAGEM, XXXIII CONSOLDA, 8, 2007, Caxias do Sul – RS.
- [7] BRACARENSE, Alexandre Queiroz. et al. **Sistema robotizado para soldagem orbital de dutos**. In: Rio OIL & GAS – EXPO AND CONFERENCE, 10, 2004, Rio de Janeiro – R.J.
- [8] ALMEIDA, Luciana Lezira Pereira. et al. **Soldagem Unilateral com Suporte Cerâmico de Cordierit**. Soldagem e Inspeção. São Paulo, vol 15, nº1, pags 61-70, Jan/Mar. 2010.
- [9] TATAGIBA, Luis Claudio Soares. et al. **Investigação sobre a Eficiência da Fibra de Vidro e da Fibra Cerâmica como Suporte de Solda na Soldagem Unilateral**, Soldagem e Inspeção. São Paulo, vol 16, nº 4, pags 377-386, Out/Dez. 2011.

- [10] ORSTED, Hans Christian. Físico e Químico dinamarquês. Descobriu que as correntes elétricas podem criar campos magnéticos que são parte importante do Eletromagnetismo. Nascido em 1777, falecido em 1851. Disponível em: <https://www.google.com.br/#q=orsted>. Acesso em: 17/10/2013. Título: orsted.
- [11] MODENESI, Paulo José; BRACARENSE, Alexandre Queiroz. **Introdução à física do arco elétrico e sua aplicação na soldagem dos metais** - Universidade Federal de Minas Gerais, UFMG, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Metais, 2014.
- [12] LORENTZ, Hendrik Antoon. Nobel de Física por seu trabalho sobre as radiações eletromagnéticas. Nascido em 1853, falecido em 1928. Disponível em: <https://www.google.com.br/#q=lorentz>. Acesso em: 17/10/2013. Título: lorentz.
- [13] HALLIDAY, David; RESNICK, Robert. **Física 3**. 3ª edição. Editora LTC. Capítulo 33, pags 163 até 179.
- [14] SALA DE FÍSICA. FREE DOMAIN, PHP. MySQL, UNLIMITED SITES / SPACE / BANDWIDTH. Disponível em: <http://www.geocities.ws/saladefisica8/eletromagnetismo/condutor.html>. Acesso em: 17/10/2013.
- [15] GREENE, William J.; **Magnetic Oscillation of Welding Arc**. Patente, Scotch Plains. 1, 1960.
- [16] LEI DE AMPERE. **Solenóide e bobina** - Universidade Federal de Minas Gerais, UFMG. Disponível em: <https://www13.fisica.ufmg.br/~feleto/TRANSPARENCIAS/Transp-Cap8.pdf>. Acesso em: 10/03/2014.
- [17] BIRK, Felipe Tijiwa; **Campo magnético de um solenóide**. Relatório final de atividade F809 - Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP. Professor Orientador PUDENZI, Marcio Alberto Araújo. Disponível em: http://www.ifi.unicamp.br/~lunazzi/.../004910_Felipe-Pudenzi_RF.pdf. Acesso em: 06/07/2014.

- [18] ZARO, Milton Antonio et al. **Medição da força produzida pelo solenóide sobre o núcleo móvel em bobinas usadas nos sistemas de partida** – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, Escola de Engenharia, DEMEC. Revista de Ensino de Física. vol 11. 12, 1989.
- [19] BOBINA E NÚCLEO METÁLICO. Imagem. Disponível em: <https://www.google.com.br/search?/bobinaenucleo/imagens>. Acesso em: 06/07/2014.
- [20] GONÇALVES, C.S. **Montagem e construção de um magnetômetro a efeito KERR Magneto-optico**. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, UFRN. Centro de Ciências Exatas e da Terra. Departamento de Física Teórica e Experimental. Programa de Pós Graduação, 2006.
- [21] LANCARTER, John Frederick. **Metallurgy of Welding**. 5ª edição. Editora Chapman e Hall. Capítulo 6, pags 95 e 105.
- [22] MARQUES, Paulo Villani. **Desenvolvimento e Avaliação de um sistema para soldagem TIG Mecanizada**. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Minas Gerais, UFMG. Departamento de Engenharia Mecânica, DEMEC. 1983.
- [23] AP Automation Orbital Welding Systems. Disponível em: <http://www.ap-automation.com>. Acesso em: 14/10/2013.
- [24] MELT TOOLS. **Magnetic Arc Oscillation for Automated TIG Welding, AP Automation**. Disponível em: <http://www.melttools.com/blog/magnetic-arc-oscillation-for-automated-tig-welding>. Acesso em: 27/07/2014.
- [25] ANDRADE Jr, Benedito Carneiro. **Uso de oscilação Magnética na Transferência Metálica para Preenchimento de Passe de Raiz com Arame Tubular**. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Minas Gerais, UFMG. Departamento de Engenharia Mecânica, DEMEC. 8, 2010.
- [26] SOARES, Lucas Figueiredo. **Uso de Oscilação Magnética do Arco Elétrico para Preenchimento do Passe de Raiz em Juntas Chanfradas de Aço Baixo Carbono com o Processo GMAW**. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Minas Gerais, UFMG. Departamento de Engenharia Mecânica, DEMEC. 10, 2010.

- [27] Li, Y. B. et al. **Magnetically Assisted Resistance Spot Welding of Dual-Phase Steel**. Welding Journal. Volume 92. 4, 2013.
- [28] GUILHERME, Luiz Alexandre. **Estudo do Efeito da Geometria das Extremidades do Núcleo do Eletroímã sobre a Deflexão do Arco de Soldagem**. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Uberlândia, UFU, Faculdade de Engenharia Mecânica. 8, 2012.
- [29] KANG, Y. H.; NA S. J.; **Characteristics of Welding and Arc Signal in Narrow Groove Gas Metal Arc Welding Using Electromagnetic Arc Oscillation**. AWS – American Welding Society, Supplement to the Welding Journal. 5, 2003.
- [30] JEFF NELSON. **Maximizing Pipeline Welding Efficiency**. Welding Journal. 6, 2013.
- [31] LANDGRAF, Fernando José Gomes. **Propriedades Magnéticas de Aços para Fins Elétricos** – IPT, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. Disponível em:
www.pmt.usp.br/academic/landgraf/.../02Lan%20%20recope%20.pdf. Acesso em: 24/03/2014.
- [32] Materiais Magnéticos - Universidade Federal de Santa Catarina. Capítulo II. Disponível em: http://www.labspot.ufsc.br/~jackie/cap2_new.pdf. Acesso em: 06/07/2014.
- [33] NOVAIS, Christopher Tarczewski. **Materiais Magnéticos** – SENAI, Roberto Simonsen. Disponível em: <http://www.pt.scribd.com/doc/22672892/MATERIAIS-MAGNETICOS>. Acesso em 08/04/2014.
- [34] CALLISTER, William D. **Materials Science and Engineering**. 7ª edição. Capítulo 20.
- [35] SANCHES, Louise da Costa. **Estudo Metalúrgico e de Propriedades Mecânicas de Solda GMAW-CM** - Universidade Federal do Pará, Centro Tecnológico. Trabalho de Conclusão de Curso. 4, 2007.

- [36] FALCÃO, César Augusto de Jesus. **Avaliação da Tenacidade à Fratura na ZTA de Soldas Múltiplos passes em um Aço ARBL** - Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos. Dissertação de Mestrado. 1, 1997.
- [37] NETO, Pedro Luiz de Oliveira Costa. **Estatística**. 2ª edição. Editora Edgard Blücher. Capítulo 5, pags 88 até 115.

10. Anexos

10.1. Especificação das dimensões dos corpos de prova

Especificação das dimensões adotadas para a usinagem dos corpos de prova.

Tabela 8.

Tabela 8: Dimensões para a usinagem dos corpos de prova

Dimensão	A [mm]	B [mm]	C [mm]	D [mm]	E [mm]
Valor especificado	1 ^{+0,5} ₋₀	3 ^{+0,5} ₋₀	1 ^{+0,5} ₋₀	2 ^{+0,5} ₋₀	3 ^{+0,5} ₋₀

10.2. Controle das dimensões e montagem dos corpos de prova

Amostragem dos valores encontrados após usinagem e montagem do corpo de prova B2 x B1. Tabela 9.

Tabela 9: Dimensões do corpo de prova B2 x B1. (a) peça B1, (b) peça B2, (c) conjunto montado B2 x B1.

Denominação do corpo-de-prova	A [mm]	B [mm]	C [mm]	Denominação da montagem dos corpos-de-prova	D [mm]	E [mm]
B1	1,20	0	0	B2 x B1	2,80	3,50
	1,15				2,50	3,40
	1,30				2,40	3,30
	1,20				2,60	3,60
	média				1,21	média	2,58	3,45
desvio-padrão	0,05	desvio-padrão	0,13	0,1		
(a)			(c)			
Denominação do corpo-de-prova	A [mm]	B [mm]	C [mm]			
B2	1,20	4,00	1,00			
	1,10	3,80	1,10			
	1,30	3,60	0,90			
	1,20	3,70	1,00			
	média	1,20	3,78	1,00		
desvio-padrão	0,06	0,13	0,06			
(b)						

Amostragem dos valores encontrados após usinagem e montagem do corpo de prova BA2 x BA1. Tabela 10.

Tabela 10: Dimensões do corpo de prova BA2 x BA1. (a) peça BA1, (b) peça BA2, (c) conjunto montado BA2 x BA1.

Denominação do corpo-de-prova	A [mm]	B [mm]	C [mm]	Denominação da montagem dos corpos-de-prova	D [mm]	E [mm]
BA1	1,00	3,50	1,35	BA2 x BA1	2,50	3,40
	1,10	3,40	1,50		2,20	3,45
	1,05	3,30	1,20		2,50	3,50
	1,00	3,40	1,50		2,40	3,50
média	1,04	3,40	1,39	média	2,40	3,46
desvio-padrão	0,04	0,06	0,11	desvio-padrão	0,11	0,04
(a)			(c)			

Denominação do corpo-de-prova	A [mm]	B [mm]	C [mm]
BA2	1,20	0	0
	1,15		
	1,10		
	1,20		
média	1,16		
desvio-padrão	0,04		
(b)			

Amostragem dos valores encontrados após usinagem e montagem do corpo de prova D2 x D1. Tabela 11.

Tabela 11: Dimensões do corpo de prova D2 x D1. (a) peça D1, (b) peça D2, (c) conjunto montado D2 x D1.

Denominação do corpo-de-prova	A [mm]	B [mm]	C [mm]	Denominação da montagem dos corpos-de-prova	D [mm]	E [mm]
D1	1,15	0	0	D2 x D1	2,20	3,20
	1,00				2,50	2,80
	1,20				2,00	3,00
	1,30				2,20	3,00
média	1,16			média	2,23	3,00
desvio-padrão	0,10			desvio-padrão	0,16	0,13
(a)			(c)			

Denominação do corpo-de-prova	A [mm]	B [mm]	C [mm]
D2	1,30	3,40	1,00
	1,20	3,80	1,05
	1,50	3,20	1,10
	1,20	3,20	1,00
média	1,30	3,40	1,04
desvio-padrão	0,11	0,22	0,04
(b)			

Amostragem dos valores encontrados após usinagem e montagem do corpo de prova N1 x N2. Tabela 12.

Tabela 12: Dimensões do corpo de prova N1 x N2. (a) peça N1, (b) peça N2, (c) conjunto montado N1 x N2.

Denominação do corpo-de-prova	A [mm]	B [mm]	C [mm]	Denominação da montagem dos corpos-de-prova	D [mm]	E [mm]
N1	1,30	0	0	N1 x N2	2,20	3,40
	1,30				2,50	3,50
	1,20				2,80	3,50
	1,20				2,20	3,20
	média				1,25	2,43	3,40
desvio-padrão	0,04	0,22	0,11			
	(a)			(c)		
Denominação do corpo-de-prova	A [mm]	B [mm]	C [mm]			
N2	1,20	2,90	1,00			
	1,20	2,80	1,05			
	1,25	3,00	1,00			
	1,20	3,00	1,05			
	média	1,21	2,93	1,03		
desvio-padrão	0,02	0,07	0,02			
	(b)					

Amostragem dos valores encontrados após usinagem e montagem do corpo de prova O1 x O2. Tabela 13.

Tabela 13: Dimensões do corpo de prova O1 x O2. (a) peça O1, (b) peça O2, (c) conjunto montado O1 x O2.

Denominação do corpo-de-prova	A [mm]	B [mm]	C [mm]	Denominação da montagem dos corpos-de-prova	D [mm]	E [mm]
O1	1,40	3,50	0,80	O1 x O2	2,50	3,50
	1,50	3,60	0,80		2,10	3,20
	1,50	3,60	0,90		2,50	3,20
	1,50	3,50	0,80		2,30	3,40
	média	1,48	3,55		0,83	média	2,35	3,33
desvio-padrão	0,04	0,04	0,04	desvio-padrão	0,15	0,12
	(a)			(c)		
Denominação do corpo-de-prova	A [mm]	B [mm]	C [mm]			
O2	1,50	0	0			
	1,50					
	1,50					
	1,50					
	média			1,50		
desvio-padrão	0,00					
	(b)					

Amostragem dos valores encontrados após usinagem e montagem do corpo de prova I 1 x I 2. Tabela 14.

Tabela 14: Dimensões do corpo de prova I 1 x I 2. (a) peça I 1, (b) peça I 2, (c) conjunto montado I 1 x I 2.

Denominação do corpo-de-prova	A [mm]	B [mm]	C [mm]	Denominação da montagem dos corpos-de-prova	D [mm]	E [mm]
I 1	1,30	3,60	1,20	I 1 x I 2	2,20	3,00
	1,20	3,60	0,90		2,20	3,20
	1,20	3,60	1,20		2,10	3,20
	1,30	3,50	1,30		2,20	3,20
média	1,25	3,58	1,15	média	2,18	3,15
desvio-padrão	0,04	0,04	0,13	desvio-padrão	0,04	0,08
(a)			(c)			

Denominação do corpo-de-prova	A [mm]	B [mm]	C [mm]
I 2	1,50	0	0
	1,50		
	1,30		
	1,50		
média	1,45		
desvio-padrão	0,08		
(b)			

Amostragem dos valores encontrados após usinagem e montagem do corpo de prova P2 x P1. Tabela 15.

Tabela 15: Dimensões do corpo de prova P2 x P1. (a) peça P1, (b) peça P2, (c) conjunto montado P2 x P1.

Denominação do corpo-de-prova	A [mm]	B [mm]	C [mm]	Denominação da montagem dos corpos-de-prova	D [mm]	E [mm]
P1	1,30	3,40	1,20	P2 x P1	2,20	3,20
	1,20	3,50	1,10		2,20	3,20
	1,20	3,60	1,20		2,20	3,20
	1,15	3,50	1,10		2,20	3,20
média	1,21	3,50	1,15	média	2,20	3,20
desvio-padrão	0,05	0,06	0,04	desvio-padrão	0,00	0,00
(a)			(c)			

Denominação do corpo-de-prova	A [mm]	B [mm]	C [mm]
P2	1,50	0	0
	1,40		
	1,40		
	1,50		
média	1,45		
desvio-padrão	0,04		
(b)			

10.3. Planilhas contendo os valores dos resultados computacionais de centro de massa

Tabela 16: Valores dos resultados computacionais do gráfico da Figura 6.36

Oscilação simétrica, senoidal 1,5 Hz - defeito à esquerda					
x					
Sem oscilação - defeito à esquerda					
	centro de massa		massa [g]	área [mm ²]	
	x [mm]	y [mm]			
CP B2 x B1 - oscilação simétrica, senoidal 1,5Hz - defeito à esquerda	19,713674	4,692584	0,441724	151,799798	linha 30
	19,982172	4,287458	0,490868	168,112033	linha 30 - 4mm após
	19,567311	4,169769	0,516175	175,227794	linha 38
	19,990876	4,403256	0,497419	171,246735	linha 38 - 4mm após
CP D2 x D1 - oscilação simétrica, senoidal 1,5Hz - defeito à esquerda	19,851221	3,110896	0,484545	163,431769	linha 30
	20,003917	3,322322	0,527676	175,774051	linha 30 - 4mm após
	19,688277	4,577752	0,457682	155,093699	linha 38
	19,927915	4,607190	0,462016	159,727606	linha 38 - 4mm após
Média	19,84067038	4,146403375	0,484763125	165,0516856	
Desvio padrão	0,154529127	0,56286105	0,027678724	8,455845912	
	centro de massa		massa [g]	área [mm ²]	
	x [mm]	y [mm]			
CP O1 x O2 - sem oscilação - defeito à esquerda	20,773485	3,766915	0,463280	163,485580	linha 12
	20,752266	3,429464	0,477624	167,368324	linha 12 - 4mm após
	20,726603	2,175514	0,545914	190,998207	linha 20
	20,775302	3,077006	0,509039	180,798923	linha 20 - 4mm após
Média	20,756914	3,112225	0,498964	175,662759	
Desvio padrão	0,01970455	0,593280594	0,03175906	10,93889261	

Tabela 17: Valores dos resultados computacionais do gráfico da Figura 10.8

Oscilação simétrica, senoidal 1,5 Hz - defeito à direita					
x					
Sem oscilação - defeito à direita					
	centro de massa		massa [g]	área [mm ²]	
	x [mm]	y [mm]			
CP BA2 x BA1- oscilação simétrica, senoidal 1,5Hz - defeito à direita	20,298460	4,466393	0,491117	165,855779	linha 30
	20,470131	4,198537	0,465920	162,064751	linha 30 - 4mm após
	20,686981	3,256060	0,521113	176,344035	linha 38
	20,354141	3,576177	0,448028	154,711852	linha 38 - 4mm após
Média	20,452428	3,874292	0,481545	164,744104	
Desvio padrão	0,14890852	0,48135272	0,027499	7,804153272	
	centro de massa		massa [g]	área [mm ²]	
	x [mm]	y [mm]			
CP N1 x N2 - sem oscilação - defeito à direita	20,098212	3,218264	0,496357	168,863250	linha 12
	20,268277	3,353914	0,492031	168,654513	linha 12 - 4mm após
	20,250469	3,590676	0,481613	164,643848	linha 20
	20,140597	3,493414	0,459769	162,191365	linha 20 - 4mm após
Média	20,189389	3,414067	0,482443	166,088244	
Desvio padrão	0,07184704	0,14092896	0,01414504	2,808840536	

Tabela 18: Valores dos resultados computacionais do gráfico da Figura 10.9

Oscilação quadrada 0,5 Hz - defeito à esquerda					
	x				
Sem oscilação - defeito à esquerda					
	centro de massa		massa [g]	área [mm ²]	
	x [mm]	y [mm]			
CP I1 x I2 - oscila. quadrada 0,5Hz - defeito à esquerda	19,782493	5,591115	0,463778	159,216878	linha 12
	19,623011	5,449952	0,480404	162,715012	linha 12 - 4mm após
	19,621824	4,987159	0,466695	160,028436	linha 20
	19,640240	4,961766	0,474835	161,428292	linha 20 - 4mm após
Média	19,666892	5,247498	0,471428	160,8471545	
Desvio padrão	0,06713901	0,27770463	0,00657837	1,337414846	
	centro de massa		massa [g]	área [mm ²]	
	x [mm]	y [mm]			
CP O1 x O2 - sem oscilação - defeito à esquerda	20,773485	3,766915	0,463280	163,485580	linha 12
	20,752266	3,429464	0,477624	167,368324	linha 12 - 4mm após
	20,726603	2,175514	0,545914	190,998207	linha 20
	20,775302	3,077006	0,509039	180,798923	linha 20 - 4mm após
Média	20,756914	3,11222475	0,49896425	175,6627585	
Desvio padrão	0,01970455	0,59328059	0,03175906	10,93889261	

Tabela 19: Valores dos resultados computacionais do gráfico da Figura 10.10.

Oscilação quadrada 0,5 Hz - defeito à direita					
	x				
Sem oscilação - defeito à direita					
	centro de massa		massa [g]	área [mm ²]	
	x [mm]	y [mm]			
CP P2 x P1 - oscila. quadrada 0,5Hz - defeito à direita	20,546177	5,850970	0,450634	154,872364	linha 30
	20,770494	5,880681	0,466830	160,489324	linha 30 - 4mm após
	20,666930	5,740104	0,438524	151,045786	linha 38
	20,713401	5,712904	0,446436	155,328933	linha 38 - 4mm após
Média	20,674251	5,796165	0,450606	155,434102	
Desvio padrão	0,08254087	0,07110164	0,01032694	3,359285522	
	centro de massa		massa [g]	área [mm ²]	
	x [mm]	y [mm]			
CP N1 x N2 - sem oscilação - defeito à direita	20,098212	3,218264	0,496357	168,863250	linha 12
	20,268277	3,353914	0,492031	168,654513	linha 12 - 4mm após
	20,250469	3,590676	0,481613	164,643848	linha 20
	20,140597	3,493414	0,459769	162,191365	linha 20 - 4mm após
Média	20,1893888	3,414067	0,4824425	166,088244	
Desvio padrão	0,07184704	0,14092896	0,01414504	2,808840536	

Tabela 20: Valores dos resultados computacionais do gráfico da Figura 6.37.

	centro de massa		massa [g]	área [mm ²]	
	x (mm)				
	x [mm]	y [mm]			
Oscilação quadrada 0,5 Hz - defeito à esquerda	19,762493	5,591115	0,463778	159,216878	
Oscilação simétrica, senoidal 1,5 Hz - defeito à esquerda	19,623011	5,449952	0,480404	162,715012	
	19,621824	4,987159	0,466695	160,028436	
Sem oscilação - defeito à esquerda	19,640240	4,961766	0,474835	161,428292	
	19,666892	5,247498	0,477428	160,8471545	
Média	0,067199	0,2777046	0,0065784	1,337414846	
		centro de massa		massa [g]	área [mm ²]
		x (mm)			
		x [mm]	y [mm]		
CP P1 x P1 - oscilação quadrada 0,5 Hz - defeito à esquerda	20,770494	5,850970	0,450634	154,872364	linha 30
Média	20,669330	5,740104	0,438524	151,045786	linha 30 - 4mm após
	20,713401	5,712904	0,446436	155,328933	linha 38 - 4mm após
Desvio padrão	0,0825409	0,0711016	0,0103269	3,359285522	
		centro de massa		massa [g]	área [mm ²]
		x (mm)			
		x [mm]	y [mm]		
CP BAZ x BA1 - oscilação simétrica, senoidal 1,5 Hz - defeito à direita	20,238460	4,466393	0,491117	165,855779	linha 30
Média	20,470131	4,198537	0,465920	162,064751	linha 30 - 4mm após
	20,686981	3,256060	0,521113	176,344035	linha 38
Desvio padrão	0,1489085	0,4813527	0,027499	7,804153272	
		centro de massa		massa [g]	área [mm ²]
		x (mm)			
		x [mm]	y [mm]		
CP N1 x N2 - sem oscilação - defeito à direita	20,098212	3,218264	0,496357	168,863250	linha 12
Média	20,268277	3,353914	0,492031	168,654513	linha 12 - 4mm após
	20,250469	3,590676	0,481613	164,643848	linha 20
Desvio padrão	0,071847	0,140929	0,014145	2,808840536	

	centro de massa		massa [g]	área [mm ²]	
	x (mm)				
	x [mm]	y [mm]			
Oscilação quadrada 0,5 Hz - defeito à esquerda	19,762493	5,591115	0,463778	159,216878	
Oscilação simétrica, senoidal 1,5 Hz - defeito à esquerda	19,623011	5,449952	0,480404	162,715012	
	19,621824	4,987159	0,466695	160,028436	
Sem oscilação - defeito à esquerda	19,640240	4,961766	0,474835	161,428292	
	19,666892	5,247498	0,477428	160,8471545	
Média	0,067199	0,2777046	0,0065784	1,337414846	
		centro de massa		massa [g]	área [mm ²]
		x (mm)			
		x [mm]	y [mm]		
CP E2 x B1 - oscilação simétrica, senoidal 1,5 Hz - defeito à esquerda	19,982172	4,287458	0,490868	168,112033	linha 30
Média	19,567311	4,169769	0,516175	175,227794	linha 38
	19,990876	4,403256	0,497419	171,246735	linha 38 - 4mm após
Desvio padrão	0,1545291	0,562861	0,0276787	8,455845912	
		centro de massa		massa [g]	área [mm ²]
		x (mm)			
		x [mm]	y [mm]		
CP O1 x O2 - sem oscilação - defeito à esquerda	20,773485	3,766915	0,463280	163,465580	linha 12
Média	20,752266	3,429464	0,477624	167,368324	linha 12 - 4mm após
	20,726603	2,175514	0,545914	190,998207	linha 20
Desvio padrão	0,0197046	0,5932806	0,0317591	10,33889261	

10.4. Traçagem e resultado dos cálculos do centro de massa para alguns cordões de solda

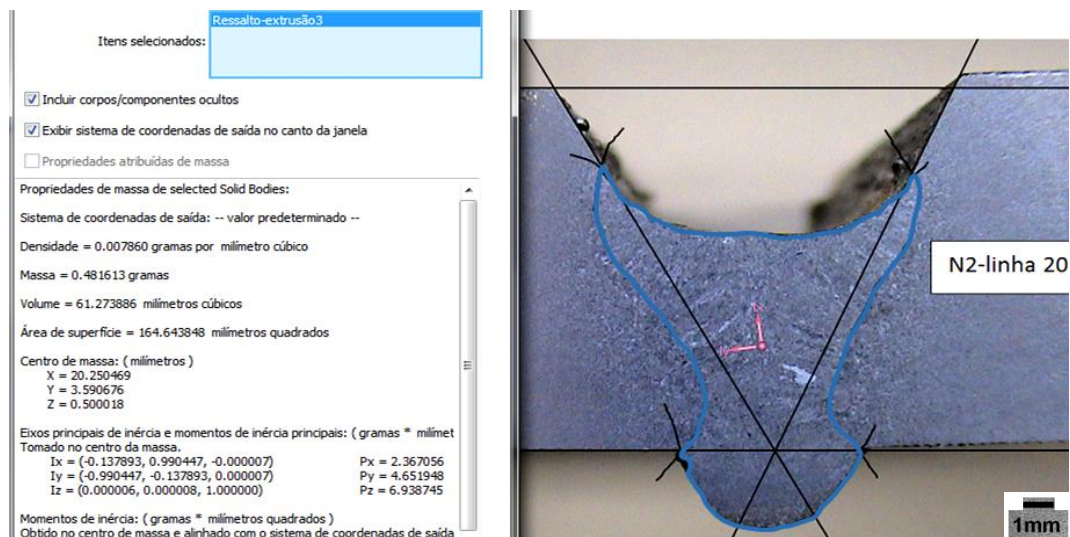


Figura 10.1: Corpo de prova N1xN2, corte na linha 20, sem uso da oscilação, região “com defeito”, lado direito.

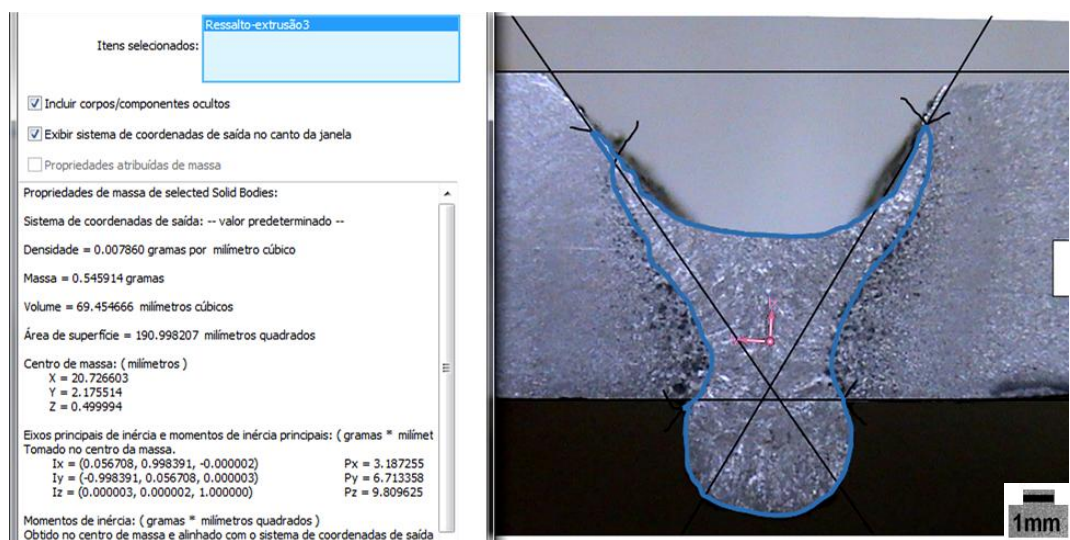


Figura 10.2: Corpo de prova O1xO2, corte na linha 20, sem uso da oscilação, região “com defeito”, lado esquerdo.

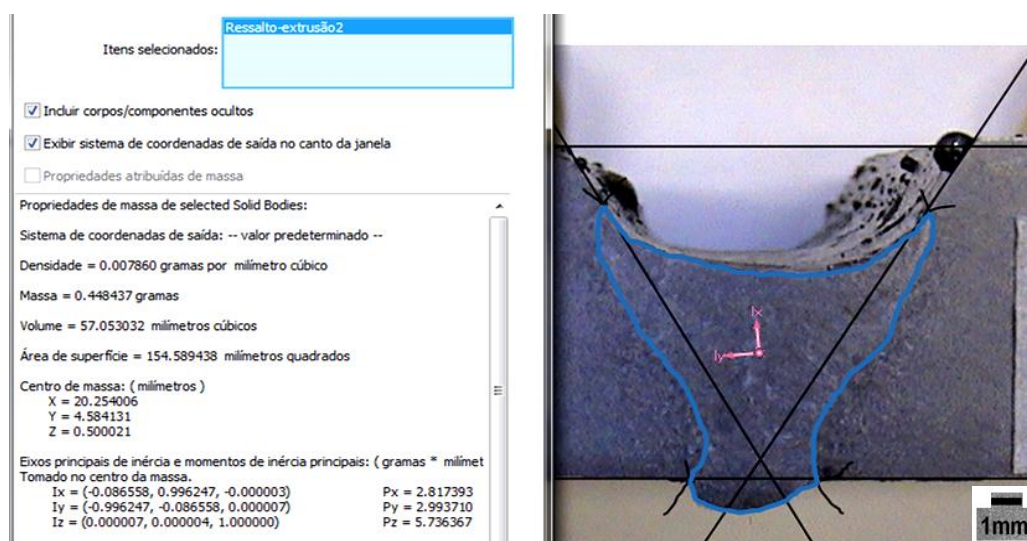


Figura 10.3: Corpo de prova B2xB1, corte quatro milímetros após a linha 20, com uso de oscilação, forma de onda senoidal, simétrica, frequência 1,5Hz, região “sem defeito”.

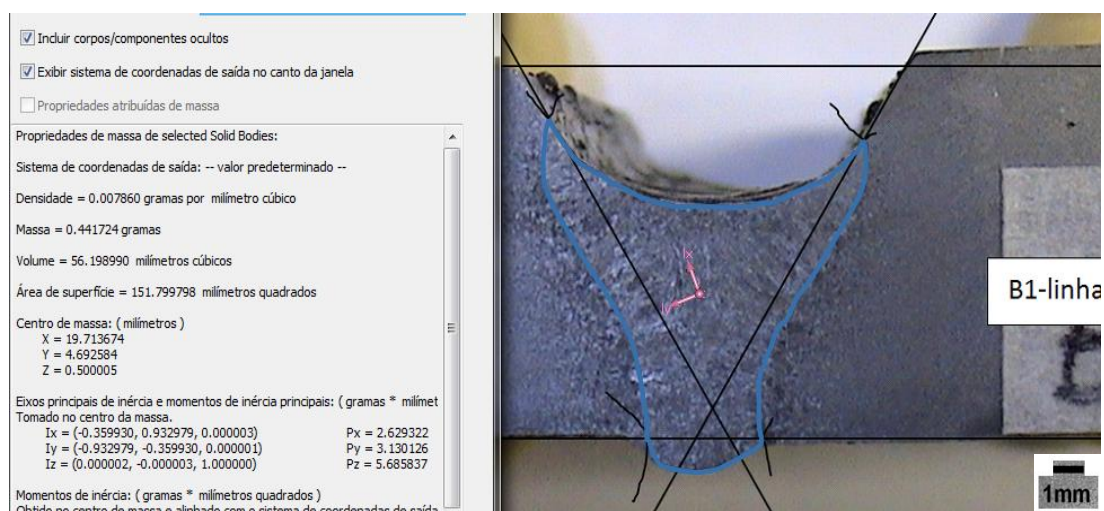


Figura 10.4: Corpo de prova B2xB1, corte na linha 30, com uso da oscilação, forma de onda senoidal, simétrica, frequência 1,5Hz, região “com defeito”, lado esquerdo.

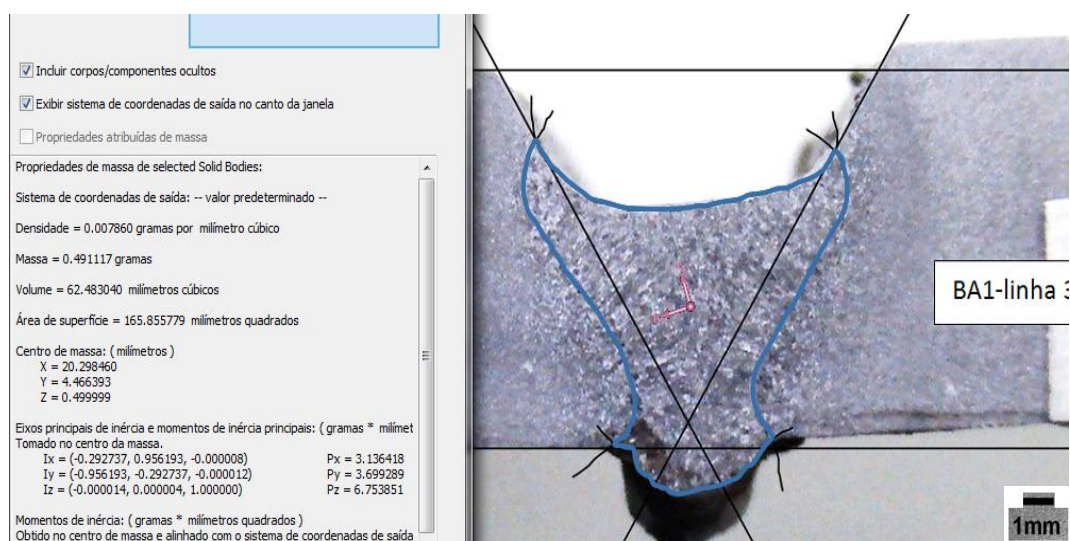


Figura 10.5: Corpo de prova BA2xBA1. Corte transversal na linha 30. Com oscilação magnética. Onda senoidal, simétrica, frequência 1,5Hz. região “com defeito”, lado direito.

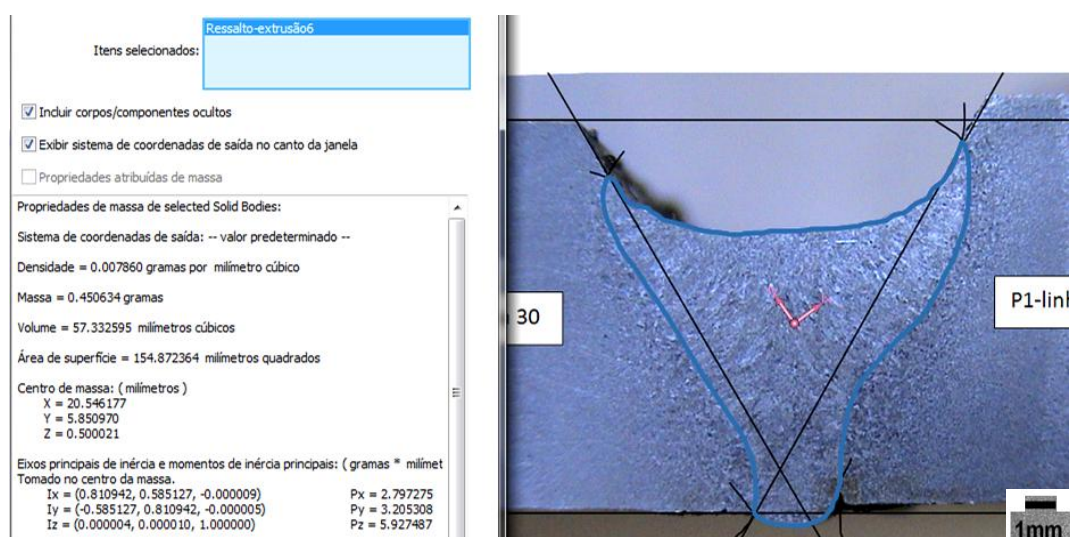


Figura 10.6: Corpo de prova P2xP1, corte na linha 30, com uso da oscilação, forma de onda quadrada, 90% do período deslocada para a direita, frequência 0,5Hz, região “com defeito”, lado direito.

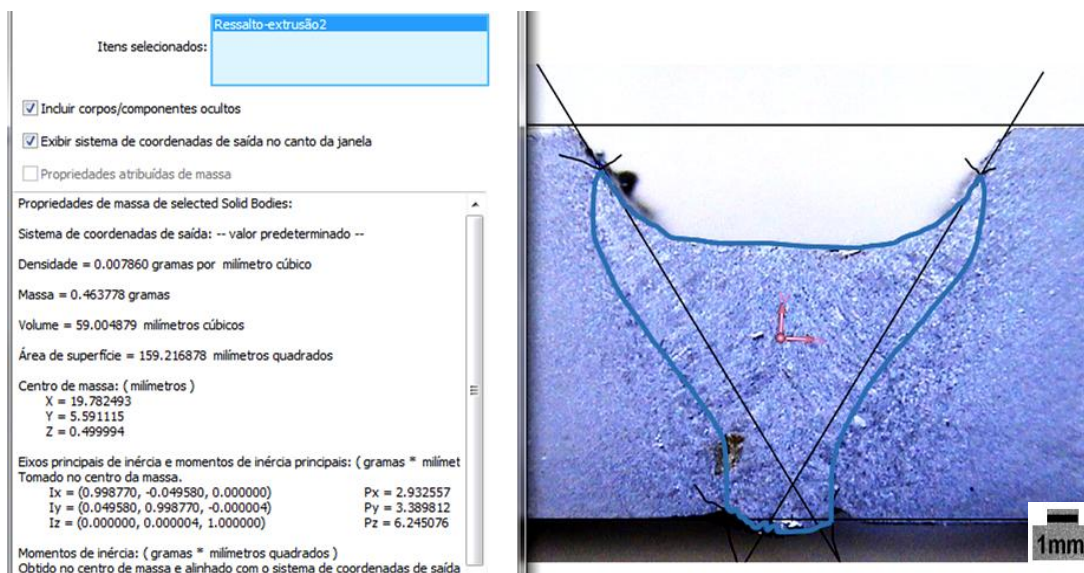


Figura 10.7: Corpo de prova I 1x I 2, corte na linha 12, com uso da oscilação, forma de onda quadrada, 90% do período deslocada para a direita, frequência 0,5Hz, região “com defeito”, lado esquerdo.

10.5. Gráficos comparativos entre as soldagens

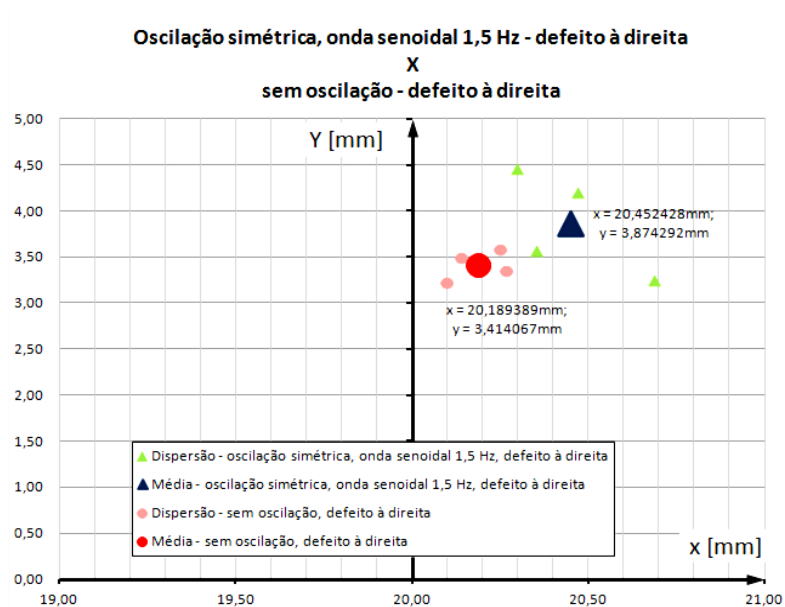


Figura 10.8: Soldagem utilizando-se oscilação magnética, forma de onda senoidal, simétrica, frequência 1,5Hz e sem oscilação. Defeito à direita.

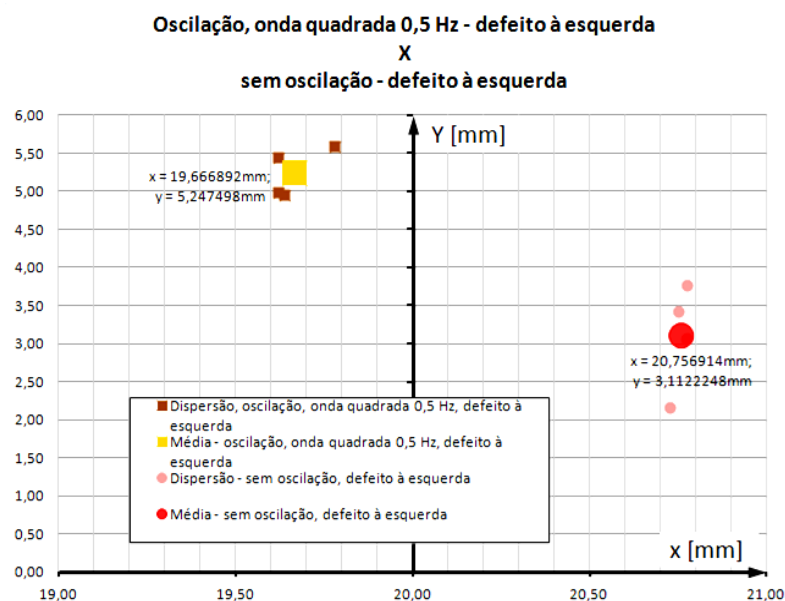


Figura 10.9: Soldagem utilizando-se oscilação magnética, forma de onda quadrada, deslocada para a esquerda, frequência 0,5Hz e sem oscilação. Defeito à esquerda.

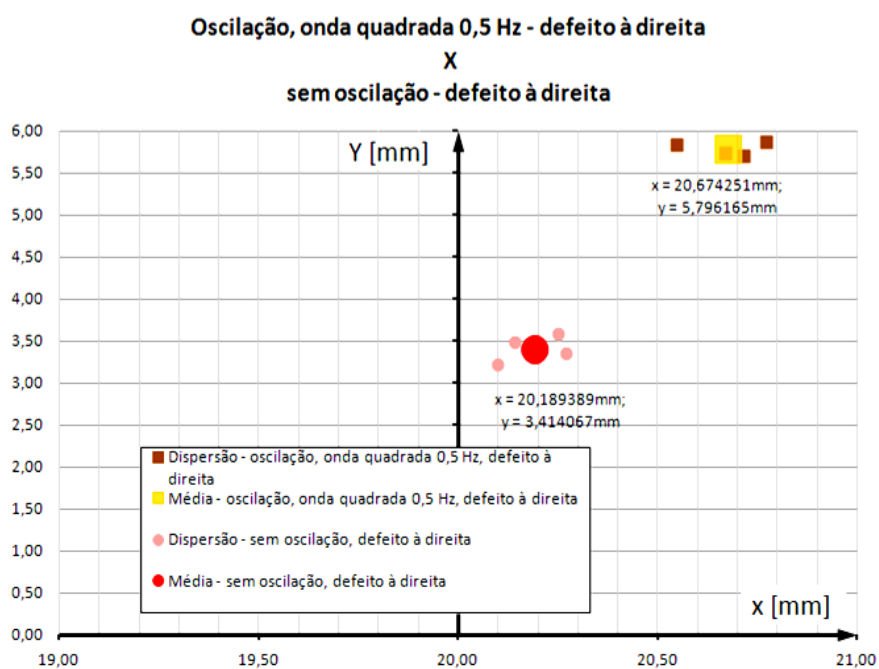


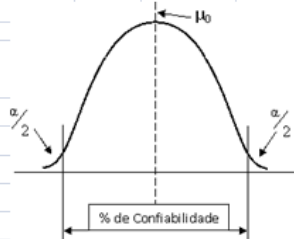
Figura 10.10: Soldagem utilizando-se oscilação magnética, forma de onda quadrada, deslocada para a direita, frequência 0,5Hz e sem a oscilação. Defeito à direita.

10.6. Planilhas de cálculos das confiabilidades por análise estatística

A Tabela 21 apresenta a planilha de cálculos para o teste de uma média com desvio-padrão desconhecido [37], na condição de atuação da oscilação magnética, simétrica, forma de onda senoidal e frequência de 1,5Hz com defeito à esquerda do sentido da soldagem.

Tabela 21: Comparação entre a média do resultado da soldagem \bar{X} e o valor referência, $\mu_0=20\text{mm}$. Oscilação magnética, simétrica, forma de onda senoidal e frequência de 1,5Hz com defeito à esquerda.

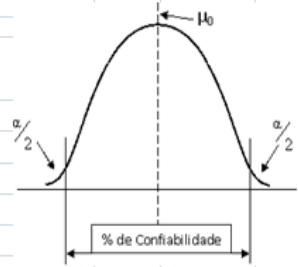
Teste de uma média com desvio padrão desconhecido									
Oscilação magnética simétrica, onda senoidal 1,5Hz - defeito à esquerda - Corpos de prova B2 x B1 e D2 x D1									
X_n	μ_0	\bar{X}	$\bar{X} - X_n$	$(\bar{X} - X_n)^2$	$S^2_{(X)} = \frac{\sum_{n=1}^n (\bar{X} - X_n)^2}{n-1}$	$S_{(X)} = \sqrt{S^2_{(X)}}$	n	\sqrt{n}	$t_{[n-1]} = \frac{(\bar{X} - \mu_0)}{S_{(X)}/\sqrt{n}}$
19,713674	20	19,840670	0,126996	0,016128			8	2,828427	
19,982172			-0,141502	0,020023					
19,567311			0,273359	0,074725					
19,990876			-0,150206	0,022562					
19,851221			-0,010551	0,000111					
20,003917			-0,163247	0,026649					
19,688277			0,152393	0,023224					
19,927915			-0,087245	0,007612					
Σ				0,191034	0,027290573	0,16519859			-2,727942445
$t_{[n-1]; \alpha/2}$	0,50%	1%	2,50%	Condição do teste		Rejeitar H_0 se;			
	3,499	2,998	2,365	$H_0; \mu = \mu_0$	sendo, $\mu = \bar{X}$	$|t_{[n-1]}| > t_{[n-1]; \alpha/2}$			
				$H_1; \mu \neq \mu_0$					
Conclusão		$|t_{[n-1]}| = 2,728$	$t_{[n-1]; 2,5\%} = 2,365$						
* Portanto, com 95% de confiabilidade temos que $\mu \neq \mu_0$; ou $\bar{X} \neq 20$									



A Tabela 22 apresenta a planilha de cálculos para o teste de uma média com desvio-padrão desconhecido [37], na condição sem oscilação magnética, com defeito à esquerda do sentido da soldagem.

Tabela 22: Comparação entre a média do resultado da soldagem \bar{X} e o valor referência, $\mu_0=20\text{mm}$. Sem oscilação magnética, com defeito à esquerda do sentido da soldagem.

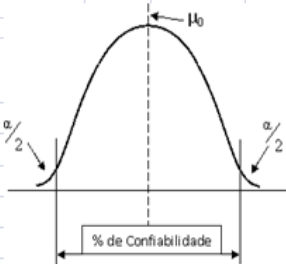
Teste de uma média com desvio padrão desconhecido									
Sem oscilação magnética - defeito à esquerda - Corpos de prova O1 x O2									
X_n	μ_0	\bar{X}	$\bar{X} - X_n$	$(\bar{X} - X_n)^2$	$S^2_{(X)} = \frac{\sum_{n=1}^n (\bar{X} - X_n)^2}{n-1}$	$S_{(X)} = \sqrt{S^2_{(X)}}$	n	\sqrt{n}	$t_{[n-1]} = \frac{(\bar{X} - \mu_0)}{S_{(X)}/\sqrt{n}}$
20,773485	20	20,756914	-0,016571	0,000275			4	2	
20,752266			0,004648	0,000022					
20,726603			0,030311	0,000919					
20,775302			-0,018388	0,000338					
Σ				0,001553	0,000517692	0,02275285			66,53354099
$t_{[n-1]; \alpha/2}$	0,50%	1%	2,50%	Condição do teste		Rejeitar H_0 se;			
	5,841	4,541	3,182	$H_0; \mu = \mu_0$	sendo $\mu = \bar{X}$	$|t_{[n-1]}| > t_{[n-1]; \alpha/2}$			
				$H_1; \mu \neq \mu_0$					
Conclusão		$|t_{[n-1]}| = 66,534$	$t_{[n-1]; 0,5\%} = 5,841$						
* Portanto, com 99% de confiabilidade temos que $\mu \neq \mu_0$; ou $\bar{X} \neq 20$									



A Tabela 24 apresenta a planilha de cálculos para o teste de uma média com desvio-padrão desconhecido [37], na condição de oscilação magnética, simétrica, forma de onda senoidal e frequência de 1,5Hz com defeito à direita do sentido da soldagem.

Tabela 24: Comparação entre a média do resultado da soldagem \bar{X} e o valor referência, $\mu_0=20\text{mm}$. Oscilação magnética, simétrica, forma de onda senoidal e frequência de 1,5Hz com defeito à direita do sentido da soldagem.

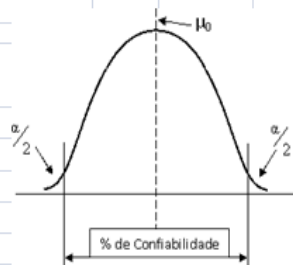
Teste de uma média com desvio padrão desconhecido									
Oscilação magnética simétrica, onda senoidal 1,5Hz - defeito à direita - Corpos de prova BA2 x BA1									
X_n	μ_0	\bar{X}	$\bar{X} - X_n$	$(\bar{X} - X_n)^2$	$S^2_{(X)} = \frac{\sum_{n=1}^n (\bar{X} - X_n)^2}{n-1}$	$S_{(X)} = \sqrt{S^2_{(X)}}$	n	\sqrt{n}	$t_{[n-1]} = \frac{(\bar{X} - \mu_0)}{S_{(X)}/\sqrt{n}}$
20,298460	20	20,452428	0,153968	0,023706			4	2	
20,470131			-0,017703	0,000313					
20,686981			-0,234553	0,055015					
20,354141			0,098287	0,009660					
Σ				0,088695	0,029564995	0,17194474			5,262484195
$t_{[n-1]; \alpha/2}$		0,50%	1%	2,50%	Condição do teste		Rejeitar H_0 se;		
		5,841	4,541	3,182	$H_0; \mu = \mu_0$	sendo $\mu = \bar{X}$	$|t_{[n-1]}| > t_{[n-1]; \alpha/2}$		
					$H_1; \mu \neq \mu_0$				
Conclusão		$|t_{[n-1]}| = 5,262$	$t_{[n-1]; 1\%} = 4,541$						
* Portanto, com 98% de confiabilidade temos que $\mu \neq \mu_0$; ou $\bar{X} \neq 20$									



A Tabela 25 apresenta a planilha de cálculos para o teste de uma média com desvio-padrão desconhecido [37], na condição sem oscilação magnética, com defeito à direita do sentido da soldagem.

Tabela 25: Comparação entre a média do resultado da soldagem \bar{X} e o valor referência, $\mu_0=20\text{mm}$. Sem oscilação magnética, com defeito à direita do sentido da soldagem.

Teste de uma média com desvio padrão desconhecido										
Sem oscilação magnética - defeito à direita - Corpos de prova N1 x N2										
X_n	μ_0	\bar{X}	$\bar{X} - X_n$	$(\bar{X} - X_n)^2$	$S^2_{(X)} = \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{X} - X_n)^2}{n-1}$	$S_{(X)} = \sqrt{S^2_{(X)}}$	$t_{[n-1]} = \frac{(\bar{X} - \mu_0)}{S_{(X)}/\sqrt{n}}$			
20,098212	20	20,189389	0,091177	0,008313				n	\sqrt{n}	
20,268277			-0,078888	0,006223				4	2	
20,250469			-0,061080	0,003731						
20,140597			0,048792	0,002381						
Σ				0,020648	0,006882663	0,08296181		4,565684906		
$t_{[n-1]; \alpha/2}$	0,50%	1%	2,50%	Condição do teste		Rejeitar H_0 se;				
	5,841	4,541	3,182	$H_0: \mu = \mu_0$	sendo $\mu = \bar{X}$	$|t_{[n-1]}| > t_{[n-1]; \alpha/2}$				
				$H_1: \mu \neq \mu_0$						
Conclusão		$|t_{[n-1]}| = 4,566$	$t_{[n-1]; 1\%} = 4,541$							
* Portanto, com 98% de confiabilidade temos que $\mu \neq \mu_0$; ou $\bar{X} \neq 20$										



A Tabela 26 apresenta a planilha de cálculos para o teste entre duas médias, dados não-emparelhados, com desvio-padrão desconhecido e diferente das populações [37], na condição de atuação da oscilação magnética, simétrica, forma de onda senoidal e frequência de 1,5Hz x sem oscilação com defeito à direita do sentido da soldagem.

Tabela 26: Comparação entre a média dos resultados da soldagem \bar{X}_1 e \bar{X}_2 .

Oscilação magnética, simétrica, forma de onda senoidal e frequência de 1,5Hz x sem oscilação com defeito à direita do sentido da soldagem.

Teste comparativo entre duas médias, dados não-emparelhados, desvios-padrão desconhecidos e diferentes.											
Oscilação magnética simétrica, onda senoidal 1,5Hz X Sem oscilação magnética - defeito à direita - Corpos de prova BA2 x BA1 e NI x N2											
X_{n1}	X_{n2}	\bar{X}_1	\bar{X}_2	$S^2_{(x1)}$ [n-1]	$S^2_{(x2)}$ [n-1]	n_1	n_2	t_{α} $= \frac{(\bar{X}_1 - \bar{X}_2)}{\sqrt{\frac{S^2_{(x1)}}{n_1} + \frac{S^2_{(x2)}}{n_2}}}$	$W_1 = \frac{S^2_{(x1)}}{n_1}$	$W_2 = \frac{S^2_{(x2)}}{n_2}$	Aspin-Welch $\nu_t = \left\{ \frac{(W_1 + W_2)^2}{\frac{(W_1)^2}{(n_1+1)} + \frac{(W_2)^2}{(n_2+1)}} \right\} - 2$
20,298460	20,098212	20,452428	20,189389			4	4	2,75559985	0,00739	0,00172	5,208298806
20,470131	20,268277			$S^2_{(x1)} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}_n)^2}{n-1}$	$S^2_{(x2)} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}_n)^2}{n-1}$						
20,686981	20,250469			0,029565	0,00688266						
20,354141	20,140597										
Aproximação "t" de Student, para valores de Aspin-Welch											
$\nu_t =$	5,2083	$\nu_t: \alpha/2$	0,50%	1%	2,50%						
"t" =	5		4,032	3,365	2,571						
Conclusão	$|t_y| = 2,756$		$\nu_t: 2,5\% = 2,571$								
* Portanto, com 95% de confiabilidade temos que $\mu_1 \neq \mu_2$; ou $\bar{X}_1 \neq \bar{X}_2$											
Condição do teste						Rejeitar H_0 se;					
$H_0: \mu_1 = \mu_2$						$|t_y| > \nu_t: \alpha/2$					
$H_1: \mu_1 \neq \mu_2$						sendo, $\mu_1 = \bar{X}_1$					
						sendo, $\mu_2 = \bar{X}_2$					

A Tabela 27 apresenta a planilha de cálculos para o teste de uma média com desvio-padrão desconhecido [37], na condição de atuação da oscilação magnética com forma de onda quadrada, deslocada para a esquerda, frequência 0,5Hz com defeito à esquerda do sentido da soldagem.

Tabela 27: Comparação entre a média do resultado da soldagem \bar{X} e o valor referência, $\mu_0=20\text{mm}$. Oscilação magnética com forma de onda quadrada, deslocada para a esquerda, frequência 0,5Hz com defeito à esquerda do sentido da soldagem.

Teste de uma média com desvio padrão desconhecido								
Oscilação magnética, onda quadrada 0,5Hz - defeito à esquerda - Corpos de prova I 1 x I 2								
X_n	μ_0	\bar{X}	$\bar{X} - X_n$	$(\bar{X} - X_n)^2$	$S^2_{(X)} = \frac{\sum_{n=1}^n (\bar{X} - X_n)^2}{n-1}$	$S_{(X)} = \sqrt{S^2_{(X)}}$		
19,782493	20	19,666892	-0,115601	0,013364			n	\sqrt{n}
19,623011			0,043881	0,001926			4	2
19,621824			0,045068	0,002031				
19,640240			0,026652	0,000710				
Σ				0,018031	0,006010196	0,07752545	$t_{[n-1]} = \frac{(\bar{X} - \mu_0)}{S_{(X)}/\sqrt{n}}$	
$t_{[n-1]; \alpha/2}$	0,50%	1%	2,50%	Condição do teste		Rejeitar H_0 se;		
	5,841	4,541	3,182	$H_0; \mu = \mu_0$	sendo $\mu = \bar{X}$	$|\mathbf{t}_{[n-1]}| > t_{[n-1]; \alpha/2}$		
				$H_1; \mu \neq \mu_0$				
Conclusão	$|\mathbf{t}_{[n-1]}| =$	8,594	$t_{[n-1]; 0,5\%} =$	5,841				
* Portanto, com 99% de confiabilidade temos que $\mu \neq \mu_0$; ou $\bar{X} \neq 20$								

A Tabela 28 apresenta a planilha de cálculos para o teste de uma média com desvio-padrão desconhecido [37], na condição de atuação da oscilação magnética com forma de onda quadrada, deslocada para a direita, frequência 0,5Hz com defeito à direita do sentido da soldagem.

Tabela 28: Comparação entre a média do resultado da soldagem \bar{X} e o valor referência, $\mu_0=20\text{mm}$. Oscilação magnética com forma de onda quadrada, deslocada para a direita, frequência 0,5Hz com defeito à direita do sentido da soldagem.

Teste de uma média com desvio padrão desconhecido									
Oscilação magnética, onda quadrada 0,5Hz - defeito à direita - Corpos de prova P2 x P1									
X_n	μ_0	\bar{X}	$\bar{X} - X_n$	$(\bar{X} - X_n)^2$	$S^2_{(X)} = \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{X} - X_n)^2}{n-1}$	$S_{(X)} = \sqrt{S^2_{(X)}}$	$t_{[n-1]} = \frac{(\bar{X} - \mu_0)}{S_{(X)}/\sqrt{n}}$		
20,546177	20	20,674251	0,128073	0,016403				n	\sqrt{n}
20,770494			-0,096243	0,009263				4	2
20,666930			0,007320	0,000054					
20,713401			-0,039151	0,001533					
Σ				0,027252	0,009083995	0,09530999	14,14857942		

$t_{[n-1]; \alpha/2}$	0,50%	1%	2,50%
	5,841	4,541	3,182

Condição do teste		Rejeitar H_0 se;
$H_0: \mu = \mu_0$	sendo $\mu = \bar{X}$	$|t_{[n-1]}| > t_{[n-1]; \alpha/2}$
$H_1: \mu \neq \mu_0$		

Conclusão	$|t_{[n-1]}| = 14,149$	$t_{[n-1]; 0,5\%} = 5,841$
-----------	------------------------	----------------------------

* Portanto, com 99% de confiabilidade temos que $\mu \neq \mu_0$; ou $\bar{X} \neq 20$

A Tabela 29 apresenta a planilha de cálculos para o teste entre duas médias, dados não-emparelhados, com desvio-padrão desconhecido e diferente das populações [37], na condição de atuação da oscilação magnética com forma de onda quadrada, deslocada para a esquerda, frequência 0,5Hz x sem oscilação com defeito à direita do sentido da soldagem.

Tabela 29: Comparação entre a média dos resultados da soldagem \bar{X}_1 e \bar{X}_2 .
Oscilação magnética com forma de onda quadrada, deslocada para a esquerda, frequência 0,5Hz x sem oscilação com defeito à direita do sentido da soldagem.

Teste comparativo entre duas médias, dados não-emparelhados, desvios-padrão desconhecidos e diferentes.													
Oscilação magnética, onda quadrada 0,5Hz X Sem oscilação magnética - defeito à esquerda - Corpos de prova I 1 x I 2 e O1 x O2													
X_{n1}	X_{n2}	\bar{X}_1	\bar{X}_2	$S^2_{(d1)}$ [n-1]	$S^2_{(d2)}$ [n-1]	n_1	n_2	$t_c = \frac{(\bar{X}_1 - \bar{X}_2)}{\sqrt{\frac{S^2_{(d1)}}{n_1} + \frac{S^2_{(d2)}}{n_2}}}$	$\hat{\omega}_1 = \frac{S^2_{(d1)}}{n_1}$	$\hat{\omega}_2 = \frac{S^2_{(d2)}}{n_2}$	$n_1 + 1$	$n_2 + 1$	Aspin-Welch $\nu_t = \left\{ \frac{(\hat{\omega}_1 + \hat{\omega}_2)^2}{\left(\frac{\hat{\omega}_1}{n_1+1} \right) + \left(\frac{\hat{\omega}_2}{n_2+1} \right)} \right\} \cdot 2$
19,782493	20,773485	19,666892	20,756914			4	4	-26,9822966	0,0015	0,00013	5	5	3,855012634
19,623011	20,752266			$S^2_{(d1)} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}_n)^2}{n-1}$	$S^2_{(d2)} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}_n)^2}{n-1}$								
19,621824	20,726603			0,0060102	0,00051769								
19,640240	20,775302												
Aproximação "t" de Student, para valores de Aspin-Welch													
$\nu_t =$	3,85501	$\nu_t, \alpha/2$	0,50%	1%	2,50%							Rejeitar H_0 se;	
"t" =	4	4,604	4,604	3,747	2,776							$|t_y| > \nu_t, \alpha/2$	
Conclusão	$|t_y| = 26,9823$	$\nu_t, 0,5\% = 4,604$											
* Portanto, com 99% de confiabilidade temos que $\mu_1 \neq \mu_2$; ou $\bar{X}_1 \neq \bar{X}_2$													

A Tabela 30 apresenta a planilha de cálculos para o teste entre duas médias, dados não-emparelhados, com desvio-padrão desconhecido e diferente das populações [37], na condição da soldagem de atuação da oscilação magnética com forma de onda quadrada, deslocada para a direita, frequência 0,5Hz x sem oscilação com defeito à direita do sentido da soldagem.

Tabela 30: Comparação entre a média dos resultados da soldagem \bar{X}_1 e \bar{X}_2 . Oscilação magnética com forma de onda quadrada, deslocada para a direita, frequência 0,5Hz x sem oscilação com defeito à direita do sentido da soldagem.

Teste comparativo entre duas médias, dados não-emparelhados, desvios-padrão desconhecidos e diferentes.											
Oscilação magnética, onda quadrada 0,5Hz X Sem oscilação magnética - defeito à direita - Corpos de prova P2 x P1 e N1 x N2											
X_{n1}	X_{n2}	\bar{X}_1	\bar{X}_2	$S^2_{(d1)}$ [n-1]	$S^2_{(d2)}$ [n-1]	n_1	n_2	$F_r = \frac{(\bar{X}_1 - \bar{X}_2)}{\sqrt{\frac{S^2_{(d1)}}{n_1} + \frac{S^2_{(d2)}}{n_2}}}$	$W_1 = \frac{S^2_{(d1)}}{n_1}$	$W_2 = \frac{S^2_{(d2)}}{n_2}$	Aspin-Welch $V_t = \left\{ \frac{(\frac{W_1}{(n_1+1)})^2 + (\frac{W_2}{(n_2+1)})^2}{2} \right\}^{-2}$
20,546177	20,098212	20,674251	20,189389			4	4	7,67433775	0,00227	0,00172	7,813462853
20,770494	20,268277			$S^2_{(d1)} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}_1)^2}{n-1}$	$S^2_{(d2)} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}_2)^2}{n-1}$						
20,666930	20,250469			0,009084	0,00688266						
20,713401	20,140597										
Aproximação "t" de Student, para valores de Aspin-Welch											
$V_t =$	7,8135	$V_t, \alpha/2$	0,50%	1%	2,50%						Rejeitar H_0 se;
"t" =	8	3,355	2,896	2,896	2,306						$|t_y| > V_t, \alpha/2$
Conclusão	$|t_y| = 7,67434$		$V_t, 0,5\% = 3,355$								sendo, $\mu_1 = \bar{X}_1$
* Portanto, com 99% de confiabilidade temos que $\mu_1 \neq \mu_2$; ou $\bar{X}_1 \neq \bar{X}_2$											

A Tabela 31 apresenta a planilha de cálculos para o teste entre duas médias, dados não-emparelhados, com desvio-padrão desconhecido e diferente das populações [37], na condição da soldagem de atuação da oscilação magnética com forma de onda quadrada, deslocada para a direita, frequência 0,5Hz x sem oscilação com defeito à direita do sentido da soldagem.

Tabela 31: Comparação entre a média dos resultados da soldagem \bar{Y}_1 e \bar{Y}_2 . Oscilação magnética com forma de onda quadrada, deslocada para a direita, frequência 0,5Hz x sem oscilação com defeito à direita do sentido da soldagem.

Teste comparativo entre duas médias, dados não-emparelhados, desvios-padrão desconhecidos e diferentes.											
Oscilação magnética simétrica, onda senoidal 1,5Hz X Sem oscilação magnética - defeito à direita - Corpos de prova BAZ x BAI e N1 x N2											
Y_{n1}	Y_{n2}	\bar{Y}_1	\bar{Y}_2	$S^2_{(Y1)}$	$S^2_{(Y2)}$	n_1	n_2	$t_y = \frac{(\bar{Y}_1 - \bar{Y}_2)}{\sqrt{\frac{S^2_{(Y1)}}{n_1} + \frac{S^2_{(Y2)}}{n_2}}}$	$\omega_1 = \frac{S^2_{(Y1)}}{n_1}$	$\omega_2 = \frac{S^2_{(Y2)}}{n_2}$	Aspin-Welch
4,466393	3,218264	3,874292	3,414067			4	4				$v = \frac{(\omega_1 + \omega_2)^2}{\left(\frac{\omega_1}{(n_1+1)}\right) + \left(\frac{\omega_2}{(n_2+1)}\right)}$
4,198537	3,353914			$S^2_{(v)} = \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{Y} - v_n)^2}{n-1}$	$S^2_{(v)} = \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{Y} - v_n)^2}{n-1}$						
3,256060	3,590676										
3,576177	3,493414										
				0,308934	0,026481			1,589310402	0,07723	0,00662	3,850921265
Aproximação "t" de Student, para valores de Aspin-Welch											
$t_{\alpha} =$	3,851	$v; \sigma_y$	2,50%	5%	10,00%						
"t" =	4	σ_y	2,776	2,132	1,533						
Conclusão	$|t_y| = 1,589$			$Vt ; 10\% = 1,533$							
* Portanto, com 80% de confiabilidade temos que $\mu_1 \neq \mu_2$; ou $\bar{Y}_1 \neq \bar{Y}_2$											
Condição do teste				Rejeitar H_0 se;							
$H_0: \mu_1 = \mu_2$				$|t_y| >$				$t_{\alpha/2}$			
$H_1: \mu_1 \neq \mu_2$				sendo, $\mu_1 = \bar{Y}_1$				sendo, $\mu_2 = \bar{Y}_2$			