

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE - FURG  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

THAIS ANDREZZA DOS PASSOS

EFEITO DA OSCILAÇÃO MAGNÉTICA DO ARCO  
NA MICROESTRUTURA E NA GEOMETRIA DO CORDÃO DE  
REVESTIMENTO DE AÇO INOXIDÁVEL DEPOSITADOS POR SOLDAGEM  
TIG

Rio Grande – RS

2016

Thais Andrezza dos Passos

EFEITO DA OSCILAÇÃO MAGNÉTICA DO ARCO  
NA MICROESTRUTURA E NA GEOMETRIA DO CORDÃO DE  
REVESTIMENTO DE AÇO INOXIDÁVEL DEPOSITADOS POR SOLDAGEM  
TIG

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande - FURG, como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Dr. Douglas Bezerra de Araújo

Rio Grande – RS

2016



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE - FURG  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica  
PPMec



Ata nº 02/2016 da Defesa de Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande - FURG. Aos vinte e quatro dias do mês de fevereiro de dois mil e dezesseis, foi instalada a Banca de Defesa de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande - FURG, às catorze horas na sala 1103 localizada no prédio 1, da Universidade Federal do Rio Grande - FURG, a que se submeteu a mestranda **Thais Andrezza dos Passos**, nacionalidade brasileira, dissertação ligada a Linha de Pesquisa Engenharia de Soldagem e Materiais do PPMec, com o seguinte título: **Efeito Da Oscilação Magnética Do Arco Na Microestrutura E Na Geometria Do Cordão De Revestimento De Aço Inoxidável Depositados Por Soldagem TIG** referendada pela Câmara Assessora do Curso, os seguintes Professores Doutores José Henrique Alano e Alice Gonçalves Osório, sob a presidência do Professor Douglas Bezerra de Araújo. Analisando o trabalho, os Professores da Banca Examinadora o consideraram:

1. Douglas Bezerra de Araújo: Aprovada
2. José Henrique Alano: APROVADA
3. Alice Gonçalves Osório: APROVADA

Foi concedido um prazo de 20 dias, para o candidato efetuar as correções sugeridas pela Comissão Examinadora (anexo) e apresentar o trabalho em sua redação definitiva, sob pena de não expedição do Diploma. A ata foi lavrada e vai assinada pelos membros da Comissão.

Assinaturas:

1. Douglas B. de Araújo  
CPF: 234012038758
2. José H. Alano  
CPF: 036.950.749.57
3. Alice Osório  
CPF: 690774360/49

Thais Andrezza dos Passos: Thais Andrezza dos Passos

Dedicado à vovó Rosita.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à minha mãe Jussara do Rocio Passos pela dedicação de uma vida inteira e ao meu esposo Gibran Teixeira pelo incentivo e amor.

Ao Engenheiro de Soldagem, parceiro e paciente amigo Daniel Souza pela paciência única e por tanto incentivo nos trabalhos dentro do LAPES – Laboratório de Pesquisa em Engenharia da Soldagem.

Ao também parceiro Professor Dr. Douglas Bezerra de Araújo pela orientação neste trabalho.

Ao paciente Professor Dr. Luciano Volcanoglo Biehl, coordenador do Laboratório de Metalografia pelo máximo apoio na realização deste trabalho.

Aos amigos Adilar G. S. Jr, Daniela L. P. Oliveira, Edilson N. Pollnow, Geordano M. Valadão e Tárique H. Schneider pelos momentos de alegria compartilhados nestes dois breves anos em que trabalhamos e ajudamos uns aos outros dentro dos laboratórios.

Ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande pela oportunidade e à FAPERGS pela concessão da bolsa de estudos.

## RESUMO

O uso de dispositivos para desenvolver processos de soldagem a fim de agregar novas possibilidades de melhoria no produto final é de suma importância para indústria metal-mecânica. A oscilação magnética do arco controlada através da aplicação de um campo magnético externo ao arco surge como uma das formas de alteração da microestrutura dos cordões de solda. Desta forma, o presente trabalho propõe verificar o efeito da oscilação magnética transversal e longitudinalmente à direção de soldagem sobre a microestrutura de depósitos de aço inoxidável austenítico (ER 316LSi) sobre aço comum ao carbono, aplicados pelo processo TIG (*Tungsten Inert Gas*). Para tanto, caracterizou-se a deflexão magnética do arco em função da corrente de soldagem, distância eletrodo-peça (DEP), distância eletroímã-eletrodo (DEE) e tensão de alimentação do eletroímã. Posteriormente foram realizadas amostras variando-se a amplitude da deflexão e a frequência de oscilação a fim de avaliar o resultado na morfologia do cordão e em sua microestrutura. Os depósitos tiveram suas seções transversais analisadas por meio de um microscópio óptico. Os resultados mostraram que a frequência de oscilação não influencia na microestrutura, porém apresenta influência na geometria do depósito.

**Palavras-chave:** TIG; Microestrutura; Oscilação Magnética; Aço Inoxidável.

## ABSTRACT

The use of devices to develop welding processes by adding new possibilities for improvement in the final product is of great importance to the mechanical industry. The magnetic oscillation of the arc, controlled by an applied external magnetic, emerges as a way of changing the microstructure of the weld beads. Thus, the present study proposes to check the effect of transverse and longitudinal magnetic oscillation to the direction of welding on the microstructure of austenitic stainless steel (ER 316LSi) deposits on carbon steel in TIG (*Tungsten Inert Gas*) welding. The magnetic deflection of the arc was characterized as a function of welding current, electrode-to-work distance (EWD), electromagnet-to-electrode distance (EED) and electromagnet voltage. Following, samples were carried out by varying the deflection amplitude and the oscillation frequency. The deposits had their cross sections analyzed through optical microscope. The results showed that the oscillation frequency does not influence the final microstructure, but it affects the geometry of the deposits.

**Key-words:** TIG; microstructure; magnetic oscillation; stainless steel

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema dos equipamentos para soldagem TIG. ....	4
Figura 2 - Processo TIG com alimentação com vareta. ....	5
Figura 3 - Fonte de soldagem com alimentador de arame frio. ....	5
Figura 4 - Esquema de alimentação de arame quente. ....	6
Figura 5 - Arco elétrico processo TIG. ....	6
Figura 6 - Campo magnético gerado em um condutor sólido. ....	7
Figura 7 - Força produzida numa carga positiva em um campo magnético. ....	7
Figura 8 - Diagrama do comportamento do arco. ....	9
Figura 9 - Comportamento das linhas de campo magnético induzido. ....	10
Figura 10 - Imagens do arco elétrico com e sem deflexão magnética. ....	11
Figura 11 - Modelo do defletor de arco elétrico proposto por Greene. ....	12
Figura 12 - Exemplo de equipamentos (eletroímã+tocha). ....	13
Figura 13 - Exemplo de movimentos de deflexão. ....	14
Figura 14 - Eletroímãs utilizados como osciladores de arco. ....	14
Figura 15 - Formas de arco diversas geradas utilizando o eletroímã 14(c). ....	15
Figura 16 - Formas de solidificação para aço inoxidável austenítico. ....	16
Figura 17 - Microestrutura típica de solidificação ferítica-austenítica. ....	17
Figura 18 - Microestrutura resultante dos diversos tipos de solidificação. ....	18
Figura 19 - Micrografias realizadas diferentes frequências de oscilação ....	19
Figura 20 - Vista superior do cordão com e sem oscilação. ....	19
Figura 21 - Efeito do tecimento mecânico no centro do cordão de solda ....	20
Figura 22 - Perfil geométrico desejado do cordão. ....	21
Figura 23 - Geometria do cordão de solda. ....	22
Figura 24 - Bancada de testes. ....	23
Figura 25 - Fonte TIG. ....	24
Figura 26 - Alimentador Automático de Arame. ....	24
Figura 27 - Detalhe do dispositivo para fixação do eletroímã. ....	25
Figura 28 - Alimentador de arame acoplado à tocha de soldagem. ....	26
Figura 29 - Alimentador de arame acoplado à tocha de soldagem. ....	26
Figura 30 - Interface de controle da frequência de oscilação. ....	27
Figura 31 - Interface de controle da frequência de oscilação. ....	28
Figura 32 - Composição química do arame. ....	28

Figura 33 - Configuração da oscilação magnética transversal .....	29
Figura 34 - Configuração da oscilação magnética longitudinal .....	30
Figura 35 - Detalhe da montagem do eletroímã .....	31
Figura 36 - Montagem da câmera fotográfica.....	32
Figura 37 - (a) Esquema da medição da deflexão magnética do arco elétrico. 33	
Figura 38 - (a) Medição da Largura, Reforço e (b) áreas de Reforço e Penetração.....	34
Figura 39 - Densidade de fluxo magnético em função da deflexão do arco.....	36
Figura 40 - Amplitude de deflexão do arco elétrico para DEE = 11,6m.....	37
Figura 41 - Amplitude de deflexão do arco elétrico para DEE = 11,6m.....	38
Figura 42 - Amplitude de deflexão do arco elétrico para DEE=18,2 mm.....	39
Figura 43 - Amplitude de deflexão do arco elétrico para DEE=18,2 mm.....	40
Figura 44 - Macrografias dos cordões com amplitude de deflexão de 6 mm. ..	42
Figura 45 - Macrografias dos cordões com amplitude de deflexão de 7 mm. ..	43
Figura 46 - Relação L/R <i>versus</i> frequência de oscilação (150 A).....	44
Figura 47 - Diluição <i>versus</i> frequência de oscilação (150 A) .....	46
Figura 48 - Macrografias dos cordões com amplitude de deflexão de 12 mm. 48	
Figura 49 - Macrografias dos cordões com amplitude de deflexão de 15 mm. 49	
Figura 50 - Relação L/R <i>versus</i> frequência de oscilação (200 A).....	50
Figura 51 - Diluição <i>versus</i> frequência de oscilação (200 A). .....	52
Figura 52 - Macrografias dos cordões com amplitude de deflexão de 4 mm. ..	54
Figura 53 - Macrografias dos cordões com amplitude de deflexão de 7 mm. ..	55
Figura 54 - Relação R/L <i>versus</i> frequência de oscilação (150 A).....	56
Figura 55 - Diluição <i>versus</i> frequência de oscilação (150 A). .....	57
Figura 56 - Macrografias dos cordões com amplitude de deflexão de 4 mm. ..	58
Figura 57 - Macrografias dos cordões com amplitude de deflexão de 9 mm. ..	59
Figura 58 - Relação R/L <i>versus</i> frequência de oscilação (200 A).....	60
Figura 59 - Diluição <i>versus</i> frequência de oscilação (200 A). .....	61
Figura 60a - Micrografias: Amplitude de deflexão = 6 mm (150 A). .....	63
Figura 60b - Micrografias: Amplitude de deflexão = 6 mm (150 A). .....	64
Figura 61a - Micrografias: Amplitude de deflexão = 7mm (150 A). .....	65
Figura 61b - Micrografias: Amplitude de deflexão = 7mm (150 A). .....	66
Figura 62a - Micrografias: Amplitude de deflexão = 12 mm (200 A). .....	67
Figura 62b - Micrografias: Amplitude de deflexão = 12 mm (200 A). .....	68

Figura 63a - Micrografias: Amplitude de deflexão = 15 mm (200 A). .....	69
Figura 63b - Micrografias: Amplitude de deflexão = 15 mm (200 A). .....	70
Figura 64a - Micrografias: Amplitude de deflexão = 4 mm (150 A). .....	72
Figura 64b - Micrografias: Amplitude de deflexão = 4 mm (150 A). .....	73
Figura 65a - Micrografias: Amplitude de deflexão = 7 mm (150 A) .....	74
Figura 65b - Micrografias: Amplitude de deflexão = 7 mm (150 A). .....	75
Figura 66a - Micrografias: Amplitude de deflexão = 4 mm (200 A) .....	76
Figura 66b - Micrografias: Amplitude de deflexão = 4 mm (200 A) .....	77
Figura 67a - Micrografias: Amplitude de deflexão = 9 mm (200 A). .....	78
Figura 67b - Micrografias: Amplitude de deflexão = 9 mm (200 A). .....	79

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Patentes requeridas ao longo dos anos. ....	12
Tabela 2 - Parâmetros para caracterização da deflexão magnética do arco. ..	31
Tabela 3 - Campo de trabalho para confecção das amostras. ....	33
Tabela 4 - Parâmetros de soldagem. ....	34
Tabela 5 - Amplitude 6 mm - (150 A) .....	87
Tabela 6 - Amplitude 7 mm - (150 A) .....	87
Tabela 7 - Amplitude 12 mm - ( 200 A) .....	87
Tabela 8 - Amplitude 15 mm - (200 A) .....	88
Tabela 9 - Amplitude 4 mm - (150 A) .....	88
Tabela 10 - Oscilação Amplitude 7 mm - (150 A).....	88
Tabela 11 - Amplitude 4 mm - ( 200 A) .....	89
Tabela 12 - Amplitude 9 mm - ( 200 A) .....	89

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>3</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>4</b>
2.1 Soldagem TIG - <i>Tungsten Inert Gas</i> (GTAW - <i>Gas Tungsten Arc Welding</i> ).....	4
2.2 Conceitos da oscilação magnética do arco .....	7
2.3 Equipamentos para controle da oscilação magnética do arco elétrico.....	11
2.4 Microestrutura para aços inoxidáveis austeníticos .....	15
2.4.1 Tipos de Microestrutura na Zona Fundida.....	16
2.5 Microestrutura com a Utilização de Oscilação Magnética do Arco.....	18
2.6 Geometria de Cordões para Revestimento .....	21
2.7 Geometria de Cordões com a Utilização de Oscilação Magnética do Arco.....	22
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>23</b>
3.1 Equipamentos e Montagem Experimental.....	23
3.1.7.1 Interface do controle de oscilação.....	27
3.2 Insumos.....	28
3.3 Configuração para a Deflexão Magnética do Arco.....	29
3.4 Parametrização para Caracterização da Deflexão Magnética do Arco.....	30
3.5 Metodologia para a Medição da Amplitude de Deflexão Magnética do Arco...32	
3.6 Definição do Campo de Trabalho.....	33
3.7 Metodologia para Análise da Geometria do Cordão .....	34
3.8 Metodologia para Análise da Microestrutura do Cordão .....	35
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>36</b>
4.1 Considerações sobre deflexão do arco.....	36
4.2 Considerações sobre geometria do cordão .....	41
4.2.1 Geometria do cordão - oscilação magnética no sentido transversal - corrente nominal 150 A .....	41
4.2.2 Geometria do cordão - oscilação magnética no sentido transversal - corrente nominal 200 A .....	47
4.2.3 Geometria do cordão - oscilação magnética no sentido longitudinal - corrente nominal 150 A .....	53
4.2.4 Geometria do cordão - oscilação magnética no sentido longitudinal - corrente nominal 200 A .....	58
4.3 Considerações sobre a microestrutura do cordão.....	62

4.3.1 Microestrutura do cordão - oscilação magnética no sentido transversal.....	62
4.3.2 Microestrutura do cordão - oscilação magnética no sentido longitudinal .....	71
<b>5 CONCLUSÃO .....</b>	<b>80</b>
<b>6 TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>81</b>
<b>7 REFERÊNCIAS.....</b>	<b>82</b>
<b>APENDICE I.....</b>	<b>87</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Os processos de soldagem a arco são de grande importância para a indústria mundial. Dentre estes processos destaca-se o processo TIG (*Tungsten Inert Gas*) devido a sua característica de estabilidade de arco, o que lhe confere superior qualidade em soldagens de chapas finas. Outra característica importante é que na versão com alimentação de arame frio há o desmembramento entre a energia de soldagem gerada e o volume de material depositado, o que promove maior possibilidade de controle da geometria do cordão de solda.

A busca por soluções de melhoria de qualidade e produtividade impulsionam investimentos em automação, mecanização ou soluções que simplesmente auxiliem a obtenção de melhores resultados na área de soldagem. Dentre as várias técnicas e dispositivos existentes para este fim, uma que ainda carece de estudos é a técnica de oscilação do arco por meio da aplicação de um campo magnético externo, pois as consequências desta oscilação no cordão de solda ainda não são totalmente entendidas.

A oscilação magnética do arco pode, como já mostrado na literatura, promover alterações geométricas e microestruturais no cordão. Uma aplicação deste efeito poderia ser benéfica, por exemplo, em soldagens de revestimento contra corrosão. Sabe-se que a microestrutura governa, em grande parte, a resistência à corrosão do material depositado e, por isso, sua alteração provocaria variações na resistência da camada revestida. Além disso, as alterações geométricas que podem ser provocadas, destacando-se o aumento da molhabilidade do cordão, poderiam melhorar a qualidade das camadas de revestimento.

Desta forma, o objetivo geral deste estudo é avaliar o efeito da oscilação magnética do arco elétrico sobre a geometria do cordão e microestrutura do revestimento de aço inoxidável 316L Si depositado em chapa de aço comum, utilizando o processo de soldagem TIG com alimentação de arame frio.

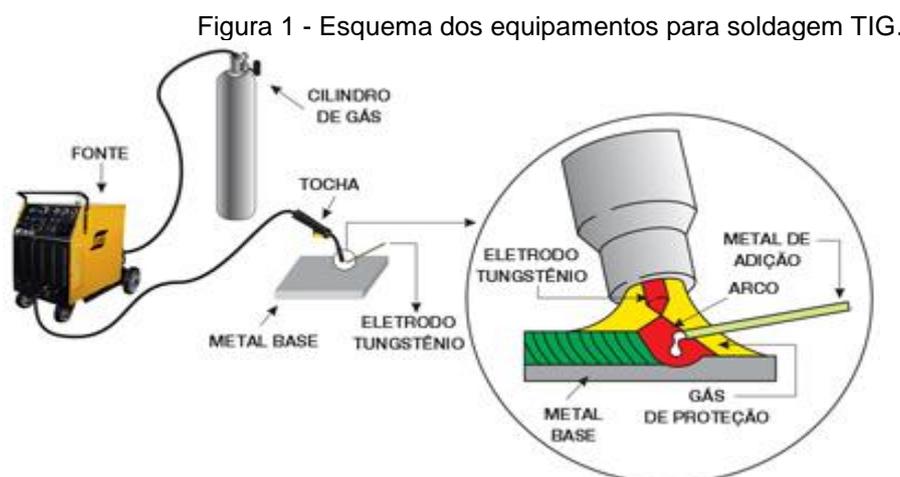
## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A presente seção reúne pontos relevantes sobre processo de soldagem TIG ou GTAW, conceitos sobre oscilação magnética do arco elétrico, descrição de alguns equipamentos para controle da oscilação magnética do arco. Também são apresentadas consequências da utilização da oscilação magnética na microestrutura e na geometria dos cordões de solda.

### 2.1 Soldagem TIG - *Tungsten Inert Gas* (GTAW - *Gas Tungsten Arc Welding*)

O processo TIG caracteriza-se pela soldagem com um eletrodo não consumível de tungstênio e uma atmosfera de gás inerte para proteção. Metais de adição podem ou não ser utilizados neste processo de soldagem. Quando não há adição de metal o processo é chamado de TIG autógeno ou A-TIG.

A figura 1 mostra o esquema de montagem dos equipamentos e um destaque para o funcionamento do arco.



Fonte: ESAB (2014).

As variáveis a serem controladas neste processo são metal-base, escolha do metal de adição (quando houver), pré-aquecimento, o tipo de gás de proteção, o tipo de junta, as posições de soldagem, as características elétricas e as técnicas de soldagem (Wainer, Brandi & Mello, 2004).

Dentre as vantagens do processo TIG pode-se citar: controle da poça de fusão, ótimo acabamento, ótima qualidade das propriedades mecânicas, isento de escória, respingos ou fumos de soldagem, possibilidade de soldagem de chapas muito finas, soldagem de inúmeras ligas metálicas. O processo apresenta limitações a lembrar:

- Baixas taxas de deposição;
- Necessidade de maior coordenação e experiência do soldador no controle da poça de fusão;
- Dificuldade de manter proteção adequada em ambientes com vento;
- Baixa tolerância a contaminantes.

Em relação ao tipo de alimentação utilizada neste processo, pode-se usar uma vareta, no processo manual como ilustrado na figura 2.

Figura 2 - Processo TIG com alimentação com vareta.



Fonte: Guia da soldagem TIG.

Em processos automáticos, pode-se utilizar um arame embobinado (rolos utilizados no processo MIG/MAG<sup>1</sup>) tracionados por um alimentador de arames similar ao do processo MIG/MAG, porém com alimentação fria (sem energização do arame), conforme a figura 3.

Figura 3 - Fonte de soldagem com alimentador de arame frio.



Fonte: ESAB (2014).

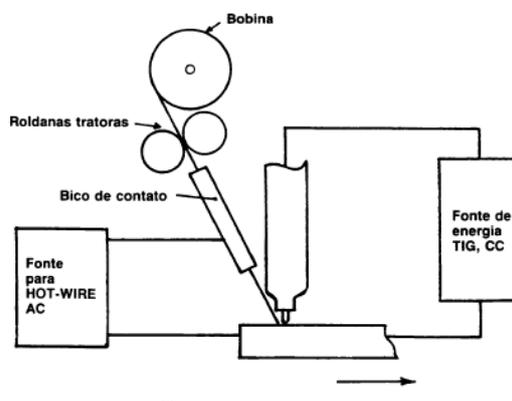
Outra variante seria o processo com arame aquecido (TIG *hot wire*) onde o consumível é aquecido até a temperatura próxima do ponto de fusão antes de entrar

---

<sup>1</sup> MIG/MAG - Sigla para definir *Metal Inert Gas/ Metal Active Gas*. Soldagem a arco elétrico com gás de proteção.

em contato com a poça, ou seja, no final da poça (figura 4). O arame é pré-aquecido por resistência elétrica (Bracarense, 2000).

Figura 4 - Esquema de alimentação de arame quente.



Fonte: Bracarense (2000).

A figura 5 mostra o formato típico do arco elétrico para o processo TIG. Neste caso, um arco formado com eletrodo AWS WTh2, 3,2 mm de diâmetro, corrente de 100 A e gás de proteção argônio puro. As iniciais AWS (*American Welding Society*) indicam a norma utilizada para identificação de eletrodos conforme sua composição química, neste caso AWS A5.12-92. A identificação WTh2, significa que o eletrodo é de tungstênio (ou wolfrâmio) e contém 2% de óxido de tório.

Figura 5 - Arco elétrico processo TIG.



Fonte: Fanara e Vilarinho (2004).

O arco elétrico é um condutor gasoso e pode sofrer desvios por interferências externas, por exemplo, um desequilíbrio do campo magnético no entorno do arco. Este desequilíbrio pode provocar discontinuidades no cordão de solda. O desequilíbrio do arco elétrico também pode ser realizado de forma

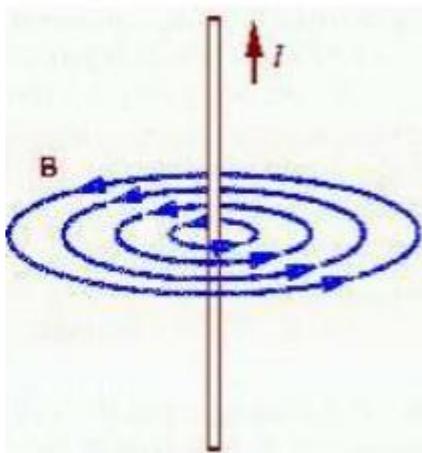
controlada e pode ser então chamado de oscilação do arco. Quando esta oscilação é realizada através de campos magnéticos externos, constitui-se o que se chama de oscilação magnética do arco elétrico.

## 2.2 Conceitos da oscilação magnética do arco

Alguns conceitos sobre eletromagnetismo devem ser abordados para que haja entendimento da ocorrência da oscilação magnética do arco de solda.

Quando uma corrente elétrica atravessa um condutor gera um campo magnético ao redor deste condutor, conforme observado por Orsted<sup>2</sup> e esquematizado na figura 6.

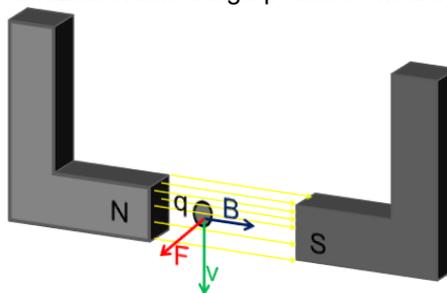
Figura 6 - Campo magnético gerado em um condutor sólido atravessado por uma corrente elétrica.



Fonte: Adaptado de <http://www.geocities.ws> (2015).

Quando uma partícula, eletricamente carregada, viaja através de um campo magnético é submetida a uma força com direção e sentido perpendicular ao campo magnético, conforme mostra a figura 7:

Figura 7 - Força produzida numa carga positiva em um campo magnético.



Fonte: Adaptado de Reis (2009).

<sup>2</sup>ORSTED, Hans Christian. Descobriu que as correntes elétricas podem criar campos magnéticos.

O módulo da força magnética ( $F^{\rightarrow}$ ) é dado pela expressão, proposta por Lorentz<sup>3</sup>:

$$F^{\rightarrow} = q \cdot v^{\rightarrow} \times B^{\rightarrow} \quad (\text{Eq.1})$$

Onde:

q - partícula carregada positivamente

B - campo magnético

F - Força magnética

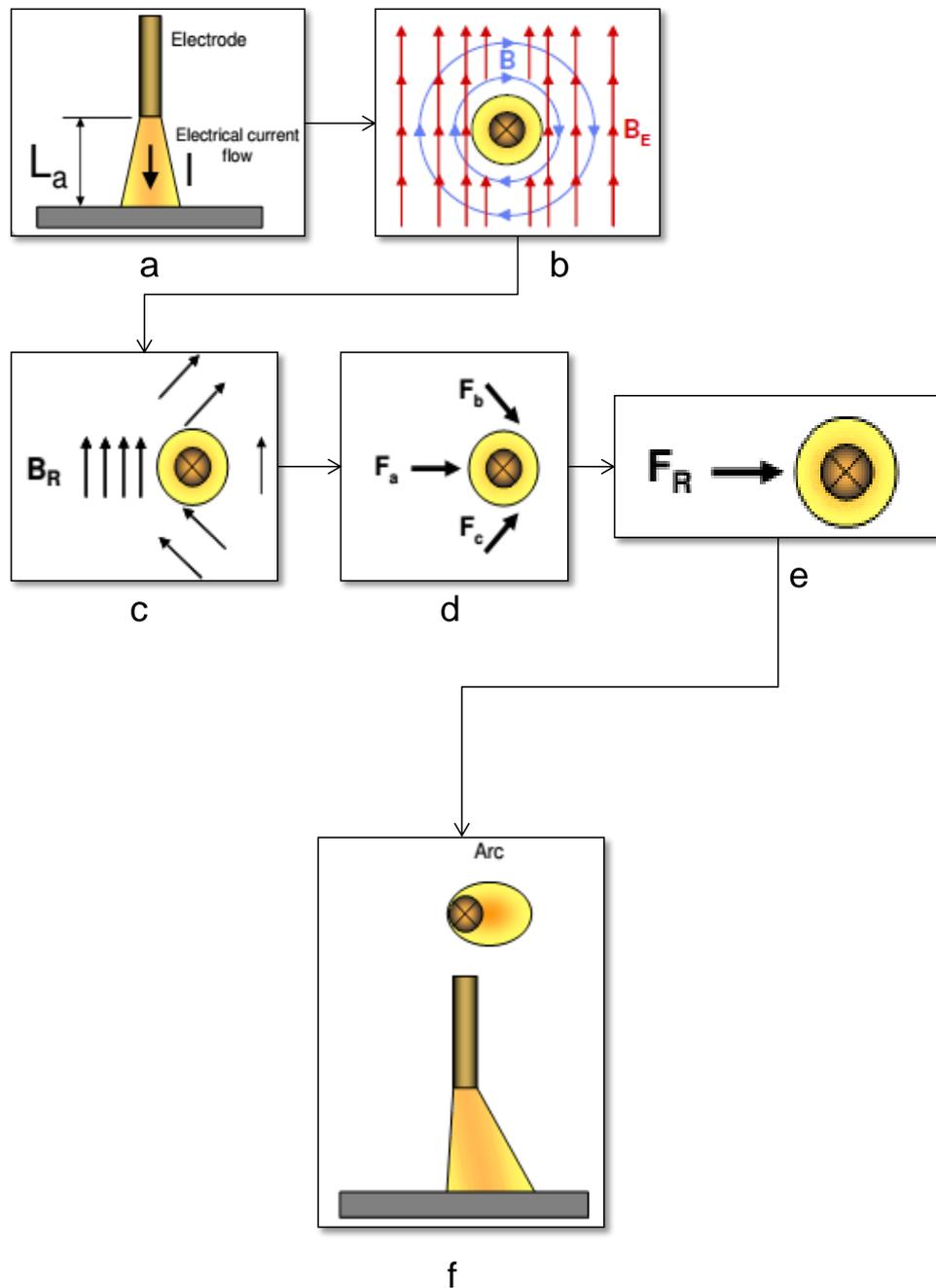
v - velocidade da partícula

A partir dos conceitos vistos, pode-se visualizar como acontece o desvio do arco de solda a partir do diagrama descrito por Reis (2009) na figura 8. O diagrama proposto exemplifica de maneira visual o desvio do arco partindo da premissa que ao existir um fluxo de corrente (i) em um condutor elétrico (a) surge um campo magnético  $B^{\rightarrow}$  concêntrico ao condutor, neste caso o arco elétrico (b). O campo magnético externo ao arco é representado por  $B_E^{\rightarrow}$  e está perpendicular ao campo magnético gerado pelo arco (b). Surge da interação dos campos magnéticos um campo magnético resultante  $B_R^{\rightarrow}$  (c) e no sentido perpendicular a este campo, surgem forças magnéticas representadas por  $F_a^{\rightarrow}$ ,  $F_b^{\rightarrow}$  e  $F_c^{\rightarrow}$  (d). Do somatório destas forças surge a força resultante  $F_R^{\rightarrow}$  (e) que atua no arco elétrico e é responsável pelo desvio do arco elétrico (f).

---

<sup>3</sup> LORENTZ, Hendrik Antoon. Definiu que um campo magnético exerce força sobre uma carga em movimento.

Figura 8 - Diagrama do comportamento do arco sobre atuação de campo magnético externo.



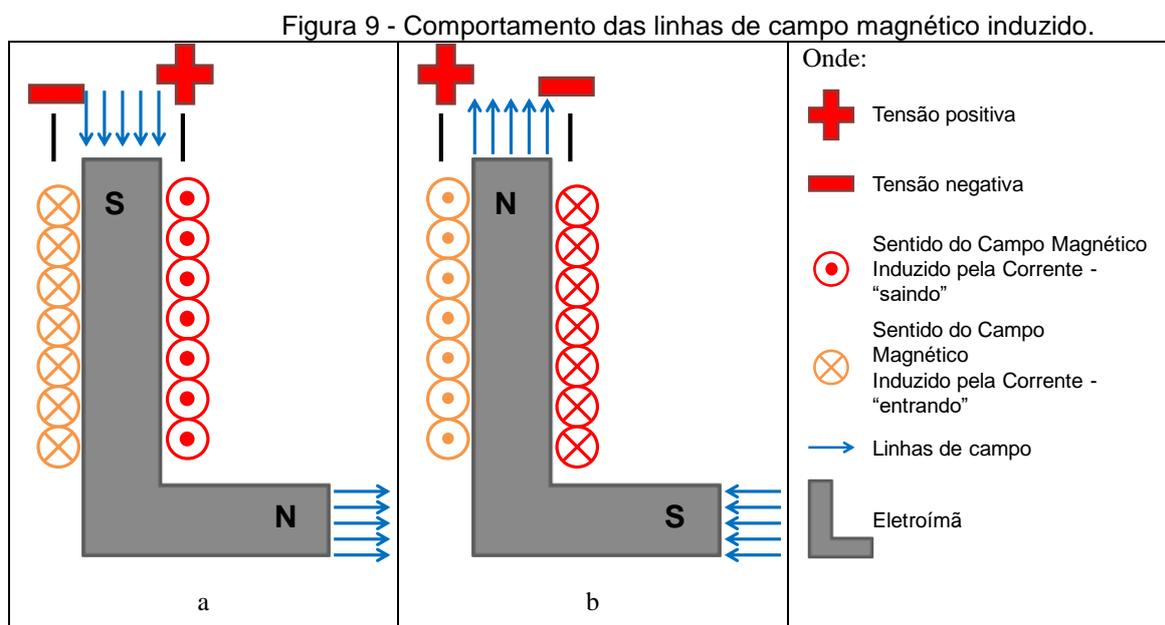
Fonte: Adaptado de Reis (2009).

Em suma, quando há corrente elétrica passando em um condutor, surge um campo magnético. No arco elétrico este campo é radial e concêntrico ao jato. Quando um campo magnético externo atua externamente ao jato de plasma, este sofre um desvio do “caminho natural” dos elétrons devido à força resultante da interação dos campos magnéticos.

Outra descrição para o desvio do arco elétrico foi realizada por Reis, Souza & Scotti (2011), que dizem que há um desvio das partículas carregadas do caminho pretendido na coluna de plasma e este é ocasionado por uma força resultante de um campo magnético que desequilibra o entorno do arco.

A oscilação magnética do arco ocorre quando o campo magnético aplicado externamente inverte o sentido periodicamente em determinadas frequências. Por exemplo, quando uma bobina é acoplada num eletroímã, a corrente que for imposta na bobina induzirá um campo magnético que terá um sentido determinado, dependendo do sentido da corrente, ou seja, quando o sentido da corrente que passa pelo eletroímã é alterado o campo por ela induzido também é alterado. A figura 9 ilustra o sentido do campo para uma bobina acoplada em um eletroímã, vale lembrar que as linhas de campo saem do polo Norte do eletroímã e entram no polo Sul.

Quando a tensão aplicada no eletroímã é positiva as linhas do campo magnético induzido da bobina saem no plano da folha (9a). Quando a tensão aplicada no eletroímã é negativa, as linhas de campo magnético entram do plano da folha (9b) e invertem o sentido do campo magnético invertendo o sentido das linhas do campo magnético no eletroímã.

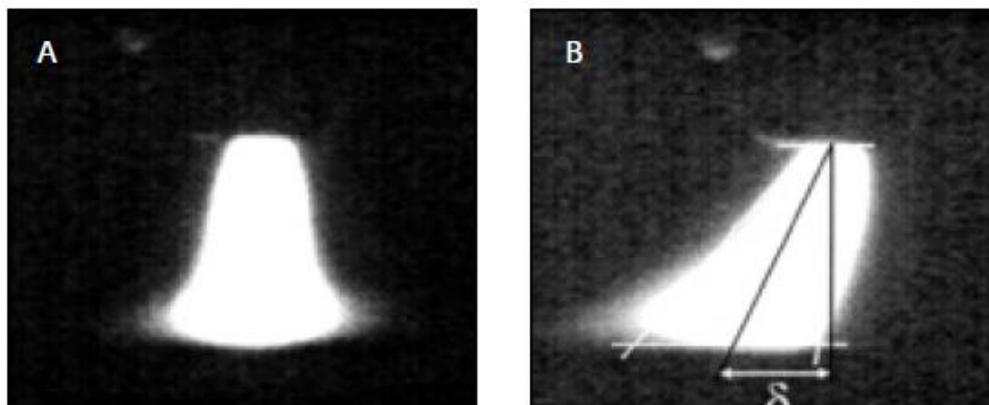


Fonte: A autora.

Desta forma, as partículas carregadas eletricamente que estiverem "viajando" nas linhas de campo do eletroímã estarão submetidas às forças eletromagnéticas e podem ser desviadas do seu caminho natural.

O quanto o arco é afastado do eixo do eletrodo pode ser chamado de amplitude da deflexão. Esta amplitude de deflexão foi medida no estudo de Kang & Na (2002). A figura 10a apresenta o arco sem deflexão, o arco apresentado na figura 10b está defletido por um campo magnético aplicado de forma externa.

Figura 10 - Imagens do arco elétrico com e sem deflexão magnética.



Fonte: Kang & Na (2002).

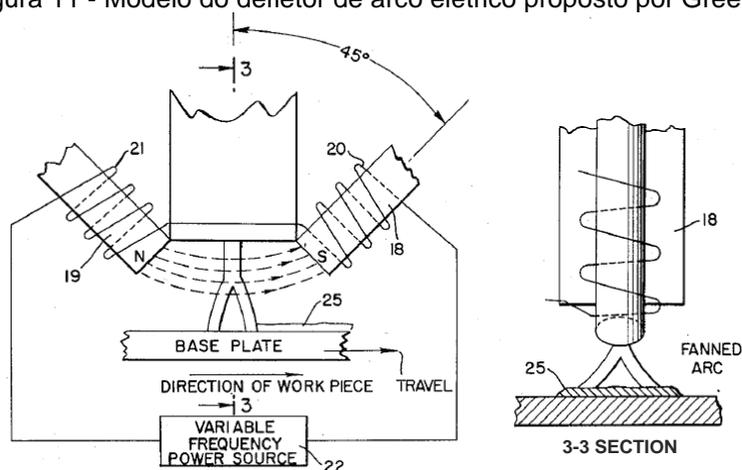
Os mesmos autores afirmam que quanto maior a corrente de soldagem menor é a amplitude de deflexão do arco em virtude da rigidez apresentada no arco. A distância da ponta do eletrodo até a peça a ser soldada também contribui para a amplitude da deflexão do arco; quanto maior a distância maior é a amplitude de deflexão do arco.

O formato da extremidade do eletroímã interfere na amplitude de deflexão do arco. Conforme afirmação de Guilherme (2012), o tipo de extremidade do eletroímã que mais desloca o arco é o formato plano, pois possui maior face direcionada para o arco de soldagem.

### 2.3 Equipamentos para controle da oscilação magnética do arco elétrico

Aplicando os conceitos do eletromagnetismo, Greene (1960) patenteou um oscilador magnético que se utiliza de bobinas para defletir o arco elétrico, como mostra a figura 11. Além dele, vários outros inventores/empresas requereram patentes de equipamentos com a mesma função (tabela 1).

Figura 11 - Modelo do defletor de arco elétrico proposto por Greene.



Fonte: Greene (1960).

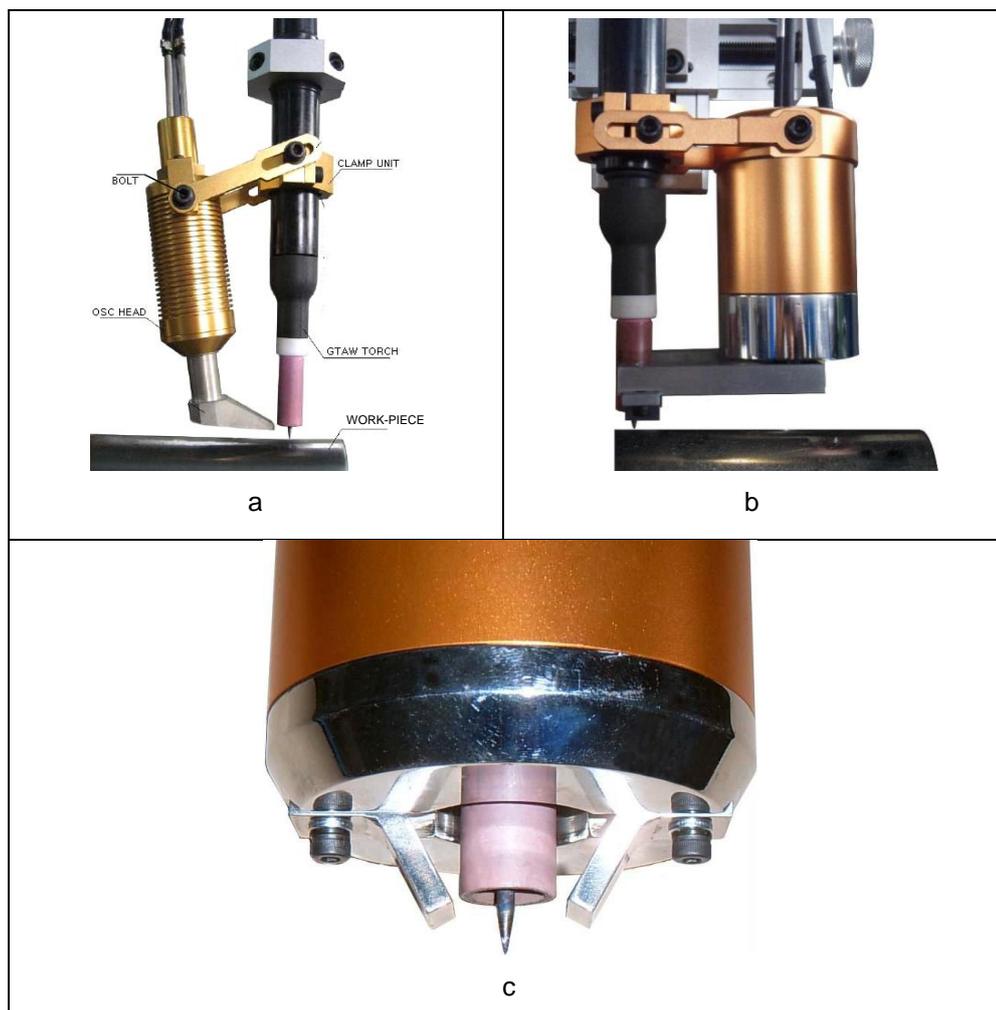
Tabela 1 - Patentes requeridas ao longo dos anos.

Patente	Número da publicação	Ano de depósito
<i>Automatic arc welding</i>	US1667585	1926
<i>Arc welding apparatus with oscillating electrode</i>	US4295031	1979
<i>Arc welding apparatus with oscillating electrode</i>	US4295031A	1979
<i>Method of the welding pipe</i>	WO1998015378A1	1996
<i>System and method for pulse welding</i>	US7271365	2005
<i>Method to improve the characteristics of a root pass pipe weld</i>	US2009/0321402	2009

Fonte: [www.google.com.br/patents](http://www.google.com.br/patents).

Há comercialmente equipamentos para oscilação controlada do arco. Hangil (2015) apresenta bobinas diferentes acopladas em uma tocha TIG, para produzir um campo magnético externo de forma a fazer a oscilação magnética do arco de solda, conforme mostrado na figura 12.

Figura 12 - Exemplo de equipamentos (eletroímã+tocha) comerciais para defletir arcos de soldagem.



Fonte: Hangil (2015).

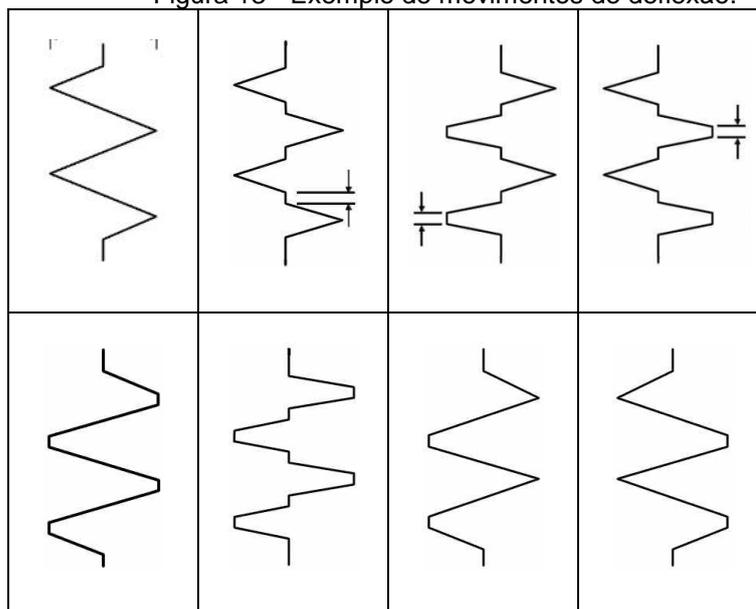
A configuração do equipamento (a) permite que seja realizada oscilação em espaços estreitos e realiza apenas o tecimento<sup>4</sup> sem pré-aquecimento. A montagem dos equipamentos (b) e (c) além da oscilação permite o pré-aquecimento<sup>5</sup> para frente e para trás.

Estes equipamentos especificamente permitem oito tipos de tecimento, dependendo do programa escolhido, conforme a figura 13.

<sup>4</sup> Tecimento é o movimento oscilatório da tocha realizado no sentido transversal à soldagem.

<sup>5</sup> Pré-aquecimento é a aplicação de calor ao metal de base antes de soldar com a finalidade de diminuir a velocidade de resfriamento da solda.

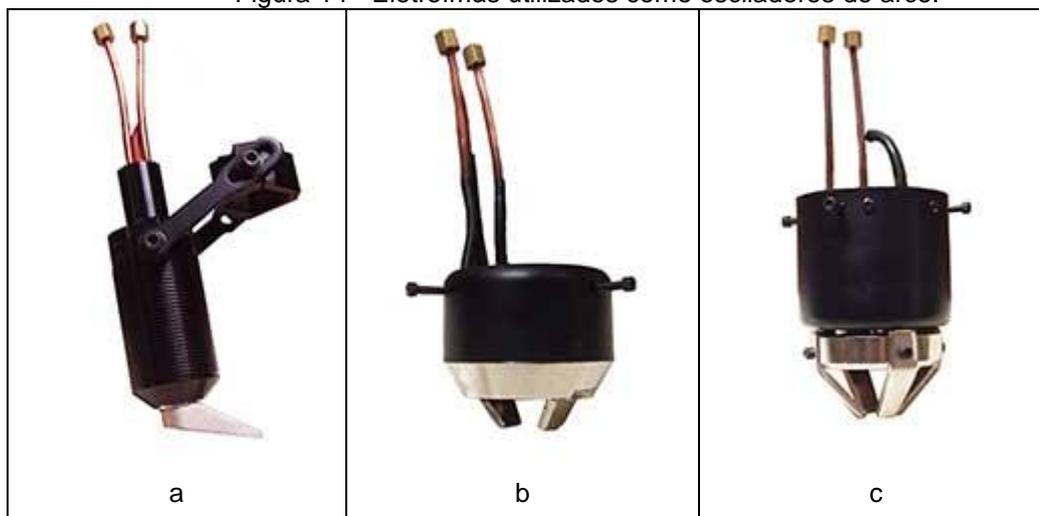
Figura 13 - Exemplo de movimentos de deflexão.



Fonte: Hangil (2015).

Outros equipamentos disponibilizados pela *Arc Products* (2015) são ilustrados na figura 14.

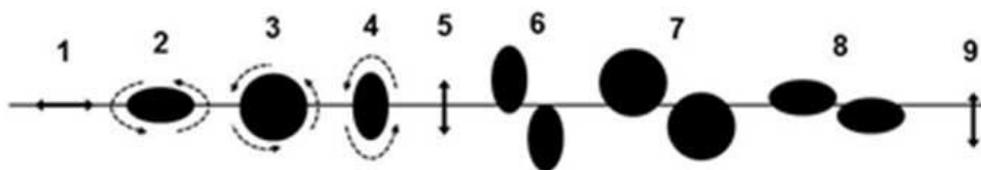
Figura 14 - Eletroímãs utilizados como osciladores de arco.



Fonte: *Arc Products* (2015).

O eletroímã (a) tem apenas um núcleo e é refrigerado a água. O fabricante indica para soldas em juntas estreitas e de acesso restrito. No item (b) o eletroímã tem duas extensões de núcleo e é indicado para oscilação perpendicular ou ao longo de juntas. Muito parecido com este item, o item (c) é um dispositivo com quatro bobinas que são controladas individualmente. Este pode gerar arco de formas apresentadas na figura 15.

Figura 15 - Formas de arco diversas geradas utilizando o eletroímã 14(c).



1-Oscilação em linha reta ao longo da junta	4-Elipse simétrica perpendicular à junta	7-Círculo deslocado
2-Elipse simétrica ao longo da junta	5-Oscilação em linha reta perpendicular à junta	8-Elipse deslocada ao longo da junta
3-Círculo simétrico	6-Elipse deslocada em relação à junta	9-Oscilação em linha reta perpendicular à junta e deslocada

Fonte: Arc Products (2015).

A partir destas formas de oscilação, com estes equipamentos apresentados ou com variações destes equipamentos pode-se pensar em atingir maior precisão no movimento, com frequências diversas e mais facilidade para deflexão magnética do arco de solda.

A deflexão do arco a partir de campo magnético externo pode se dar em linha reta ao longo da junta e perpendicular à junta, conforme indicado na figura 15 (1) e figura 15 (5); ao longo deste trabalho serão assim nomeadas respectivamente de oscilação **longitudinal** e oscilação **transversal**.

A oscilação magnética do arco de solda (transversal ou longitudinal) pode afetar a microestrutura e a geometria do cordão, desta forma, as seções seguintes irão tratar da microestrutura dos aços inoxidáveis austeníticos, especificamente o 316 L, alguns estudos referentes à mudança microestrutural ocasionada pela oscilação magnética do arco, pontos sobre a geometria de cordões para revestimento e alterações provocadas na geometria do cordão pelo fenômeno da oscilação magnética do arco.

#### 2.4 Microestrutura para aços inoxidáveis austeníticos

Os aços inoxidáveis austeníticos tem boa resistência à corrosão e boa soldabilidade, por isso é comum serem utilizados na fabricação de revestimentos protetores contra a corrosão ou contra diversos tipos de desgaste (Silva & Mei, 2010; Modenesi, 2011). Por apresentar baixo índice de carbono em sua composição

química (<0,03%) o aço inoxidável 316L é uma das alternativas utilizadas para evitar a corrosão por sensitização, pois reduzem a precipitação de carbonetos nos contornos de grão (Kou, 2003).

A classe de aço inoxidável austenítico inclui ligas de Fe-Cr-Ni que contêm entre cerca de 6% e 26% de níquel, 16 e 30% de cromo e menos de 0,30% de carbono, como dito anteriormente.

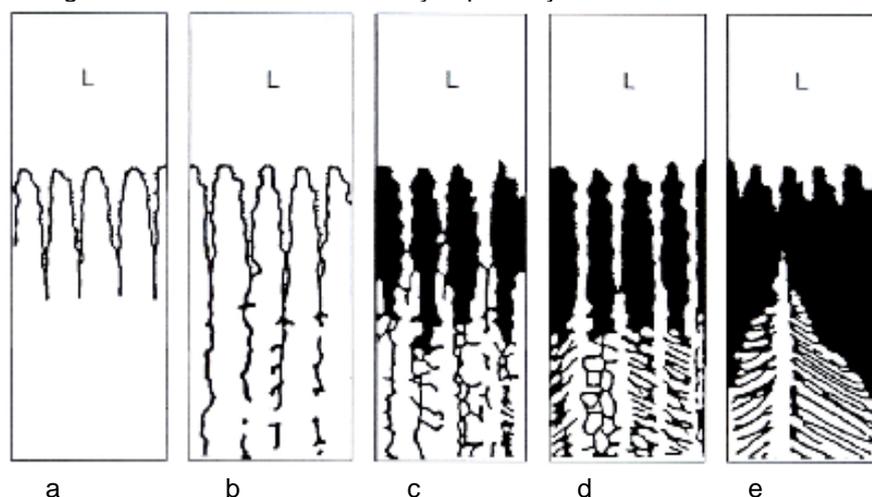
A solidificação destes aços pode iniciar-se com a formação de ferrita e/ou austenita, dependendo da composição química ou da combinação entre os elementos de liga que promovem a formação de ferrita e de austenita.

#### 2.4.1 Tipos de Microestrutura na Zona Fundida

A zona fundida de um cordão de solda de um aço inoxidável austenítico pode apresentar quatro formas de solidificação (figura 16) e transformação no estado sólido:

- Solidificação totalmente Austenítica (figura 16a)
- Solidificação tipo Austenítica-Ferrítica (figura 16b)
- Solidificação Ferrítica-Austenítica (figura 16c e figura 16d)
- Solidificação Ferrítica (figura 16e)

Figura 16 - Formas de solidificação para aço inoxidável austenítico.



Fonte: Suutala *et. al.* (1979).

Uma breve contextualização será abordada a fim de explicar cada uma das formas possíveis de solidificação. As figuras 18a, 18b, 18c, 18d e 18e apresentam a microestrutura resultante para cada tipo de solidificação.

(a) Solidificação totalmente Austenítica (A): o metal solidifica completamente em austenita, nenhuma outra transformação em alta temperatura acontece (figura 18a);

(b) Solidificação tipo Austenítica-Ferrítica (AF): a solidificação inicia-se com a formação de dendritas de austenita, ocorrendo formação de ferrita entre os braços das dendritas (Figura 16b);

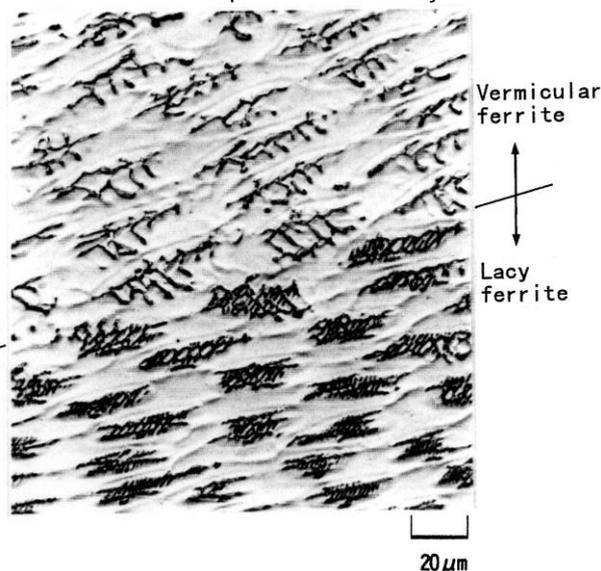
(c) Solidificação Ferrítica-Austenítica (FA): a solidificação inicia-se com a formação de dendritas de ferrita e a austenita é formada posteriormente na interface ferrita-líquido (Figura 18c);

(d) Solidificação Ferrítica-Austenítica (FA): porém com maior fração volumétrica de ferrita (Figura 18d);

(e) Solidificação Ferrítica (F): a ferrita é a única fase a se formar durante a solidificação e a austenita é formada através da transformação de estado sólido (Figura 18e).

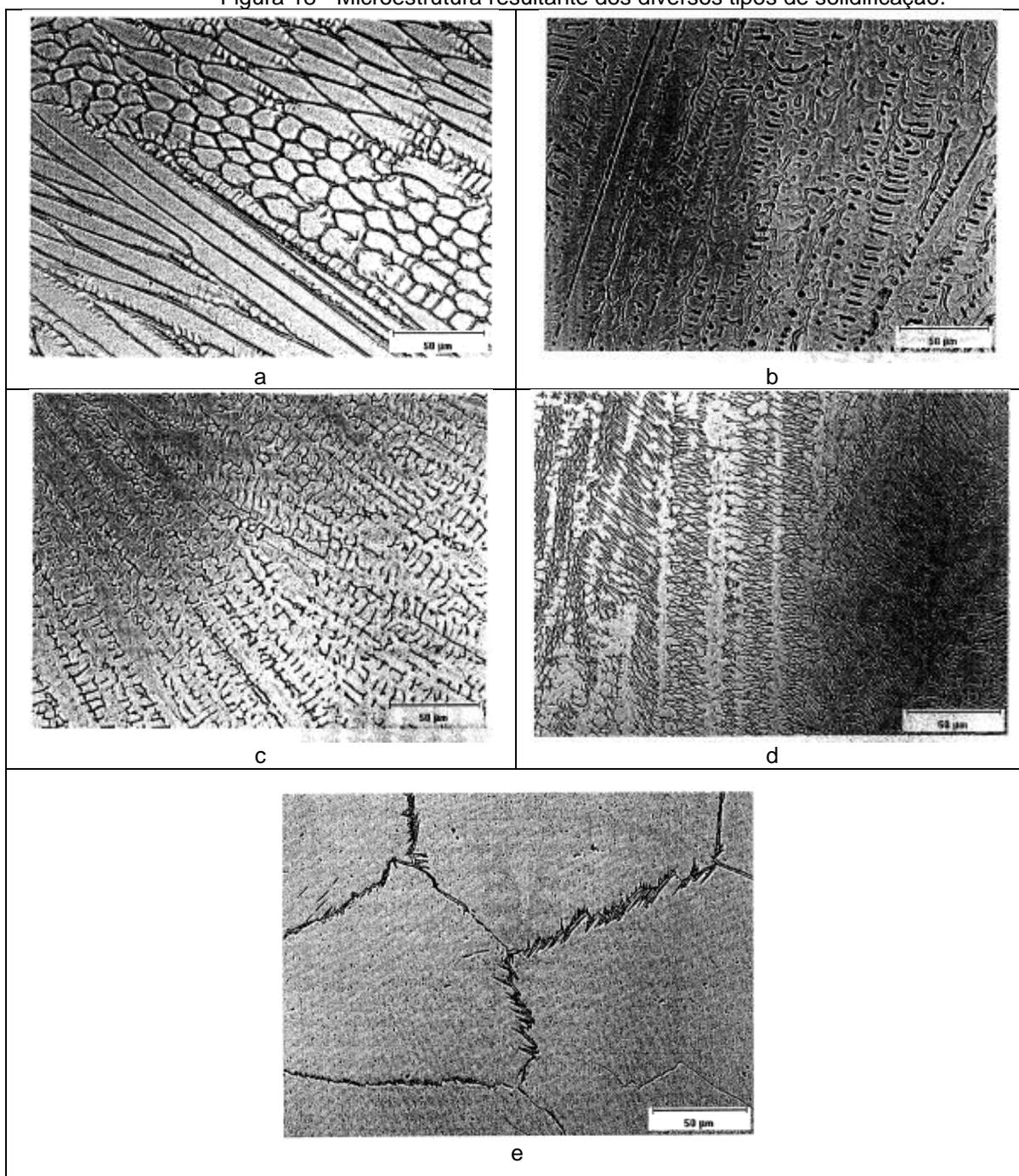
Os autores Inoue e Koseki (2007) em seu estudo sobre a solidificação ferrítica-austenítica mostram uma típica estrutura do modo FA de solidificação (figura 17) e afirmam que o mecanismo de formação dos diferentes tipos de morfologia da ferrita ainda é incerto.

Figura 17 - Microestrutura típica de solidificação ferrítica-austenítica.



Fonte: Inoue e Koseki (2007).

Figura 18 - Microestrutura resultante dos diversos tipos de solidificação.



Fonte: Lippold &Kotecki (2005).

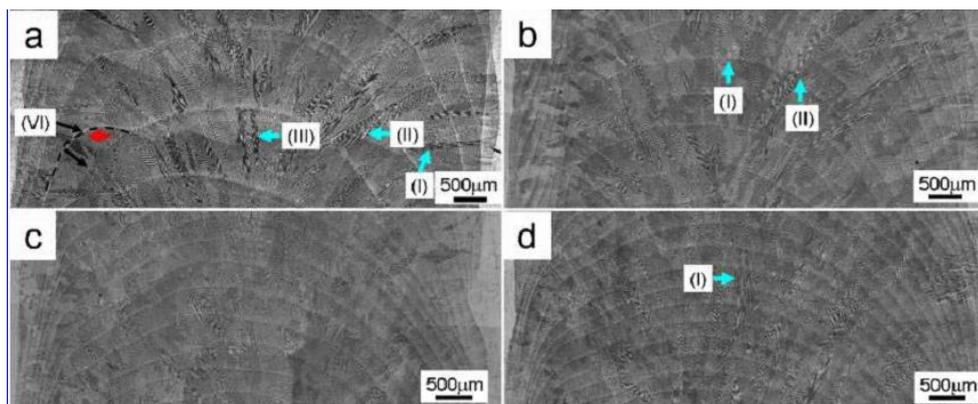
## 2.5 Microestrutura com a Utilização de Oscilação Magnética do Arco

Estudos mostram que a oscilação magnética do arco pode modificar a microestrutura de um material.

Lin *et. al.* (2010) em soldagens com TIG autógeno de uma liga de níquel, utilizaram campos magnéticos externos promovendo movimentos circulares do arco elétrico. As frequências utilizadas foram de 2 Hz, 4 Hz, 7 Hz e 8 Hz. Os autores

observaram refinamento de grão para a frequência de oscilação de 7 Hz (Figura 19). As micrografias apresentadas foram realizadas no topo do cordão com diferentes frequências de oscilação (a) 2 Hz (b) 4 Hz (c) 7 Hz e (d) 8 Hz. A microestrutura da solda realizada com 7 Hz (c) consiste de grãos equiaxiais, enquanto nas outras frequências, marcadas por setas, são visíveis grãos colunares.

Figura 19 - Micrografias realizadas diferentes frequências de oscilação (a) 2 Hz (b) 4 Hz (c) 7 Hz e (d) 8 Hz.

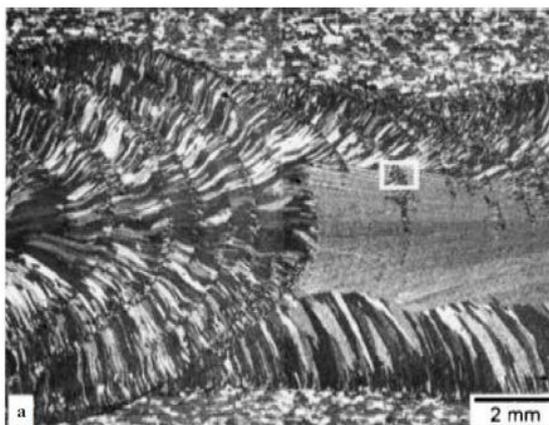


Fonte: Lin et.al.(2010).

Os autores Villafuerte & Kerr (1990) utilizaram-se da mesma técnica de movimentação circular do arco porém em aços inoxidáveis ferríticos (seis ligas diferentes) e austeníticos (304 e 321) e seus resultados relatam que não houve efeitos significantes na microestrutura quando aplicado campo magnético longitudinal e transversal aos cordões.

Mousavi *et. al.* (2003) também utilizando TIG autógeno, porém soldando liga de alumínio AA7020, com frequência de 2 Hz observaram o refinamento do grão (figura 20) e determinaram que este refino seja devido ao destacamento dos grãos do metal de base, conforme teoria proposta por Kou (2003).

Figura 20 - Vista superior do cordão com e sem oscilação magnética do arco.

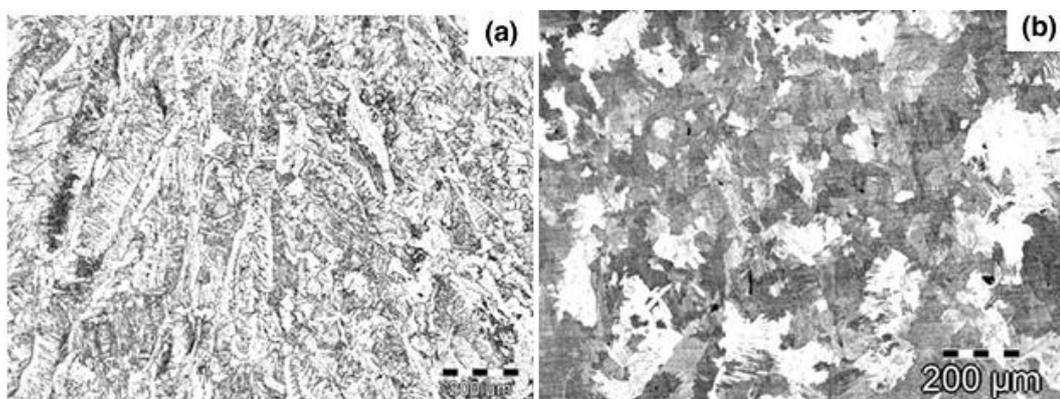


Fonte: Mousavi *et.al.*(2003).

Fasching *et al.* (1997) utilizando também uma liga de alumínio, concluíram que a deflexão do arco perturba o perfil de solidificação da poça de fusão e assim refina o grão da zona fundida.

Já Mahajan *et al.* (2012) usando a técnica de tecimento mecânico soldando aço médio carbono (ASTM A-36) encontraram refino de grão para os parâmetros de 180 A de corrente, 3,6 mm/s de velocidade de soldagem, com frequência de oscilação de 0,7 Hz e amplitude de 1,5 mm (Figura 21).

Figura 21 - Efeito do tecimento mecânico no centro do cordão de solda (a) sem oscilação (b) com oscilação.



Fonte: MAHAJAN, S. *et al.* (2012).

Ao utilizar a deflexão magnética do arco no processo arco submerso, Senapati e Mohanty (2014) verificaram que a oscilação longitudinal à direção de soldagem aumentou a dureza do material.

Ao realizar soldagens TIG em ligas de titânio, também com deflexão magnética, Sundaresan e Ram (1999) obtiveram refino de grão. As soldas com amplitude de oscilação de 0,6 milímetros e frequência de 2,5 Hz tiveram o melhor resultado para refinamento de grão.

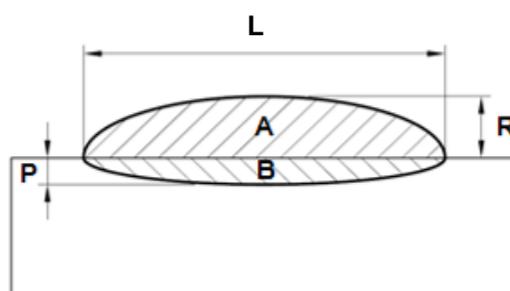
Rao *et al.* (2005) estudaram os efeitos da oscilação magnética na liga de alumínio 2219 que apresenta alto teor de cobre e baixo teor de manganês, ferro, titânio, zircônio e vanádio. Para uma oscilação magnética de forma elíptica e frequência de oscilação de 2 Hz houve refino de grão, mas os autores também atribuem ao fenômeno à presença de titânio e zircônio na liga.

Estes estudos mostram que a oscilação magnética pode alterar a microestrutura de diversas ligas com a utilização de diversos processos de soldagem. Além da microestrutura, a oscilação magnética também pode alterar a geometria de cordões de solda.

## 2.6 Geometria de Cordões para Revestimento

A geometria do cordão de solda para revestimento requer grandes larguras de cordão (L), altos reforços (R), baixas penetrações (P) e baixos percentuais de diluição (D) (figura 22), desta forma há o recobrimento de maior área com menor numero de passes.

Figura 22 - Perfil geométrico desejado do cordão de solda soldagem de revestimento.



Fonte: Adaptado de Gomes (2011).

A diluição é definida como a relação entre a área de penetração (B) e a área total da seção transversal do cordão de solda (A+B). A diluição aumenta quando a área de penetração é aumentada, quando há o aumento da penetração. Este acréscimo aumenta a difusão entre os elementos do metal de base e do metal de adição. Quando há soldagem de materiais diferentes, como no presente estudo, depósito de aço inoxidável 316 L sobre chapa comum ao carbono, tal processo de difusão pode ser prejudicial já que compromete as propriedades finais de resistência à corrosão do material de base. Vários pesquisadores apontam a importância do controle da diluição em revestimentos de aços inoxidáveis (GHOSH *et al.*, 1998; PALANI e MURUGAN, 2007; SHAHI e PANDEY, 2008; BALASUBRAMANIAN *et al.*, 2009).

Murugan e Parmar (1997) sugerem um nível de diluição entre 10% e 15%, para satisfazer a resistência de união entre o metal base e o metal de adição.

Outros autores estudaram parâmetros de soldagem e sua influência na geometria e diluição em revestimentos (BATISTA *et. al*, 2011; SILVA *et. al*, 2014) e concordam sobre a relação entre a largura e o reforço do cordão (R/L) deve ser menor que 30%, sendo que este critério foi definido baseado na experiência de autores como Silva, Ferraresi & Scotti, (2000).

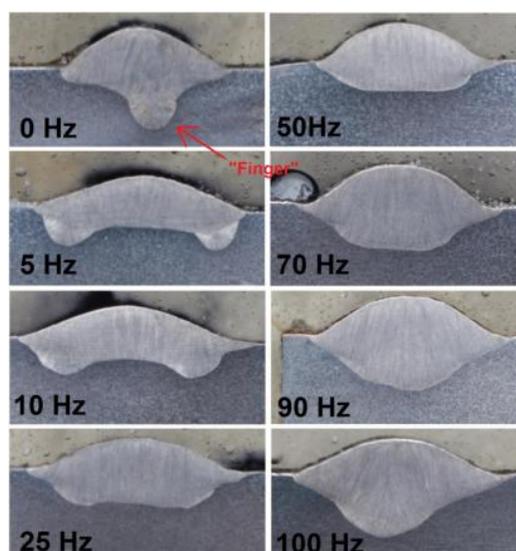
## 2.7 Geometria de Cordões com a Utilização de Oscilação Magnética do Arco

A geometria de cordões de solda é alterada quando são aplicados campos magnéticos externos ao arco. Senapati & Mohanty (2014) observaram que campos magnéticos longitudinais ao cordão de solda afetam a largura do cordão e tendem a diminuí-la, além disso, relatam que as propriedades mecânicas também são afetadas.

Sharma *et. al* (2014) no estudo sobre definir a eficácia do campo magnético na junta soldada concluiu que soldas realizadas sob influência de campos magnéticos externos afetam a qualidade e a geometria da junta. Relatam que o campo magnético aplicado transversal à direção de solda aumenta a largura do cordão, bem como o aumento da intensidade do campo magnético. Porém com o aumento da intensidade do campo a penetração é diminuída, assim como a altura do reforço.

Utilizando o processo GMAW, Corradi *et. al.* (2015), depositaram arame ER308LSi sobre chapas de AISI 316 e afirmam que para variações da frequência de oscilação do arco elétrico de 0 até 100 Hz não ocorrem modificações da microestrutura e do perfil de dureza, porém há mudança na geometria do cordão e na diluição (Figura 23). Ainda sobre propriedades mecânicas Mahajan *et. al.* (2012) afirmaram que oscilação magnética aumentou o limite de escoamento, o limite de ruptura e o alongamento do material, porém teve pouco efeito no perfil de dureza do cordão.

Figura 23 - Geometria do cordão de solda em função da frequência de oscilação.



Fonte: CORRADI, D. R. *et al.* (2015).

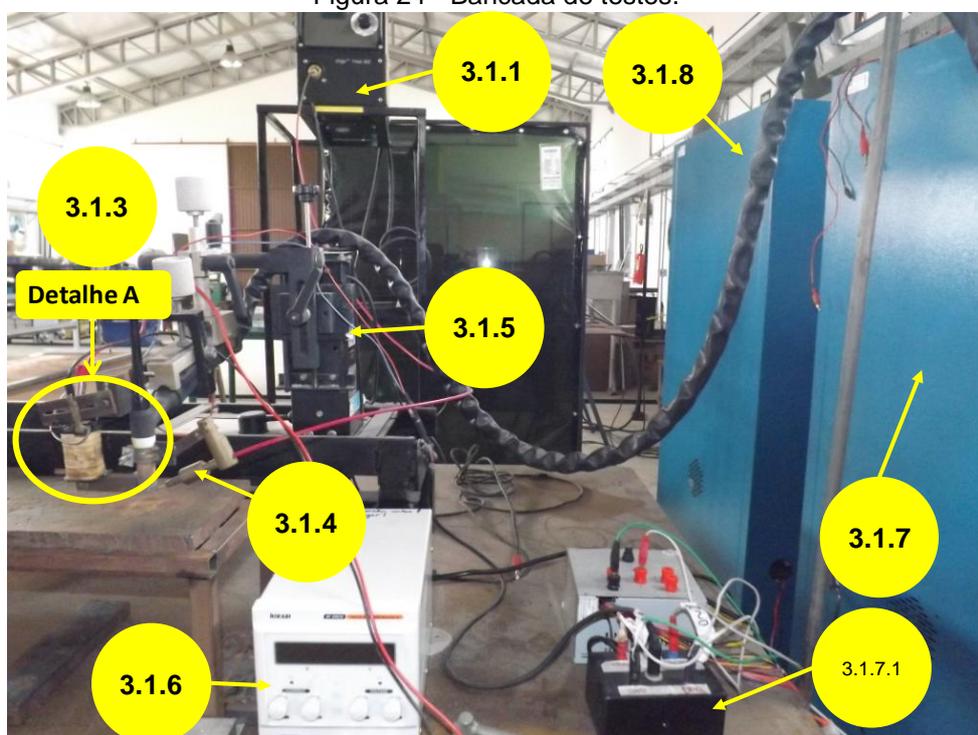
### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo objetiva descrever os equipamentos, materiais e consumíveis empregados bem como os procedimentos experimentais utilizados.

#### 3.1 Equipamentos e Montagem Experimental

Os equipamentos utilizados neste estudo e suas respectivas montagens serão mostrados detalhadamente com a numeração indicada na bancada de testes. Primeiramente uma visão geral da bancada de testes é mostrada na figura 24.

Figura 24 - Bancada de testes.



Fonte: A autora.

##### 3.1.1 Fonte e Cabeçote de Alimentação

Para a realização dos cordões de solda foi utilizada uma fonte de soldagem do tipo retificador com característica estática de corrente constante modelo Heliarc 355 do fabricante ESAB, exibida na figura 25.

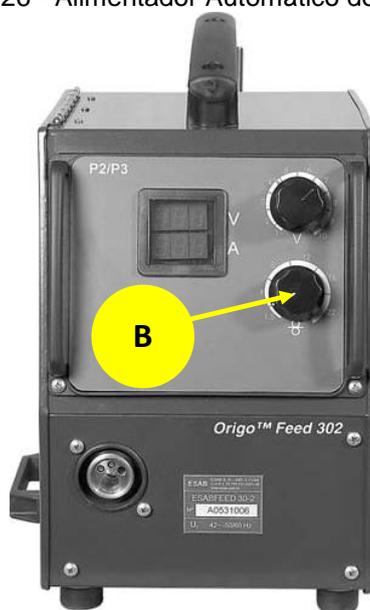
Figura 25 - Fonte TIG.



Fonte: ESAB (2006).

Para alimentação automática do arame foi utilizado o cabeçote para alimentação automática de arame frio modelo Origo™ Feed 302 do fabricante ESAB (figura 26). A velocidade de alimentação do arame pode ser controlada através do potenciômetro de controle de velocidade evidenciado no detalhe B.

Figura 26 - Alimentador Automático de Arame.



Fonte: ESAB (2006).

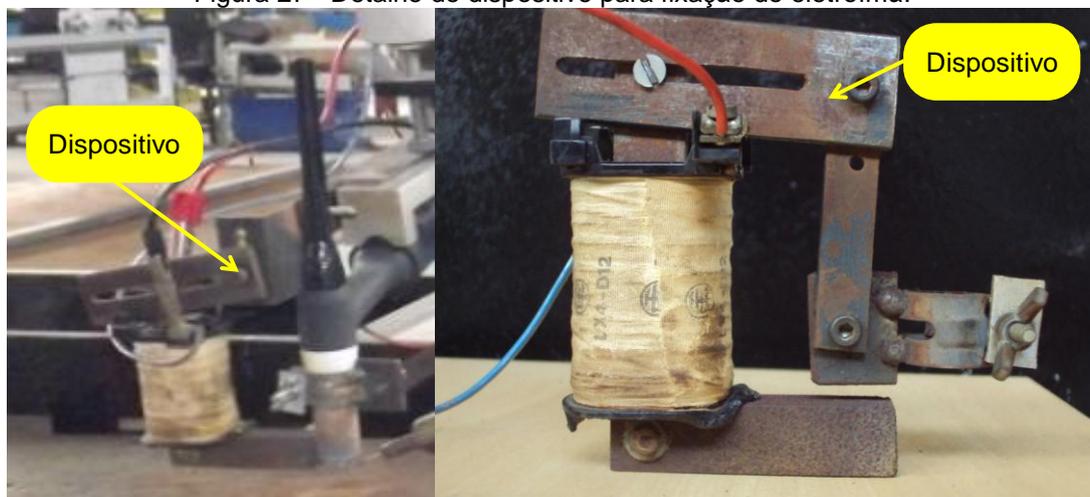
### 3.1.2 Tocha

A tocha utilizada foi uma tocha TIG refrigerada a gás, do tipo manual com capacidade máxima de corrente de 200 A. O detalhe A da bancada de testes mostra, acoplados na tocha TIG, um eletroímã e um sistema de alimentação de arame frio evidenciados a seguir.

### 3.1.3 Eletroímã (detalhe A)

O dispositivo para acoplamento do eletroímã à tocha (figura 27) foi realizado no LAPES<sup>6</sup> de modo a permitir a alteração da distância eletrodo-eletroímã.

Figura 27 - Detalhe do dispositivo para fixação do eletroímã.



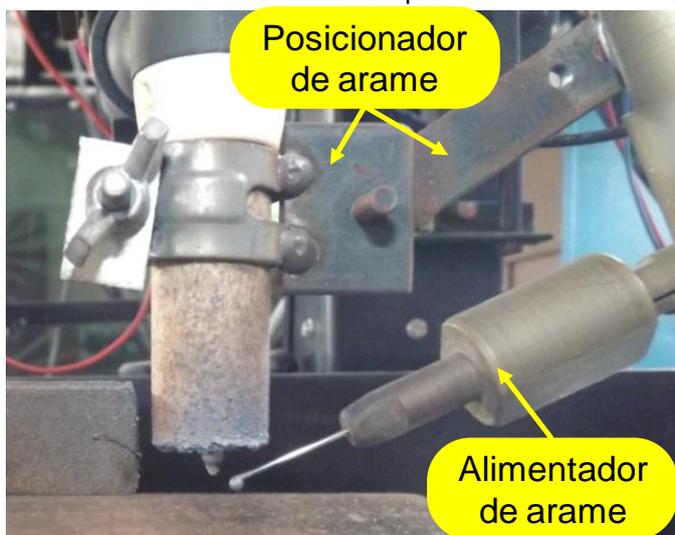
Fonte: A autora.

### 3.1.4 Alimentador de arame

O direcionamento da entrada do arame (metal de adição) na poça de fusão foi realizado através de outro dispositivo, confeccionado no LAPES, também acoplado à tocha sendo que este permitia a movimentação do arame de forma a direcioná-lo para dentro do arco de solda (figura 28).

<sup>6</sup> Laboratório de Pesquisa em Engenharia da Soldagem da Universidade Federal do Rio Grande.

Figura 28 - Alimentador de arame acoplado à tocha de soldagem.

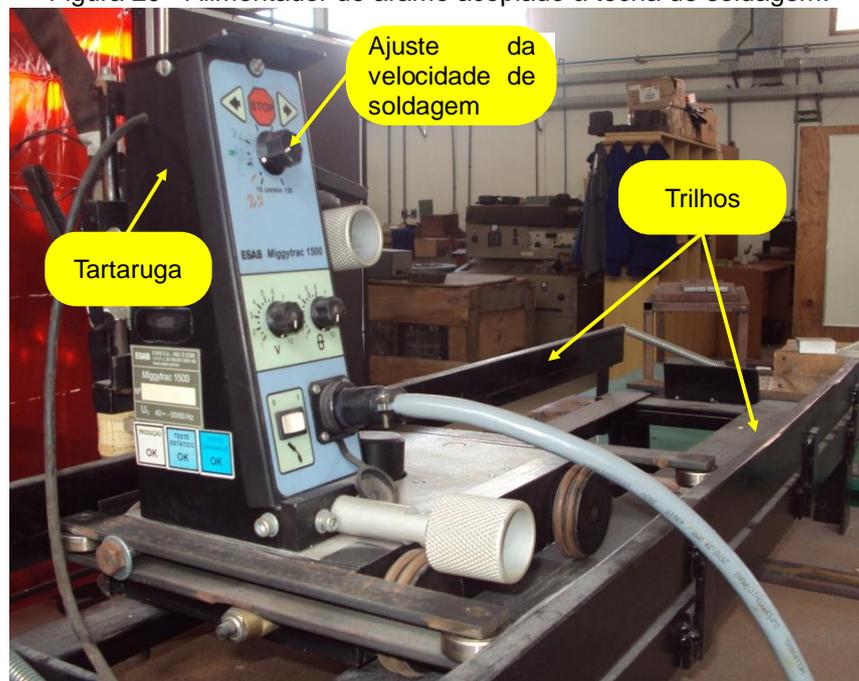


Fonte: A autora.

### 3.1.5 Tartaruga

O deslocamento da tocha, para a confecção dos cordões de solda, deu-se pela movimentação da tartaruga (figura 29) que permitia a mudança da velocidade de soldagem. A tartaruga movimenta-se de forma constante sobre os trilhos mostrados na figura.

Figura 29 - Alimentador de arame acoplado à tocha de soldagem.



Fonte: A autora.

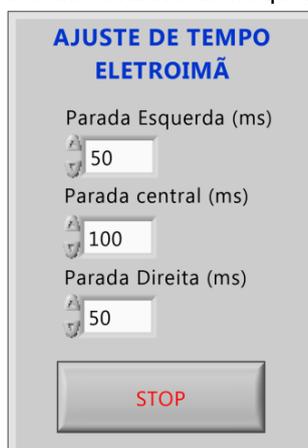
### 3.1.6 Fonte de alimentação do eletroímã

Foi utilizada uma fonte chaveada, com corrente máxima de 3 A, com possibilidade de variação de tensão entre 0 V até 30 V para aplicar diferentes tensões no eletroímã de forma a variar a amplitude de deflexão do arco elétrico.

### 3.1.7 Sistema de controle de oscilação

A frequência de oscilação foi controlada através de um *software* (implementado em ambiente LABVIEW®) que acionava a interface de controle e que permite o ajuste dos tempos de paradas laterais (esquerdo e direito) e central (figura 30).

Figura 30 - Interface de controle da frequência de oscilação.



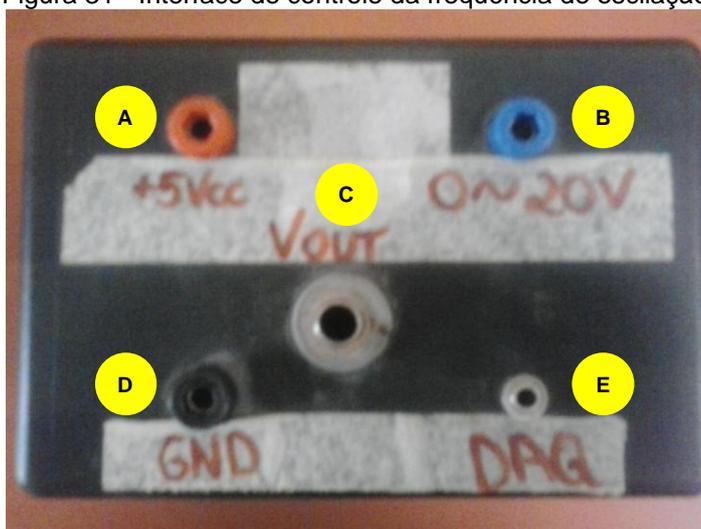
Fonte: A autora.

#### 3.1.7.1 Interface do controle de oscilação

A interface entre o sistema de controle da oscilação e o eletroímã foi realizada por uma placa de controle (figura 31) onde:

- A - Alimentação da placa;
- B - Tensão de alimentação do eletroímã (variação de 0 V a 20 V);
- C - Tensão de saída;
- D - Terra;
- E - Conexão com a placa para controle da oscilação.

Figura 31 - Interface de controle da frequência de oscilação.



Fonte: A autora.

### 3.1.8 Sistema de aquisição de dados

Para a medição dos valores médios dos parâmetros de soldagem foi utilizado um sistema de aquisição de dados do fabricante IMC modelo SAP-V 4.01. O sistema de aquisição possibilita medir os valores da corrente de soldagem na faixa de -600 a 600 A com resolução de 0,8 A, tensão de soldagem na faixa de -100 a 100 V e velocidade de alimentação de arame na faixa de 0 a 500 m/min com resolução de 0,1 m/min. A taxa de aquisição dos sinais é de 5 kHz por canal.

### 3.2 Insumos

Os cordões de solda foram realizados em placas de teste com dimensão de 9,5 mm x 40 mm x 200 mm confeccionadas de chapas de aço comum ao carbono. O metal de adição utilizado foi da classe AWS ER 306LSi de diâmetro de 1,0 mm e composição química apresentada na figura 32. Também foi utilizado eletrodo não consumível, dopado com tório, da classe AWS A 5.12 EWTh-2 com afiação em 60° e diâmetro de 3,2 mm e gás de proteção Argônio puro com vazão de 12 l/min.

Figura 32 - Composição química do arame.

	<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>Ni</b>	<b>Cr</b>	<b>Mo</b>
AWS A5.9 ER316LSi	<0,03	0,80	1,80	12,00	18,50	2,70

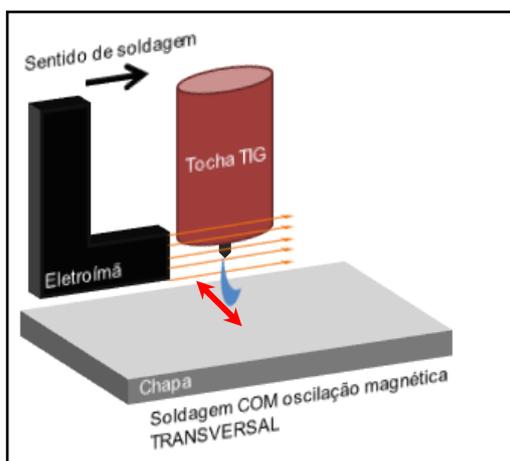
Fonte: Esab (2015).

### 3.3 Configuração para a Deflexão Magnética do Arco.

A deflexão do arco elétrico foi gerada por campo magnético externo ao arco. A configuração apresentada no detalhe da figura 27 permite que sejam realizadas oscilações magnéticas transversais ao sentido de soldagem, conforme ilustrado na figura 33.

A direção da força magnética resultante é transversal ao sentido de soldagem, consequentemente transversal ao cordão de solda formado. O sentido da força magnética é alternado conforme indicado pela seta vermelha da figura 33.

Figura 33 - Configuração da oscilação magnética transversal ao cordão de solda.

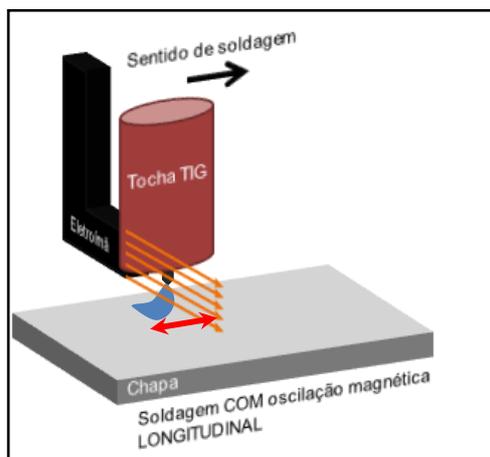


Fonte: A autora.

As linhas ilustradas na figura 33, que saem do polo norte do eletroímã, são as linhas de campo do eletroímã quando neste está aplicada uma tensão positiva. Quando a tensão aplicada no eletroímã é negativa, o arco sofre a deflexão, em virtude da resultante da força magnética no sentido contrário ao apresentado na figura 33. Desta forma, o arco está oscilando de forma transversal ao sentido de soldagem e as consequências desta oscilação serão chamadas ao longo dos resultados de oscilação magnética transversal.

O arco também pode oscilar magneticamente de forma longitudinal ao sentido de soldagem com a alteração da posição do eletroímã, conforme mostra a seta na figura 34.

Figura 34 - Configuração da oscilação magnética longitudinal ao cordão de solda.



Fonte: A autora.

O arco apresentado está oscilando para a esquerda e está desta forma, pois a tensão aplicada na bobina do eletroímã é positiva. Quando a tensão aplicada no eletroímã é negativa o arco sofre a deflexão para a direita. Este tipo de oscilação magnética será então nomeado de oscilação magnética longitudinal.

### 3.4 Parametrização para Caracterização da Deflexão Magnética do Arco

A fim de avaliar o comportamento da amplitude de deflexão magnética do arco mediante a diferença de distâncias entre o eletroímã e o eletrodo, optou-se por arbitrar duas distâncias diferentes entre o eletroímã e o eletrodo de tungstênio:

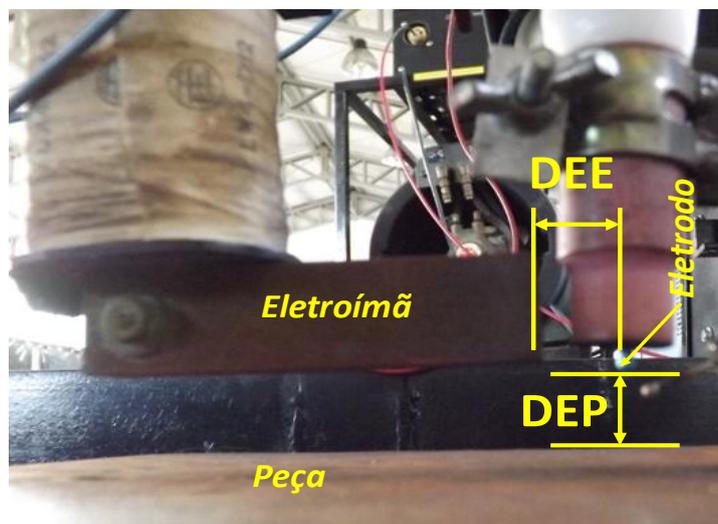
DEE= 11,6 mm e DEE= 18,2 mm;

Também foram arbitradas diferentes distâncias eletrodo-peça a saber:

DEP= 4,0 mm, DEP= 6,2 mm e DEP= 9,5 mm.

A próxima ilustração (figura 35) mostra a configuração do eletroímã acoplado à tocha TIG. No detalhe é possível visualizar a distância eletrodo-peça, denominada DEP bem como a distância eletrodo-eletroímã descrita aqui como DEE.

Figura 35 - Detalhe da montagem do eletroímã acoplado à tocha de soldagem.



Fonte: A autora.

A partir das distâncias definidas, foram aplicadas, arbitrariamente, no eletroímã tensões diferentes de forma a defletir o arco elétrico gerado pelo processo TIG. As tensões aplicadas no eletroímã partiram da fonte chaveada e variaram nas seguintes tensões -17 V, -12 V, -5 V, -3 V, +3 V, +5 V, +12 V e 17 V.

As correntes nominais ajustadas foram de 60 A, 90 A, 150 A e 200 A produzindo correntes de soldagem de aproximadamente 70 A, 105 A, 166 A e 205 A de forma a avaliar o comportamento da amplitude da deflexão do arco para as diferentes distâncias de eletrodo-eletroímã.

A tabela 2 resume os parâmetros utilizados para a caracterização da deflexão magnética do arco:

Tabela 2 - Parâmetros para caracterização da deflexão magnética do arco.

<b>DEE</b>	<b>11,6</b>			<b>18,2</b>		
DEP	4	6,2	9,5	4	6,2	9,5
Corrente nominal / Corrente de soldagem (A)	60 / 70			60 / 70		
	90 / 105			90 / 105		
	150 / 166			150 / 166		
	200 / 205			-		
Tensão aplicada no Eletroímã (V)	-17 / 17			-		
	-12 / 12			-12 / 12		
	-5 / 5			-5 / 5		
	-3 / 3			-3 / 3		

Fonte: A autora.

### 3.5 Metodologia para a Medição da Amplitude de Deflexão Magnética do Arco.

A partir da abertura do arco elétrico, partindo de um dos parâmetros apresentados, foi possível iniciar a medição da amplitude de deflexão do arco. Foram capturadas de cinco a dez imagens para cada tensão aplicada no eletroímã.

A medição da amplitude de deflexão do arco foi realizada através de imagens capturadas do arco elétrico. As imagens foram capturadas por câmera fotográfica FUJIFILM Finepix S4400 configurada da seguinte forma: sensibilidade ISO64, abertura do obturador F8.0 e velocidade do obturador 1/2000 segundos. À frente da câmera foi utilizado filtro de tonalidade 6 para melhor visualização do arco elétrico. Um tampão para proteção foi utilizado à frente da câmera conforme mostra a figura 36.

Figura 36 - Montagem da câmera fotográfica com filtro e tampão para proteção.



Fonte: A autora.

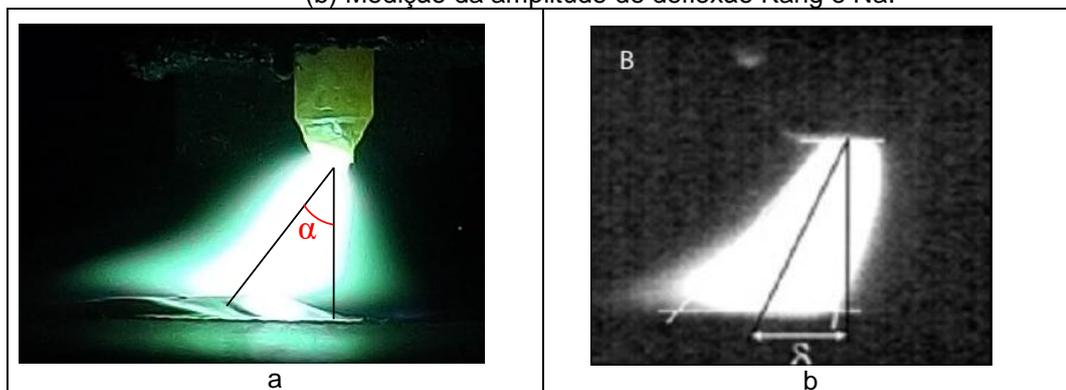
Após a captura das imagens, foi realizada a medição dos valores médios de amplitude de deflexão utilizando o software ImageJ, onde foi possível medir o ângulo entre a deflexão e a reta que passa pelo centro do eletrodo. Esta metodologia permite a medição da extensão da deflexão para cada uma das tensões aplicadas, conforme mostrado na figura 37a. A metodologia utilizada para medição da amplitude de deflexão foi similar à adotada por Kang e Na (2002) em seu trabalho de modelamento numérico para deflexão magnética do arco elétrico (figura 37b).

É possível calcular a deflexão, que é o quanto o arco elétrico deflete em milímetros, a partir da tangente do ângulo medido:

$$\tan \alpha = \frac{\text{Cateto Oposto}}{\text{Cateto Adjacente}}, \quad (\text{Eq. 2})$$

Onde:  $\alpha$  = ângulo medido; Cateto oposto = deflexão magnética em milímetros e; Cateto adjacente = DEP.

Figura 37 - (a) Esquema da medição da deflexão magnética do arco elétrico (tensão -17 V, DEE=11,6mm, DEP=6,2mm, 150A), (b) Medição da amplitude de deflexão Kang e Na.



Fonte: (a) A autora, (b) Kang e Na (2002).

A caracterização da amplitude de deflexão do arco elétrico para as distâncias DEE= 11,6 mm e DEE= 18,2 mm estão apresentadas no item 4 Resultados e Discussão, subitem 4.1 Considerações sobre deflexão do arco.

### 3.6 Definição do Campo de Trabalho

Conhecidas as variações de amplitudes do arco para cada condição de corrente de soldagem, definiu-se então o campo de trabalho para a oscilação transversal e longitudinal além de serem definidas as frequências de oscilação, mostrada na tabela 3.

Tabela 3 - Campo de trabalho para confecção das amostras.

Oscilação	DEE (mm)	DEP (mm)	Corrente Nominal (A)	Amplitude de deflexão - Tensão no Eletroímã	Amplitude de deflexão - Tensão no Eletroímã	Frequência de Oscilação (Hz)
Transversal	11,6	6,2	150	6 mm - 12 V	7 mm - 17 V	0,5
Transversal		6,2	200	12 mm - 12 V	15 mm - 17 V	1
Longitudinal		9,5	150	4 mm - 5 V	7 mm - 12 V	5
Longitudinal		9,5	200	4 mm - 5 V	9 mm - 12 V	10
						20
						30

Fonte: A autora.

As frequências de oscilação, ou seja, o tempo com que o arco permanece defletido para cada tensão inserida no eletroímã (tensão positiva e negativa), foram controladas através de um software que acionava a interface de controle.

Os parâmetros de soldagem utilizados para realização dos cordões de solda são apresentados na tabela 4 a seguir:

Tabela 4 - Parâmetros de soldagem.

Corrente Nominal (A)	Corrente de soldagem média adquirida (A)	Velocidade de alimentação do arame (m/mim)	Velocidade de soldagem (cm/min)	Vazão de gás regulada (l/min)
150	166	3,46	13	12
200	205			

Fonte: A autora.

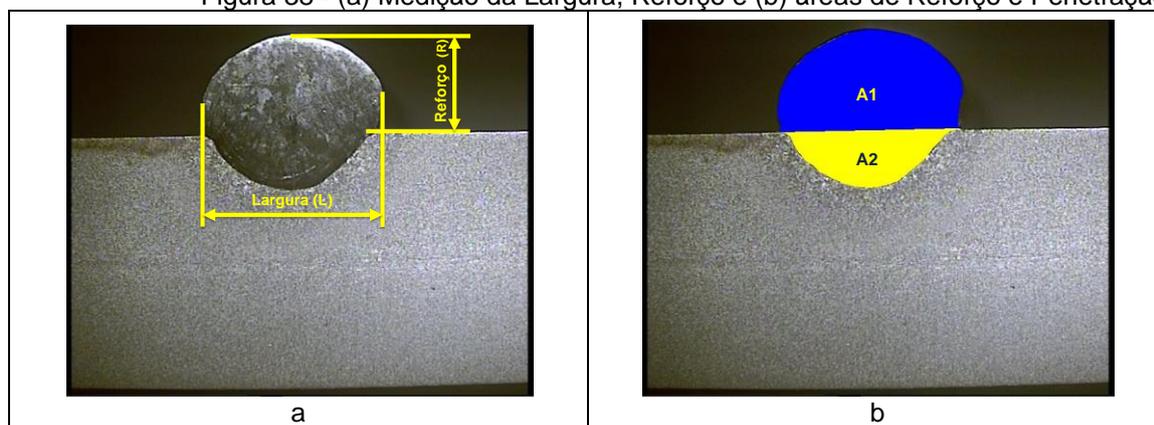
### 3.7 Metodologia para Análise da Geometria do Cordão

Foram realizados cordões de solda com oscilação magnética transversal e longitudinal ao cordão de solda. Foram realizados cortes transversais ao sentido de soldagem para permitir a exposição da seção transversal do cordão de solda. Após a captura das imagens, foi realizada a medição dos valores da geometria utilizando-se o software ImageJ. Foram medidas a largura, o reforço, área da seção transversal do cordão de solda e ainda a área de penetração. A figura 38a mostra a metodologia de medição da largura e do reforço do cordão de solda.

Para o cálculo da diluição utilizaram-se os valores das medições da largura, do reforço e da área do cordão. A relação geométrica largura/reforço (L/R) e reforço/largura (R/L) sendo que este último indica o índice de convexidade do cordão.

A figura 38b mostra a metodologia para calcular as áreas da seção transversal do cordão de solda. A área A1 refere-se à área da seção transversal do reforço do cordão de solda. A área A2 refere-se à área da penetração do metal de solda. Para o cálculo matemático da diluição faz-se a razão entre  $A2 / (A1 + A2)$ .

Figura 38 - (a) Medição da Largura, Reforço e (b) áreas de Reforço e Penetração.



Fonte: A autora.

### 3.8 Metodologia para Análise da Microestrutura do Cordão

A microestrutura dos cordões foi analisada a partir de cortes transversais ao cordão de solda, optou-se por captar imagens do centro do cordão. A preparação das amostras foi realizada com lixas de granulometrias de #120, #220, #300, #500, #600 e #1200 seguidas de polimento com alumina em suspensão 0,05  $\mu\text{m}$ . Posteriormente foram atacadas, por esfregamento, com reagente Villela (1g de Ácido Pícrico, 98ml de Álcool Etílico e 2ml de Ácido Clorídrico). As imagens das micrografias foram realizadas com o microscópio óptico.

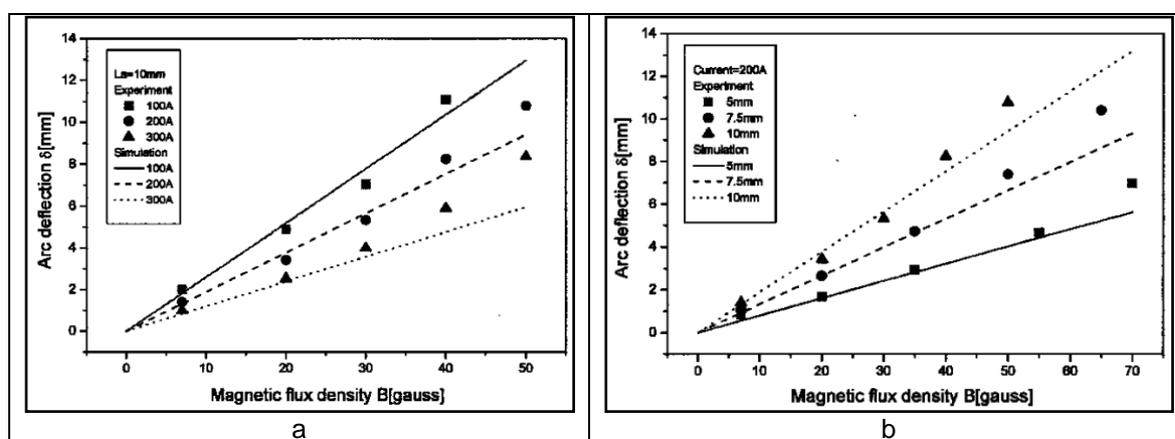
## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Considerações sobre deflexão do arco

A caracterização da amplitude de deflexão do arco elétrico para a distância DEE= 11,6 mm e correntes nominais de 60 A, 90 A, 150 A e 200 A podem ser visualizadas nas figuras 40a, 40b, 41a e 41b a seguir.

Os resultados de Kang e Na (2002) mostram que o aumento da corrente de soldagem diminui a deflexão do arco devido ao aumento de sua rigidez (figura 39).

Figura 39 - Densidade de fluxo magnético em função da deflexão do arco  
(a) Influência da corrente de soldagem e (b) influência da DEP



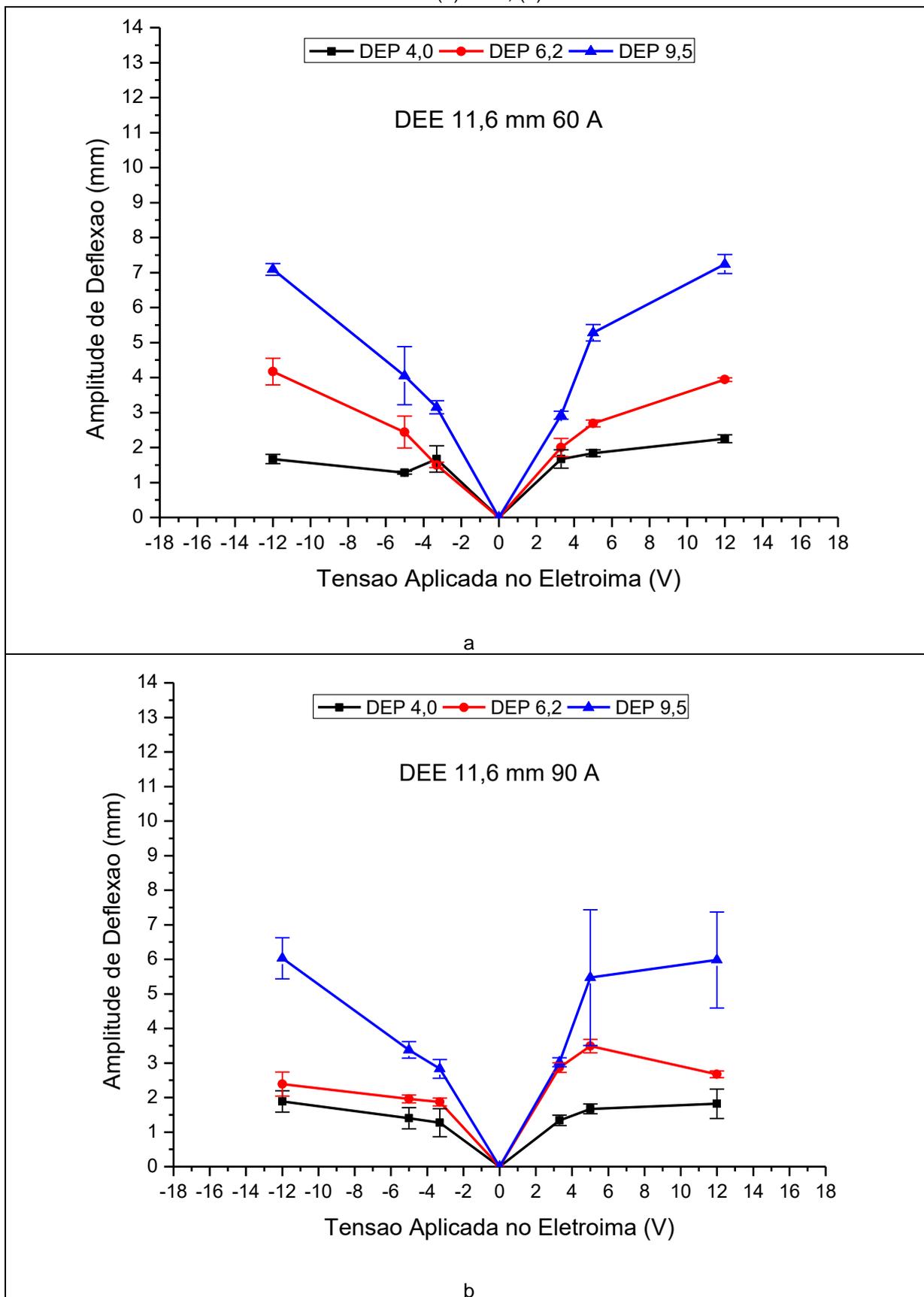
Fonte: Kang e Na (2002)

Pode-se analisar nas figuras 40a, 40b, 41a e 41b que com o aumento da corrente nominal a deflexão não diminuiu de fato. Tal fenômeno, aliado à dispersão das medições da amplitude de deflexão, pode ter ocorrido devido à ausência de controle preciso do fluxo de campo magnético gerado.

Com relação à distância eletrodo-peça (DEP = 4,0 mm) em função da tensão aplicada no eletroímã houve pequena variação, para as correntes nominais de 60 A, 90 A e 150 A, a deflexão ficou em torno de 2 mm tanto para tensões positivas aplicadas ao eletroímã quanto para tensões negativas, exceto para corrente nominal de 200 A (amplitude de deflexão aumenta com aumento da tensão no eletroímã). Tal fato pode ser devido a grande rigidez do arco aliado à pequena DEP. O campo magnético gerado no arco somente seria perturbado com maiores valores de fluxo magnético externo.

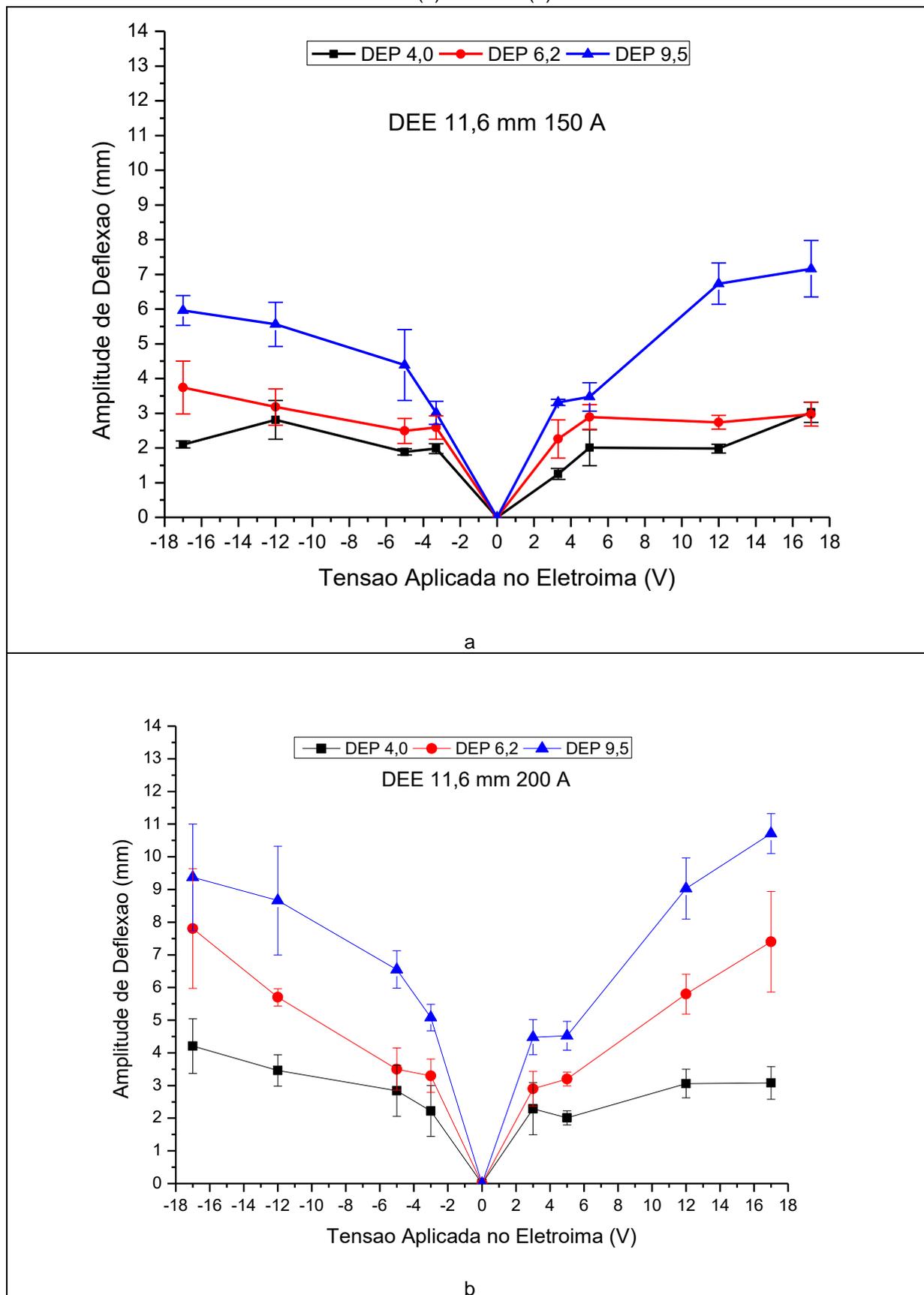
Para DEP = 6,2 mm e DEP = 9,5 mm a deflexão responde proporcionalmente a alteração da tensão no eletroímã. Em todos os casos para maiores DEP têm-se maiores amplitudes de deflexão do arco.

Figura 40 - Amplitude de deflexão do arco elétrico para DEE = 11,6m  
(a) 60 A, (b) 90 A.



Fonte: A autora

Figura 41 - Amplitude de deflexão do arco elétrico para DEE = 11,6m  
(a) 150 A e (b) 200 A.

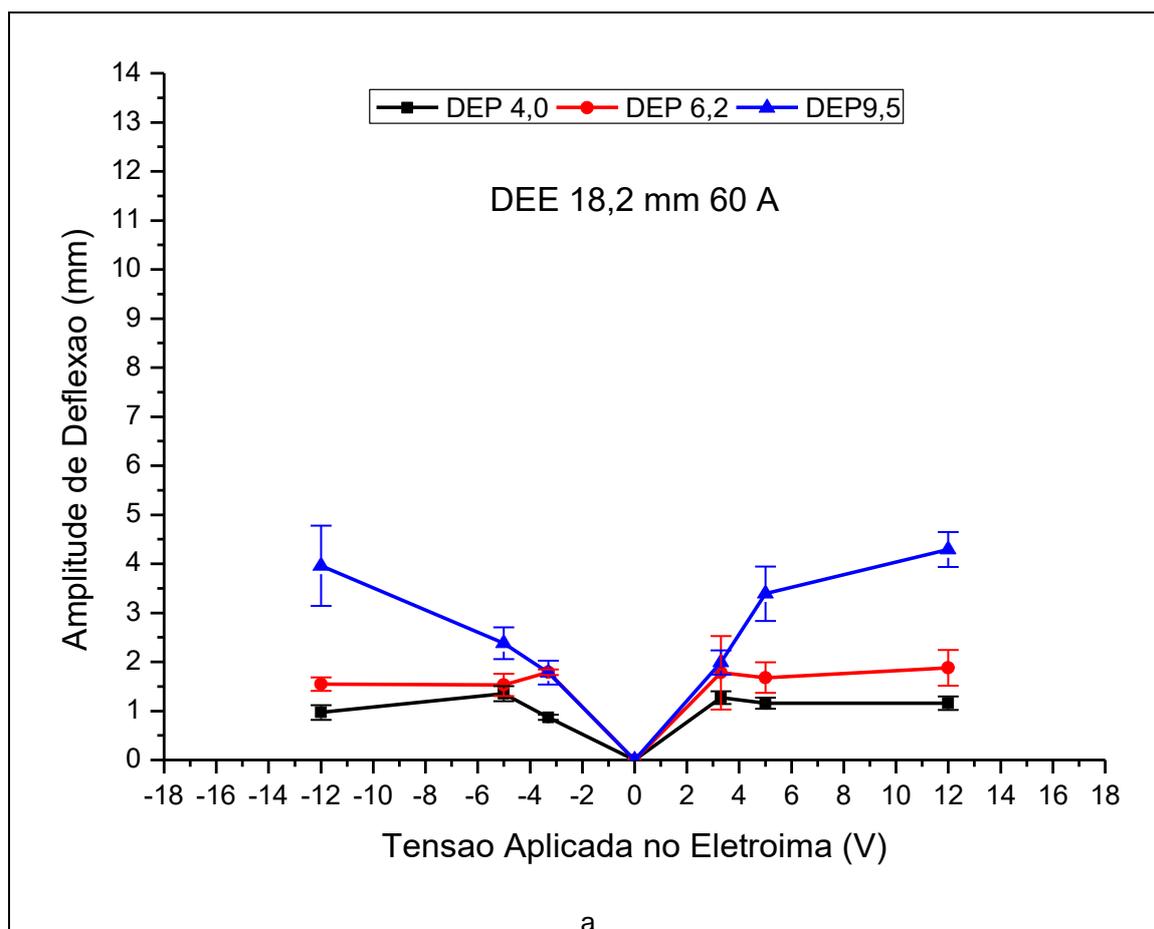


Fonte: A autora.

A caracterização da amplitude de deflexão do arco elétrico para a distância DEE = 18,2 mm e correntes nominais de 60 A, 90 A, 150 A podem ser visualizadas nas figuras 42a, 43a e 43b a seguir. Não foi realizada a deflexão de 200 A para esta DEE pela dificuldade de registrar as fotografias devido à instabilidade do arco elétrico quando defletido.

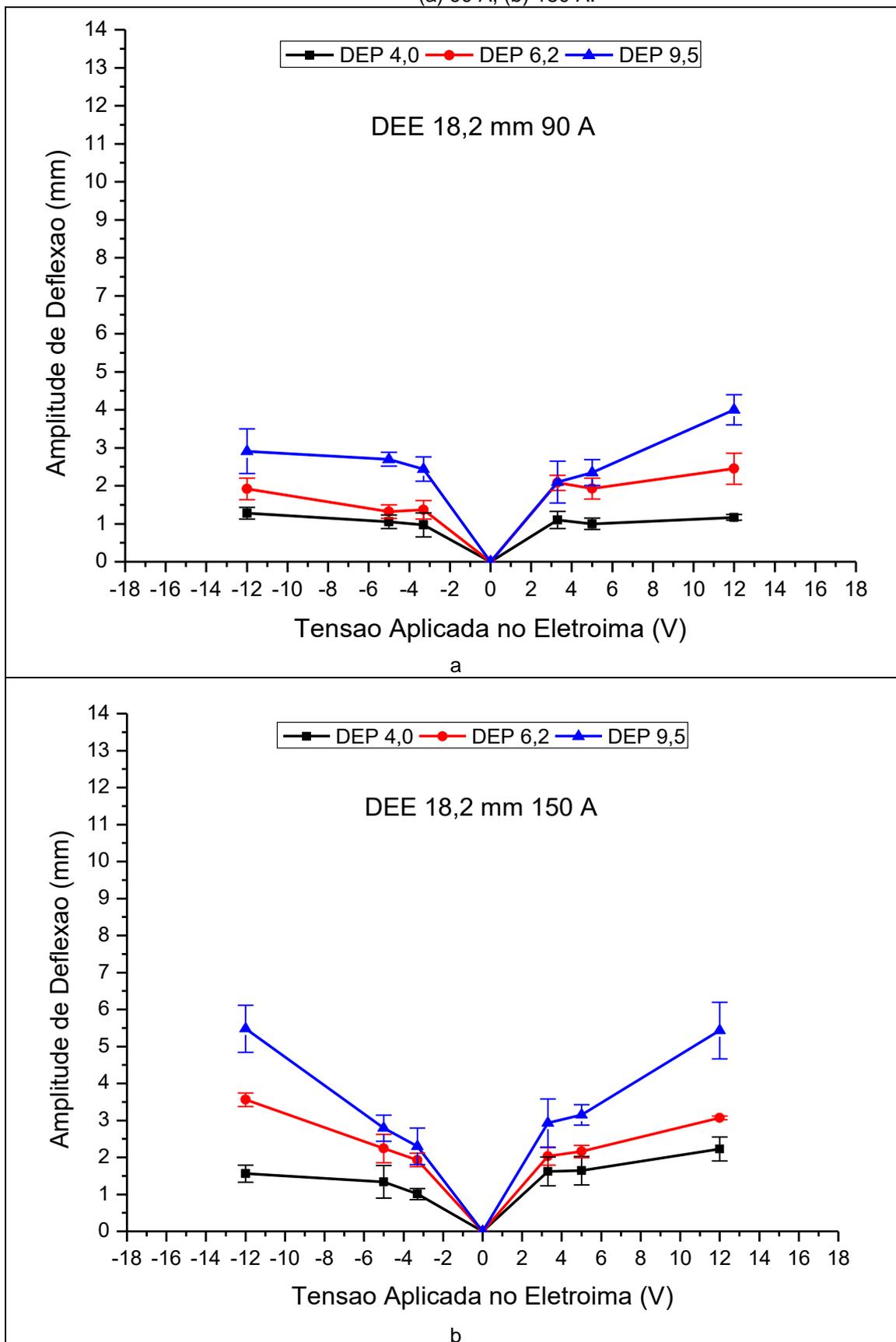
Houve pouca alteração na amplitude de deflexão em função da DEP e tensão inserida no eletroímã devido a menor intensidade do campo magnético gerado pelo eletroímã. Para esta configuração utilizada no estudo, as linhas de campo geradas mostram-se menos intensas na DEE = 18,2 mm do que para a DEE = 11,6 mm. Partindo desta conclusão é que a DEE escolhida para a realização dos cordões é de DEE = 11,6 mm.

Figura 42 - Amplitude de deflexão do arco elétrico para DEE=18,2 mm  
(a) 60 A.



Fonte: A autora.

Figura 43 - Amplitude de deflexão do arco elétrico para DEE=18,2 mm  
(a) 90 A, (b) 150 A.



Fonte: A autora.

## 4.2 Considerações sobre geometria do cordão

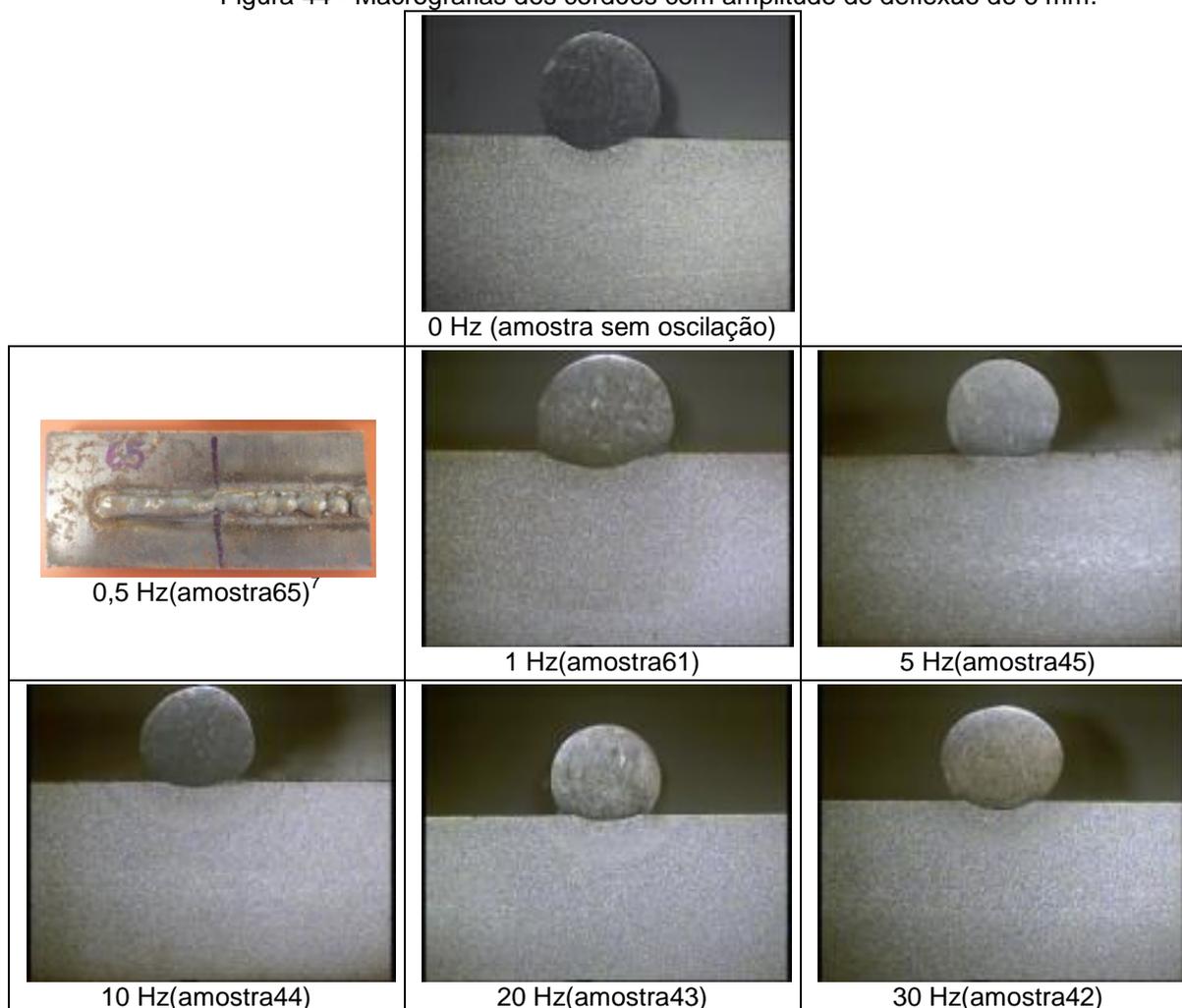
As soldagens foram realizadas com a oscilação magnética do arco elétrico no sentido transversal ao cordão de solda e também no sentido longitudinal ao cordão de solda. A fim de organizar os resultados obtidos, optou-se por separar as considerações sobre a geometria do cordão em duas etapas, a primeira sobre os resultados obtidos nas amostras soldadas com oscilação no sentido **transversal** e a segunda etapa, as considerações sobre os resultados obtidos para a soldagem com oscilação no sentido **longitudinal** ao cordão de solda.

### 4.2.1 Geometria do cordão - oscilação magnética no sentido transversal - corrente nominal 150 A

As figuras 44 e 45 exibem as macrografias dos cordões de solda realizados com deflexão magnética **transversal** ao arco em função das tensões aplicadas no eletroímã com corrente de soldagem de aproximadamente 150 A.

A figura 44 mostra as macrografias das seções transversais dos cordões com a amplitude de deflexão de 6,0 mm com tensão aplicada no eletroímã foi de 12 V.

Figura 44 - Macrografias dos cordões com amplitude de deflexão de 6 mm.



Fonte: A autora.

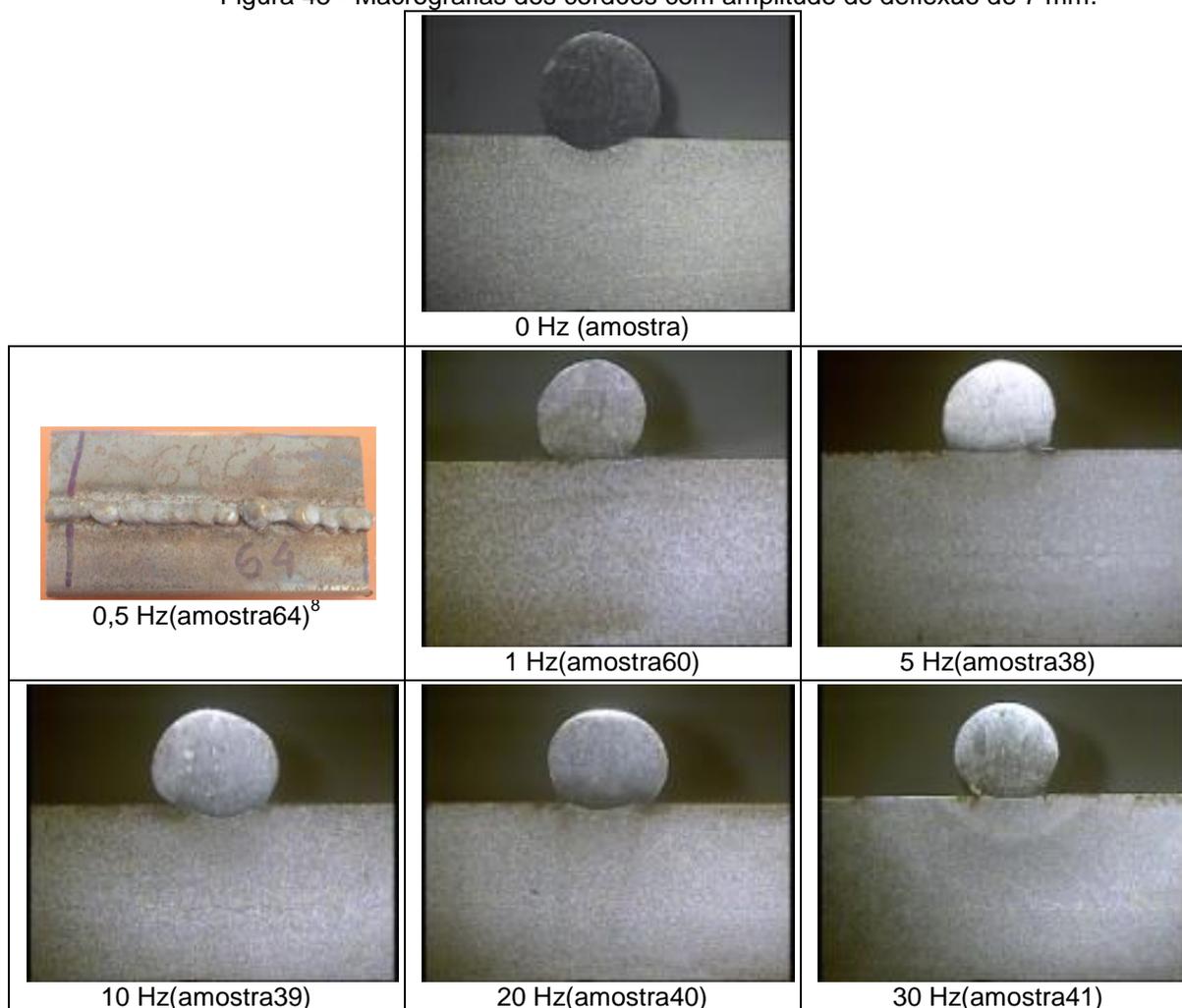
Analisando visualmente a seção transversal dos cordões, nota-se que todos ficaram com alta convexidade. Os critérios de morfologia (L/R) e diluição serão discutidos posteriormente.

Nota-se para a amostra com frequência de 0,5Hz, amplitude de seis milímetros e corrente nominal de 150 A, que o cordão não foi satisfatório quando realizada a oscilação magnética do arco. Os demais cordões não apresentaram descontinuidades.

A figura 45 mostra as macrografias das seções transversais dos cordões com a amplitude de deflexão de 7,0 mm. A tensão aplicada no eletroímã foi de 17 V e a corrente nominal de 150 A.

<sup>7</sup> Cordão de solda com descontinuidade superficial.

Figura 45 - Macrografias dos cordões com amplitude de deflexão de 7 mm.



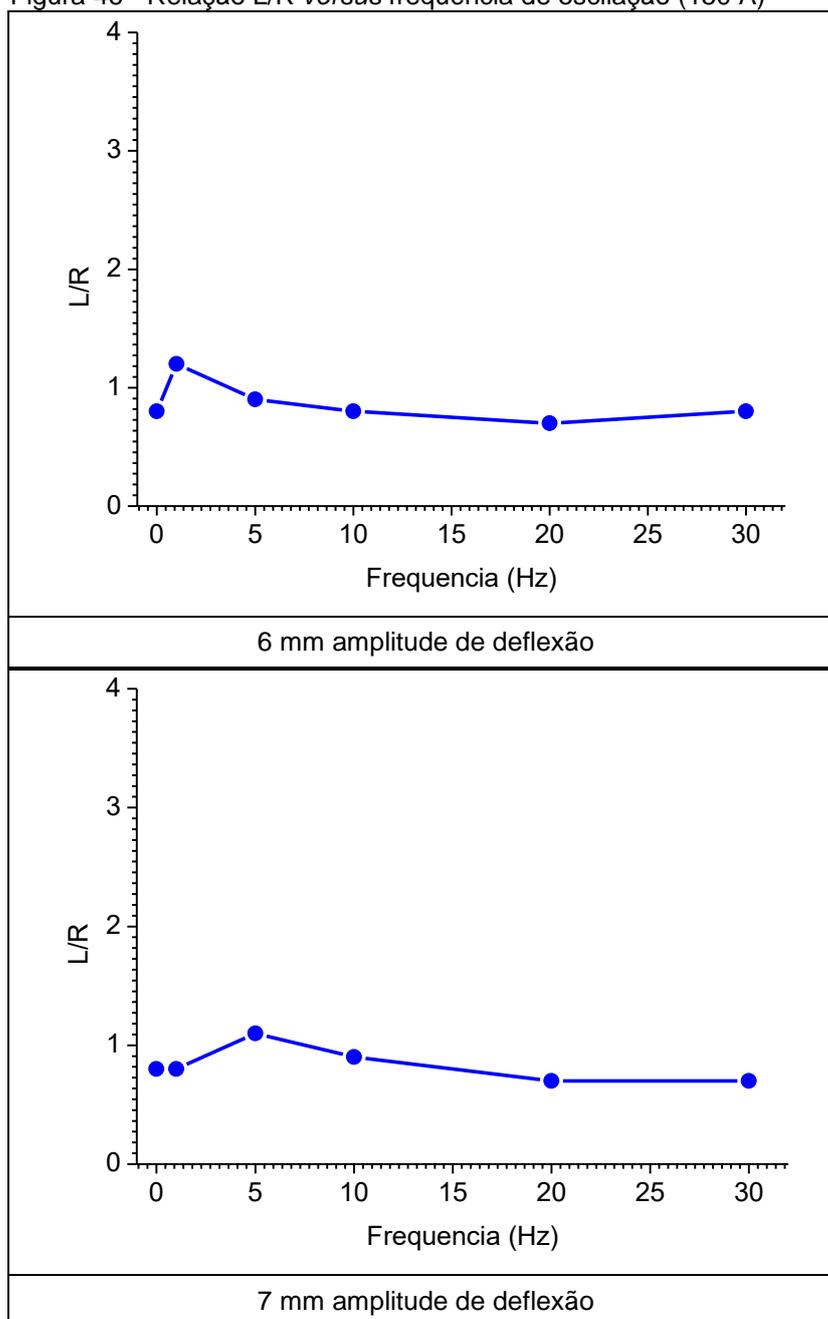
Fonte: A autora.

Para a amostra realizada com frequência 0,5Hz, amplitude de sete milímetros e corrente nominal de 150 A, o cordão não foi satisfatório quando realizada a oscilação magnética do arco, resultado idêntico ao apresentado para amplitude de seis milímetros (figura 44). Para a amplitude de deflexão de 7 mm (figura 45) os resultados mostram um comportamento similar ao encontrado na amplitude de 6 mm, mostrando que neste caso as frequências de oscilação magnética utilizadas não influenciaram na morfologia do cordão.

As curvas apresentadas na figura 46 mostram a relação geométrica entre largura e reforço em função da frequência de oscilação transversal ao cordão de solda.

<sup>8</sup> Cordão de solda com descontinuidade superficial.

Figura 46 - Relação L/R versus frequência de oscilação (150 A)



Fonte: A autora

A relação geométrica (relação L/R) pode ser considerada constante para todas as frequências de oscilação do arco elétrico e para as duas amplitudes utilizadas. Na frequência de 1 Hz e amplitude de deflexão de seis milímetros a relação foi de 1,2. Já para a mesma frequência e amplitude de deflexão de sete milímetros a relação geométrica foi menor e apresentou valor de 0,8, mesmo valor para a amostra sem oscilação. Para a frequência de 5 Hz a relação foi de 0,9 para a amplitude de 6 mm e para a amplitude de deflexão

de sete milímetros a relação encontrada foi de 1,1. Para as demais frequências utilizadas não houve mudança significativa.

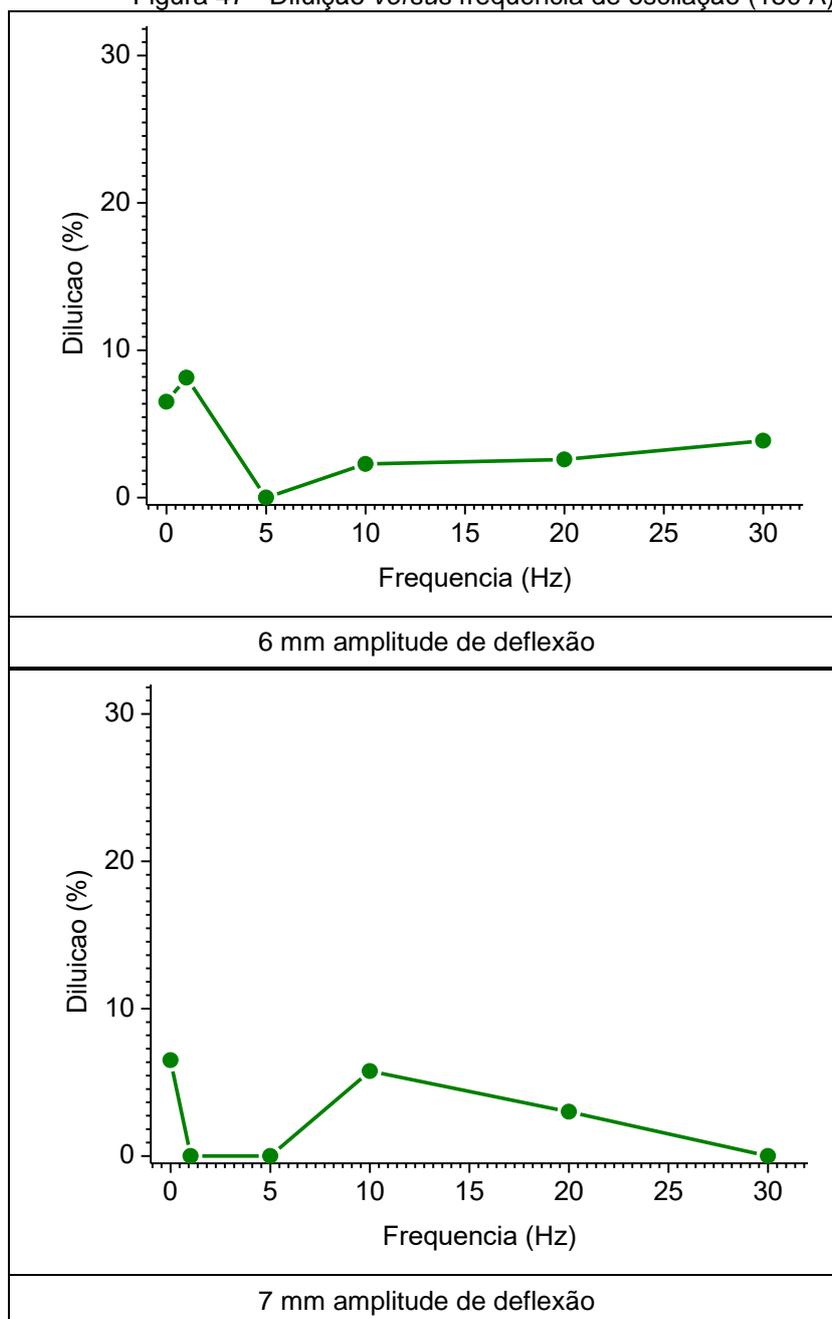
Em critério baseado em experiências dos autores Silva, Ferraresi & Scotti, (2000), a relação R/L indica o índice de convexidade do cordão e deve ser menor que 30%, nos cordões apresentados estes índices são maiores de 84% divergindo do critério adotado. Tabelas com os valores da relação geométrica (L/R) e índice de convexidade (R/L) podem ser visualizados no apêndice I.

As curvas apresentadas na figura 47 mostram a diluição em função da frequência de oscilação transversal ao cordão de solda.

A diluição foi nula para a frequência de 1 Hz e amplitude de deflexão de 7 mm. Já para a mesma frequência de oscilação e amplitude menor a diluição foi de 8%. Em ambas as amplitudes de deflexão e frequência de oscilação de 5 Hz a diluição foi nula. Para seis milímetros de deflexão a partir de 10 Hz houve um crescimento da diluição a saber: 2,3%, 2,6% e 3,9% respectivamente para 10 Hz, 20 Hz e 30 Hz. Para a amplitude de deflexão de 7 mm a diluição teve comportamento diferente sendo que para 10 Hz foi de 5,7%, em 20 Hz foi de 3% e nula para 30 Hz. Este nível de diluição pode ser devido à baixa corrente de soldagem utilizada o que impõe menor aporte térmico ao realizar a soldagem.

Para os autores Murugan e Parmar (1997) o nível de diluição aceitável deve estar entre 10% e 15%, os valores de diluição apresentados nas figuras anteriores não atendem aos critérios estabelecidos por estes autores.

Figura 47 - Diluição versus frequência de oscilação (150 A)



Fonte: A autora

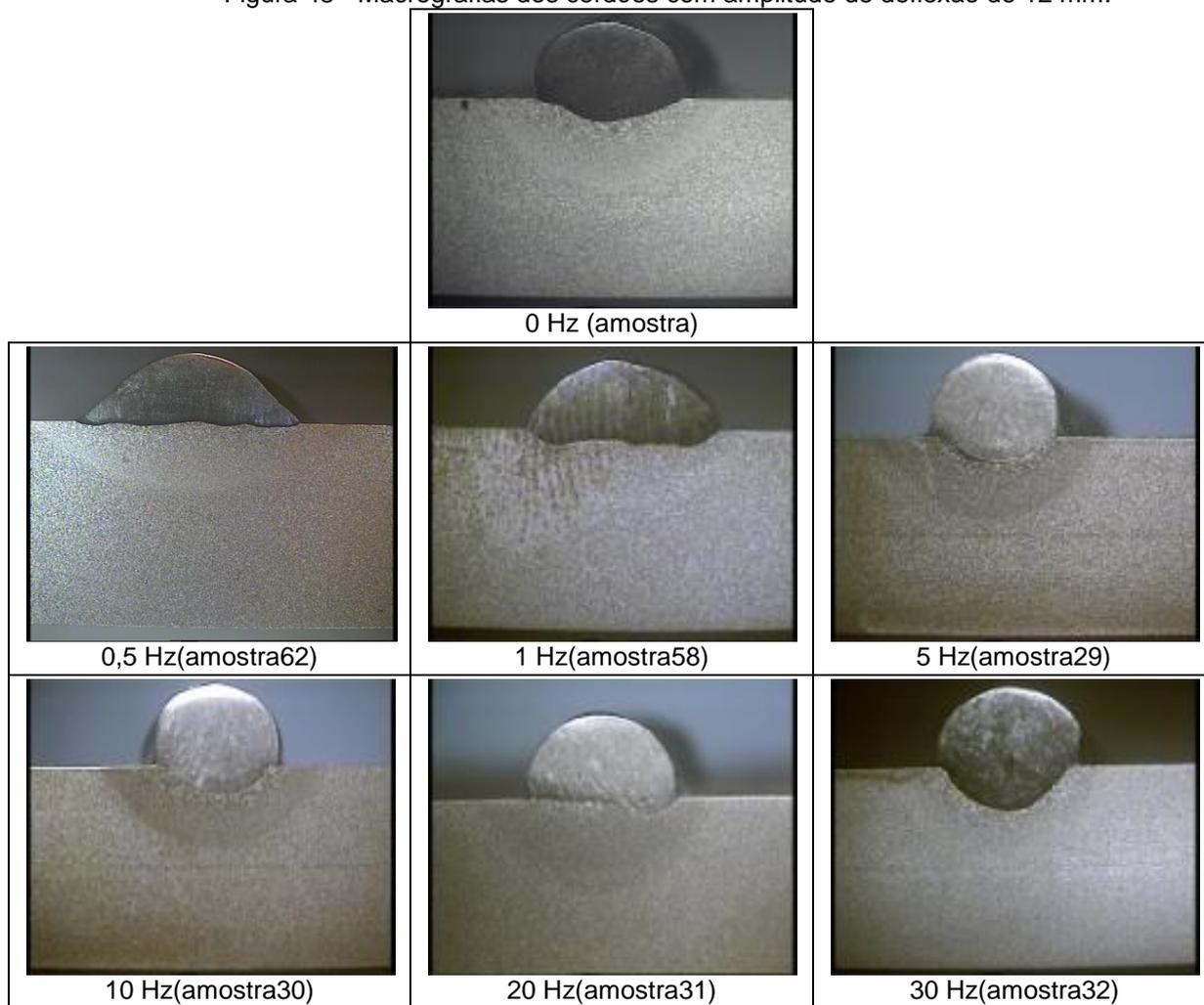
#### 4.2.2 Geometria do cordão - oscilação magnética no sentido transversal - corrente nominal 200 A

As figuras 48 e 49 exibem as macrografias dos cordões de solda realizados com deflexão magnética **transversal** ao arco em função das tensões aplicadas no eletroímã com corrente de soldagem de aproximadamente 200 A.

A figura 48 mostra as macrografias das seções transversais dos cordões com a amplitude de deflexão de 12,0 mm, a tensão aplicada no eletroímã foi de 12 V.

As macrografias apresentadas mostram que para a amostra realizada com frequência de oscilação de 0,5 Hz e doze milímetros de amplitude de deflexão é mais coerente para um cordão que poderá ser utilizado em revestimentos, tendo em vista que este tipo de utilização requer grandes larguras e pequenos reforços. Para as demais frequências utilizadas as macrografias apresentadas mostram pequenas larguras e grandes reforços.

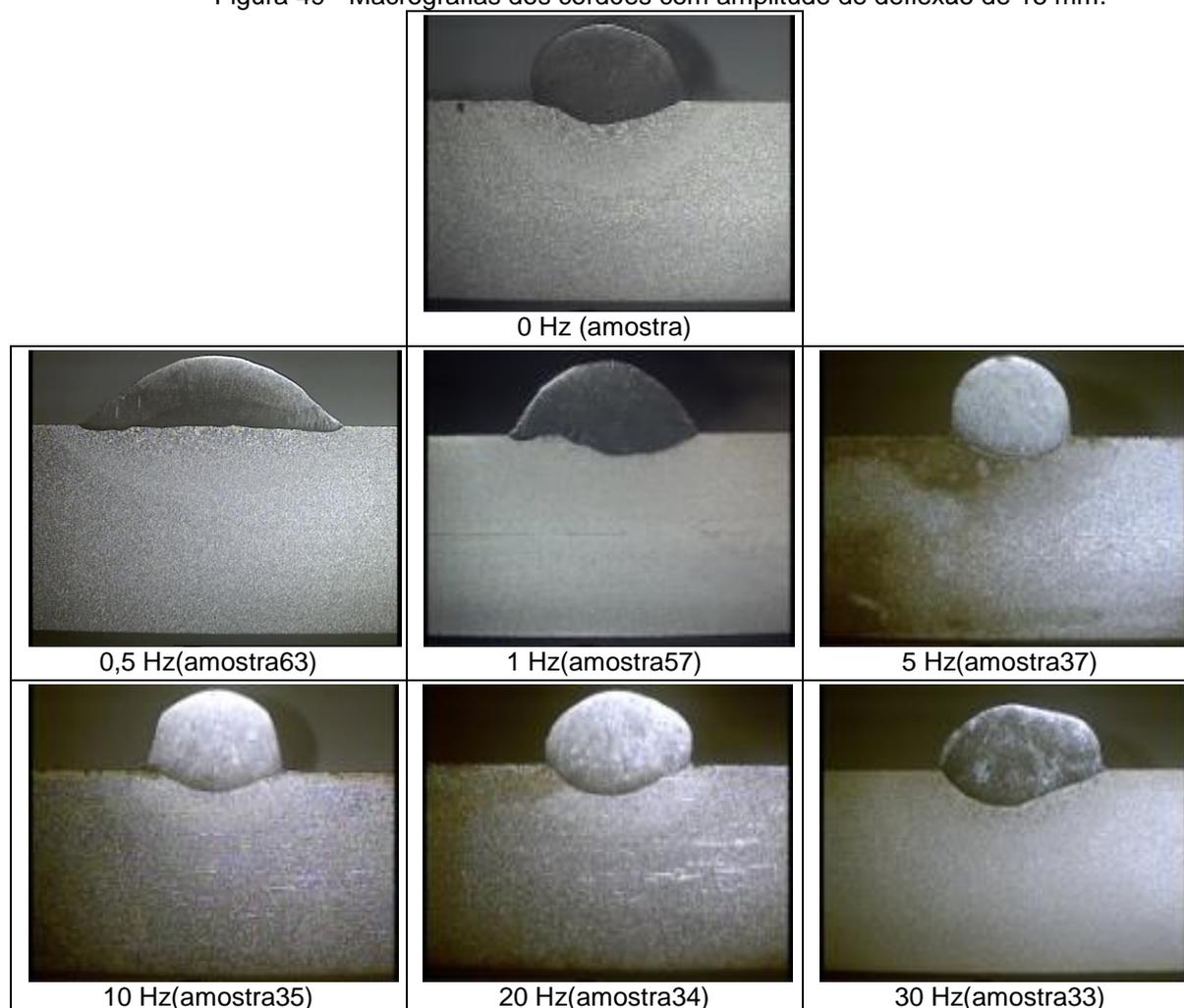
Figura 48 - Macrografias dos cordões com amplitude de deflexão de 12 mm.



Fonte: A autora.

A figura 49 mostra as macrografias das seções transversais dos cordões com a amplitude de deflexão de 15,0 mm, a tensão aplicada no eletroímã foi de 17 V e corrente nominal de 200 A.

Figura 49 - Macrografias dos cordões com amplitude de deflexão de 15 mm.

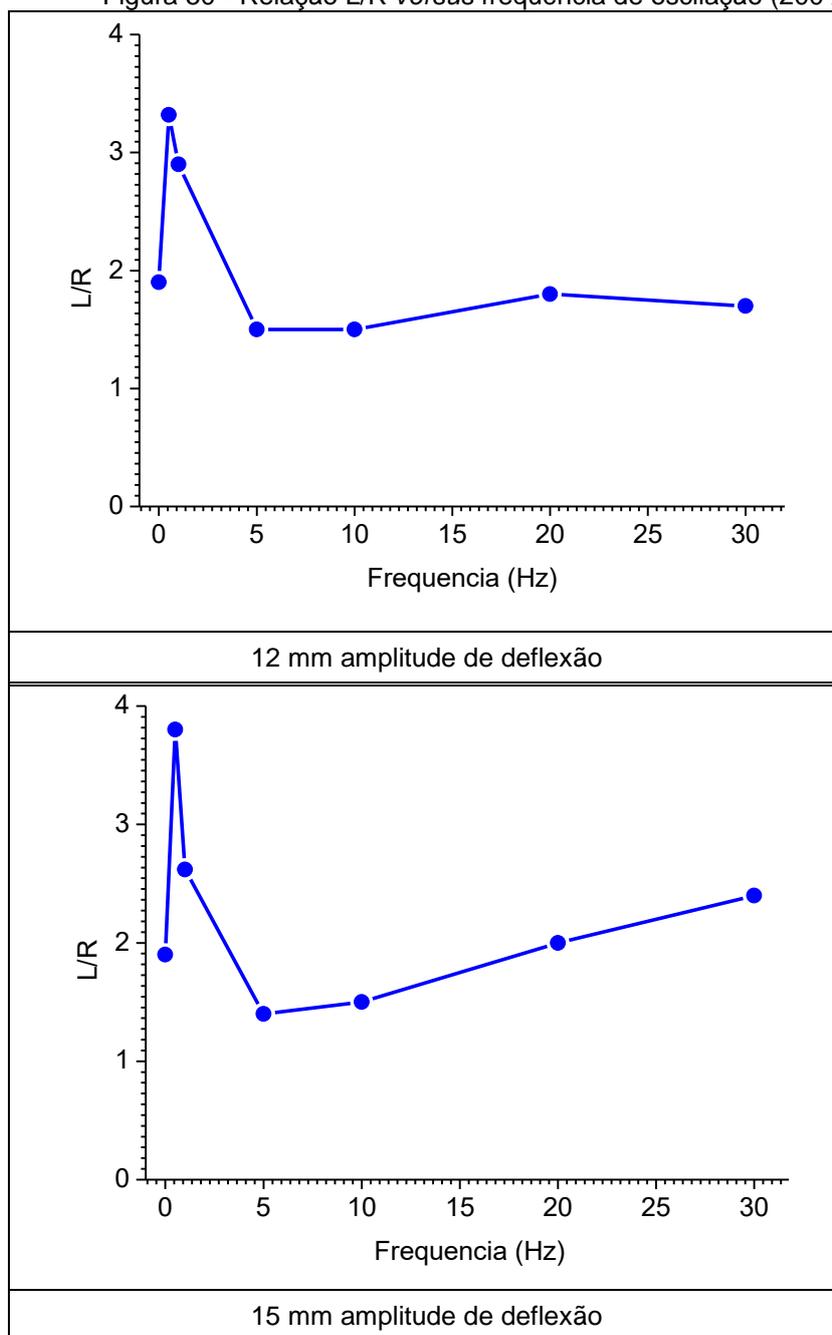


Fonte: A autora.

Novamente as macrografias apresentadas mostram que para a amostra realizada com frequência de oscilação de 0,5 Hz (15 mm de amplitude de deflexão) é mais coerente para um cordão que poderá ser utilizado em revestimento, pois apresenta maior larguras e pequeno reforço diferentemente dos demais.

As curvas apresentadas na figura 50 mostram a relação geométrica entre largura e reforço em função da frequência de oscilação transversal ao cordão de solda.

Figura 50 - Relação L/R versus frequência de oscilação (200 A).



Fonte: A autora.

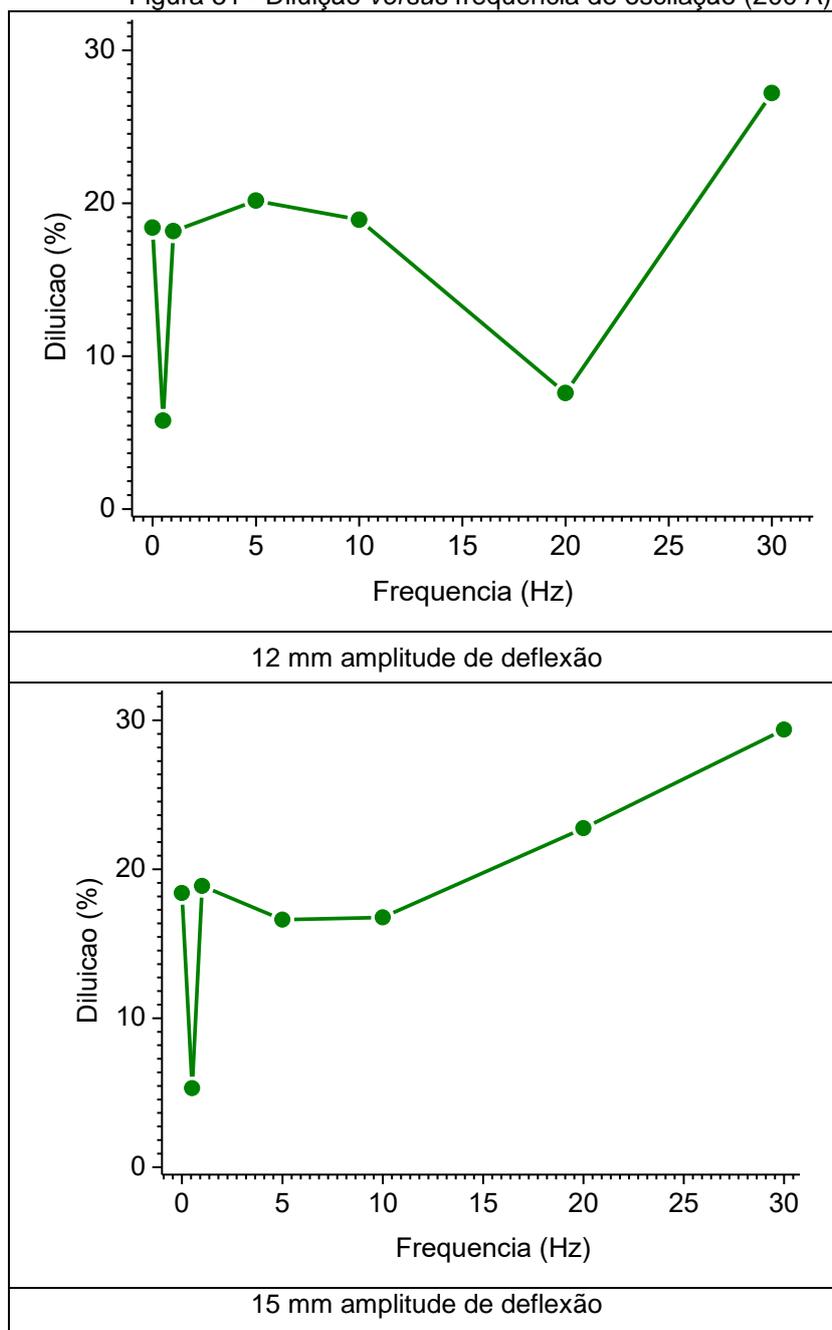
A relação L/R apresentada para as frequências de 0,5 Hz foi de 3,2 e 3,8 respectivamente para as amplitudes de deflexão 12 mm e 15 mm. As demais frequências de oscilação utilizadas produziram relações geométricas em torno de 2 em ambas as amplitudes de deflexão. O critério recomendado pelos autores Silva, Ferraresi & Scotti, (2000) da relação R/L foi atendido apenas pelas amostras com 0,5 Hz. A relação R/L foi de 30% para doze milímetros de amplitude e de 26% para a amplitude de quinze milímetros. As

demais frequências de oscilação utilizadas produziram cordões com relação R/L superiores a 30% indo até pouco mais de 70% e não atendem ao critério estabelecido pelos autores.

Para a corrente nominal de 150 A percebe-se que com o aumento da frequência de oscilação não há alteração da morfologia do cordão, já para a corrente nominal de 200 A nota-se uma tendência de aumento com o aumento da frequência de oscilação (em ambas as amplitudes de deflexão utilizadas). Porém, em frequências abaixo de 5 Hz, inclusive, nota-se uma tendência de melhora da relação geométrica. Supõe-se que tal melhora seja devida à baixa frequência de oscilação que impõe maiores tempos de parada lateral e com isso, uma distribuição de calor mais eficiente nas laterais do cordão.

As curvas apresentadas na figura 51 mostram a diluição em função da frequência de oscilação transversal ao cordão de solda.

Figura 51 - Diluição versus frequência de oscilação (200 A).



Fonte: A autora.

A diluição ficou em torno de 5% para as amostras de 0,5 Hz em ambas as amplitudes de deflexão. Foi praticamente a mesma, 18%, para a frequência de 1 Hz e variou quatro pontos percentuais na frequência de 5 Hz (20%-12 mm e 16%-15 mm). Para a frequência de 20 Hz a diluição foi de 7,58% para 12 mm de amplitude e quase 23% para 15 mm de amplitude. A frequência de 30 Hz produziu cordões com diluição em torno de 28%.

Em todos os gráficos diluição *versus* frequência de oscilação percebe-se que há uma tendência de aumento da diluição para frequências a partir de 5 Hz exceto para 150 A e 7 mm de amplitude de deflexão. Da mesma forma que observado nas curvas da relação L/R, há uma alteração do comportamento quando se analisa os resultados para baixas frequências.

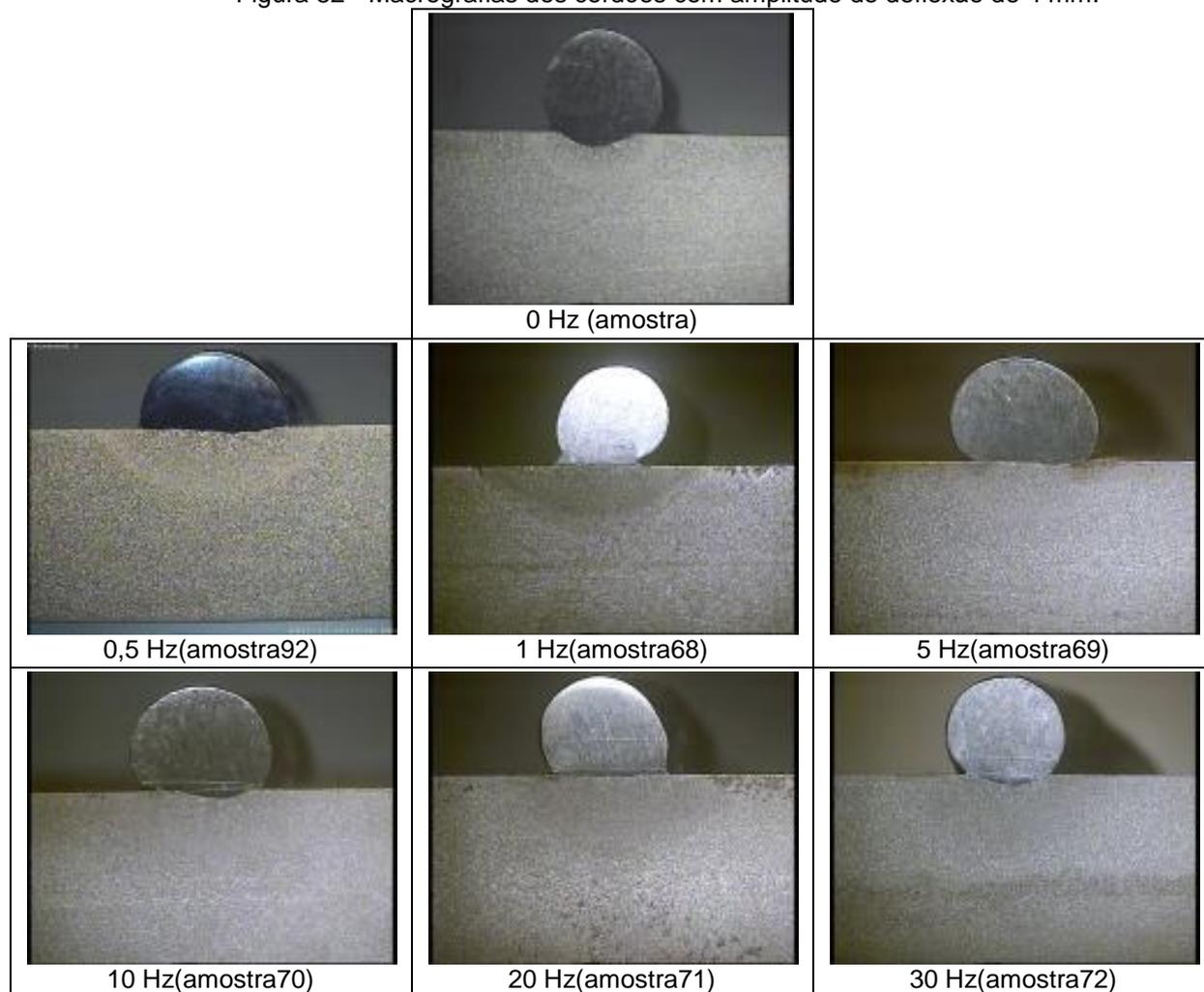
Os resultados apresentados até o momento referem-se às amostras realizadas com oscilação magnética transversal ao cordão de solda. A partir deste momento a explanação será sobre os resultados obtidos com a oscilação magnética longitudinal ao arco de solda.

#### 4.2.3 Geometria do cordão - oscilação magnética no sentido longitudinal - corrente nominal 150 A

As figuras 52 e 53 exibem as macrografias dos cordões de solda realizados com deflexão magnética **longitudinal** ao arco em função das tensões aplicadas no eletroímã com corrente de soldagem adquirida de 166 A.

A figura 52 mostra as macrografias das seções transversais dos cordões com a amplitude de deflexão de 4,0 mm, tensão aplicada no eletroímã de 5 V.

Figura 52 - Macrografias dos cordões com amplitude de deflexão de 4 mm.

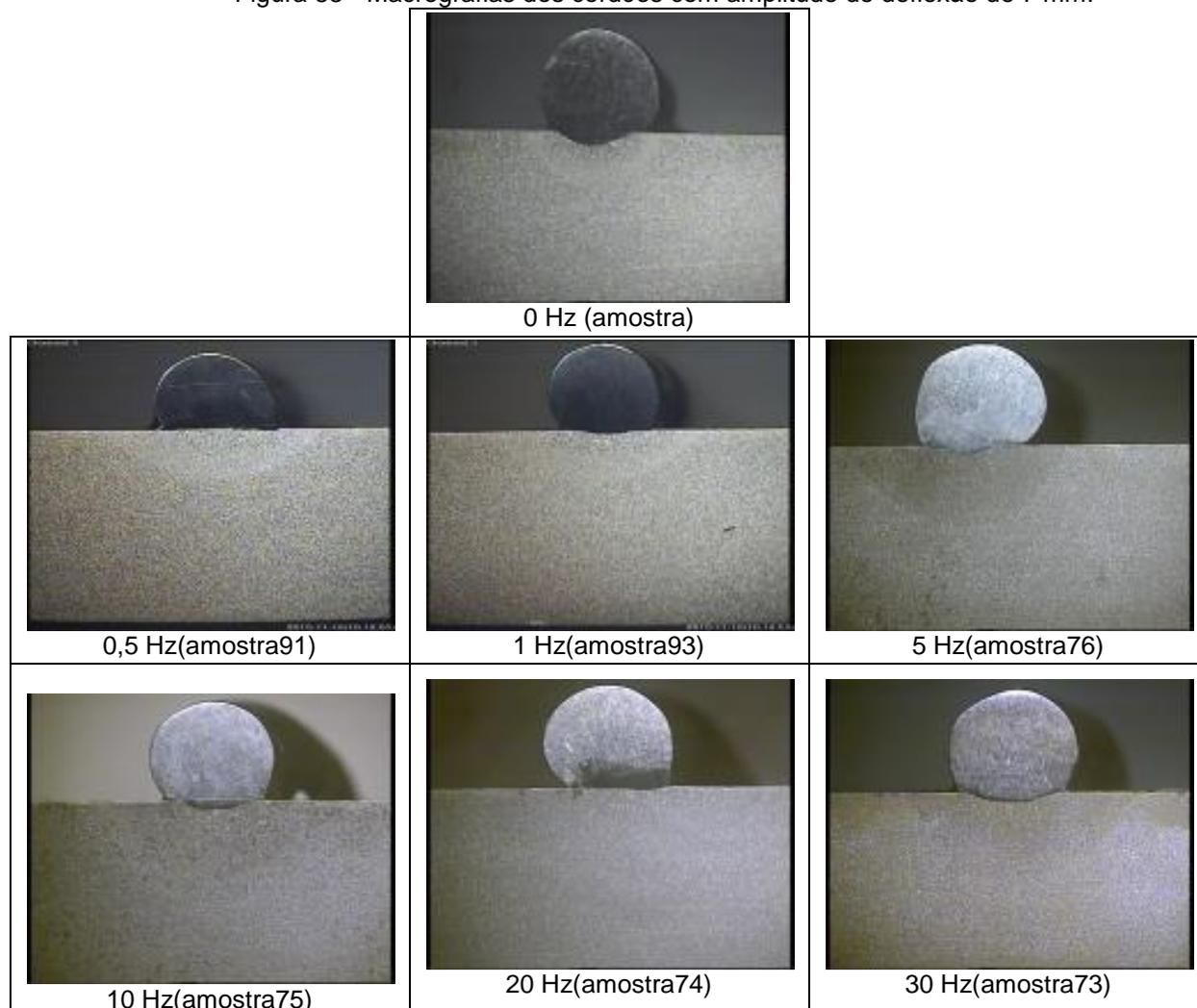


Fonte: A autora.

As macrografias apresentadas revelam grandes reforços e larguras pequenas de cordão conforme pode ser visualizado nos gráficos apresentados posteriormente e nas tabelas no apêndice I.

A figura 53 mostra as macrografias das seções transversais dos cordões com a amplitude de deflexão de 7,0 mm e tensão aplicada no eletroímã de 12 V.

Figura 53 - Macrografias dos cordões com amplitude de deflexão de 7 mm.

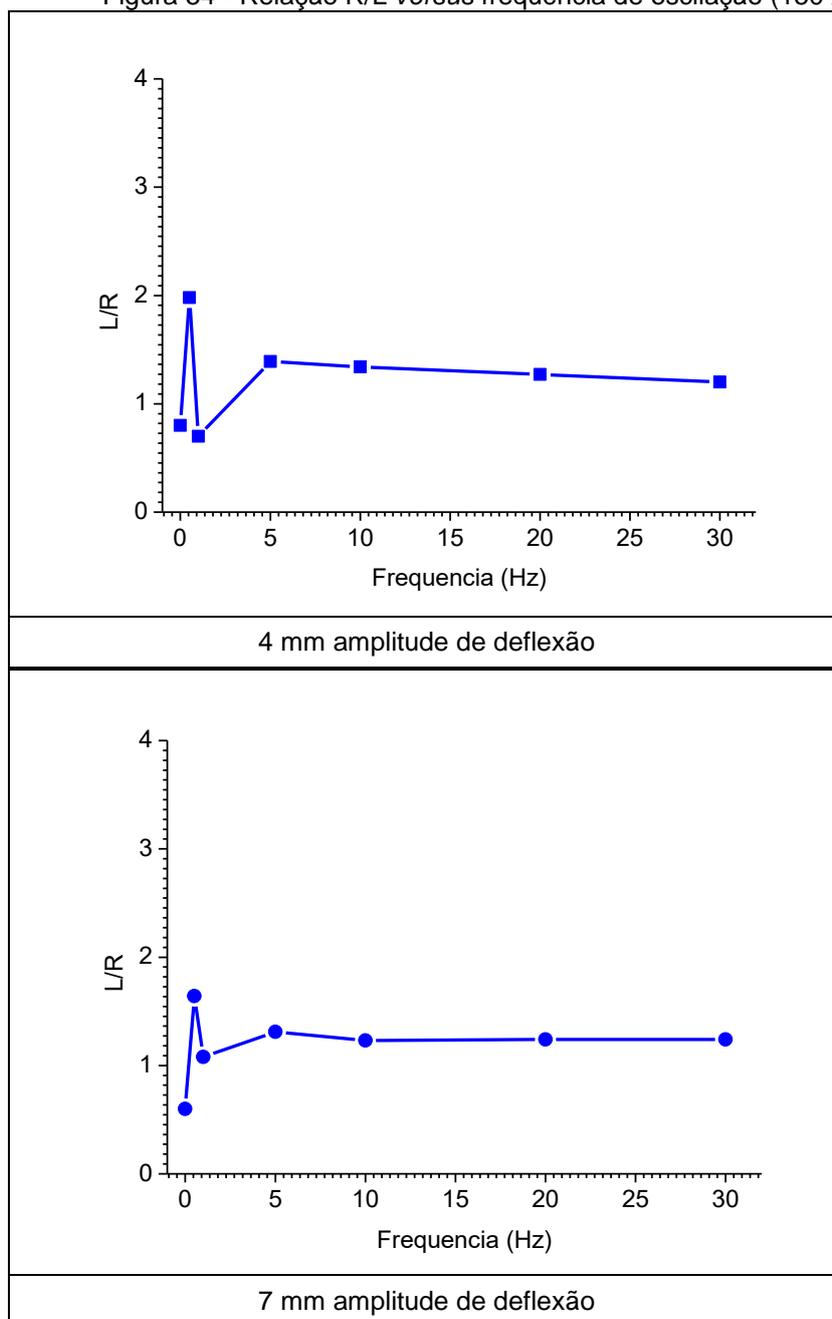


Fonte: A autora.

Pode-se notar que para a oscilação longitudinal do arco elétrico com frequência de 0,5 Hz e corrente nominal de 150 A, diferentemente da oscilação transversal do arco, foi possível obter cordão de solda de forma satisfatória.

As curvas apresentadas na figura 54 mostram a relação geométrica entre largura e reforço em função da frequência de oscilação longitudinal ao cordão de solda.

Figura 54 - Relação R/L versus frequência de oscilação (150 A).

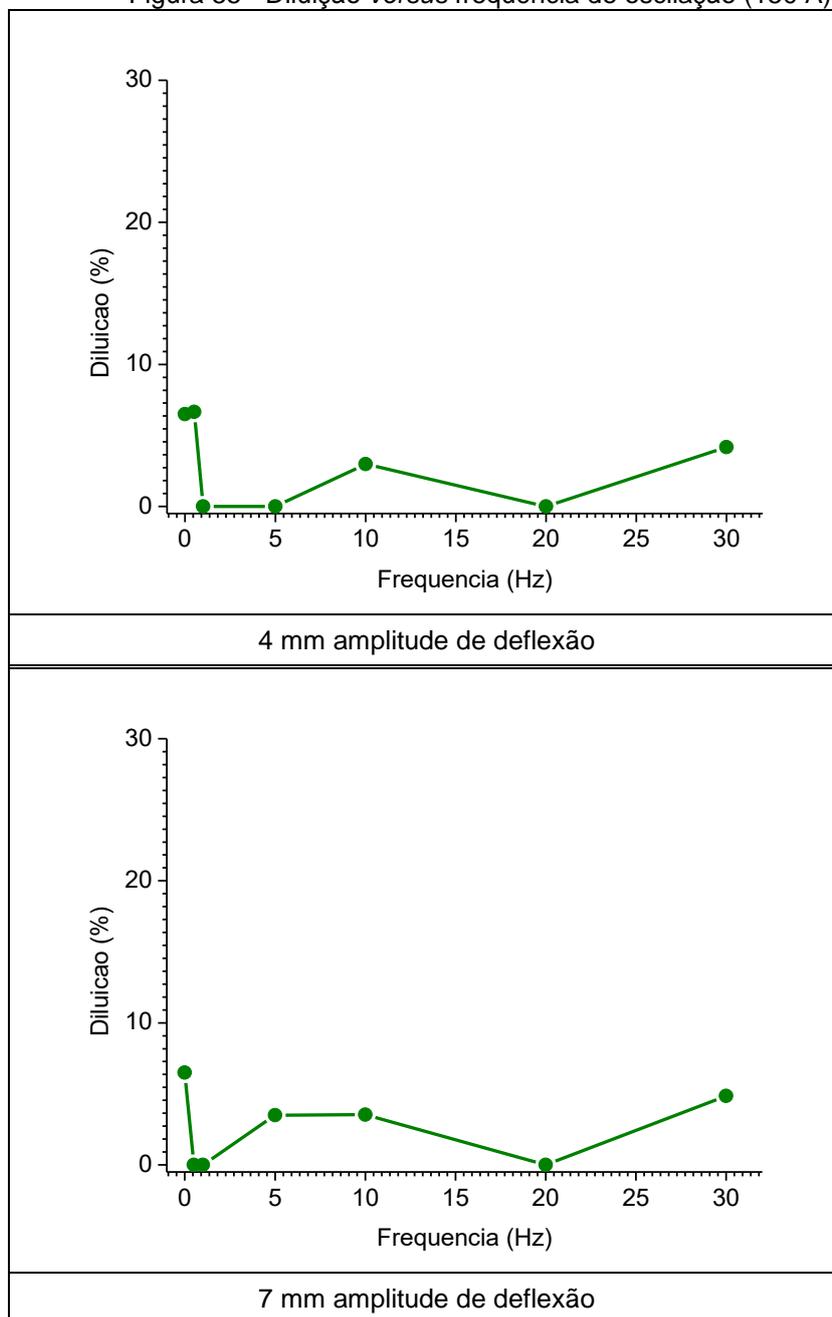


Fonte: A autora.

A relação L/R pode ser considerada constante para as todas as frequências de oscilação do arco elétrico e para as duas amplitudes utilizadas, em média a relação permaneceu em 1,2. Já a relação R/L que indica o índice de convexidade (IC) do cordão passa de 50% e chega ao patamar de 142% para a amplitude de deflexão de quatro milímetros. Para a amplitude de sete milímetros esta relação varia de 60% até pouco menos de 93%. Estes valores contrariam o indicado de IC<30%.

As curvas apresentadas na figura 55 mostram a diluição em função da frequência de oscilação longitudinal ao cordão de solda.

Figura 55 - Diluição versus frequência de oscilação (150 A).



Fonte: A autora.

A diluição dos cordões foi de 6,6% para as amostras com frequência de oscilação de 0,5 Hz e amplitude de deflexão de 4 mm. Já para a amplitude de deflexão de 7 mm com a mesma frequência de oscilação a diluição foi nula. O comportamento da diluição foi semelhante para as amostras com oscilação longitudinal com frequências de 10 Hz, 20 Hz e 30 Hz. O comportamento da

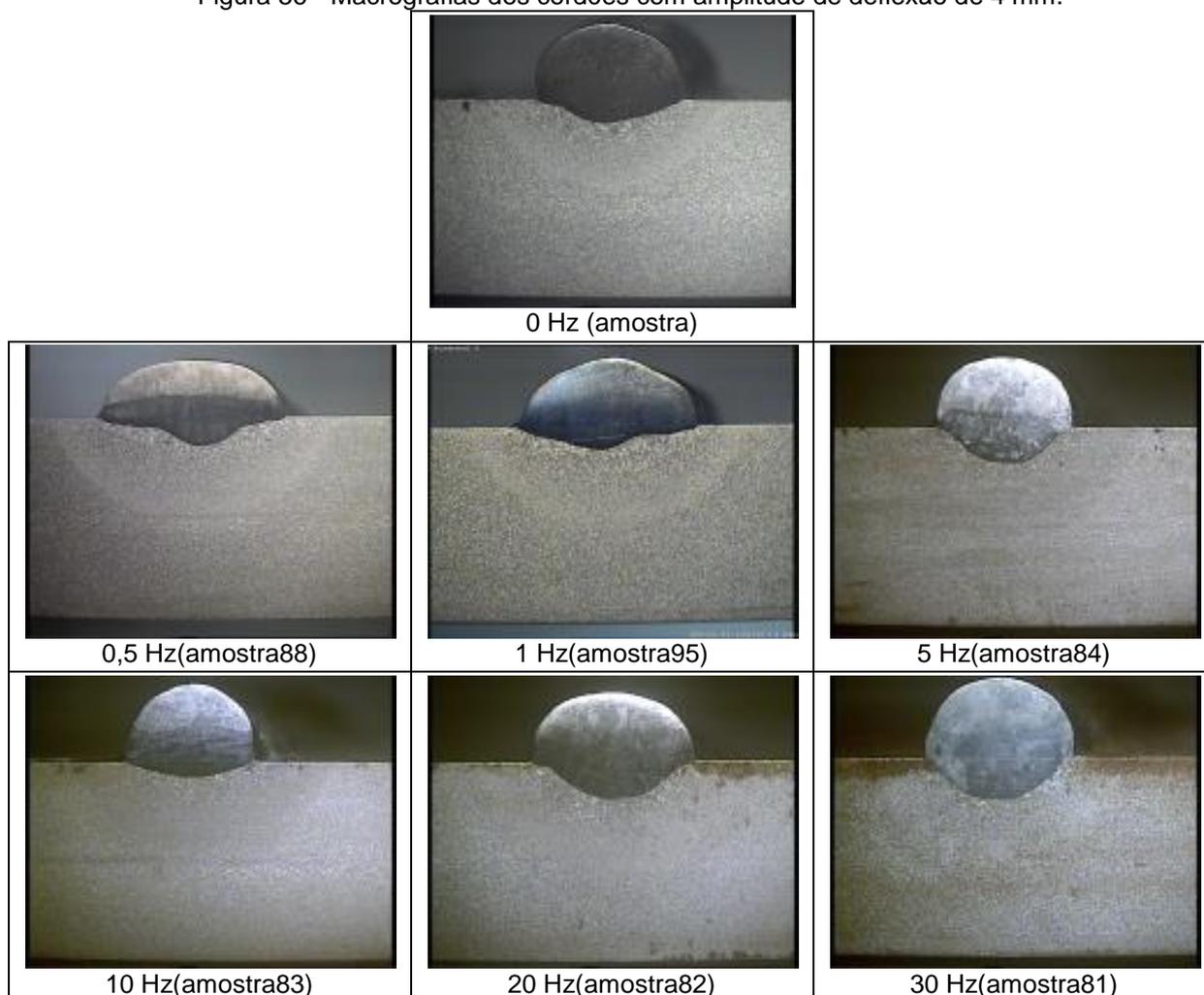
diluição para frequência de 5 Hz foi zero para amplitude de 4 mm e 3,5% para amplitude de 7 mm. O aporte térmico para esta corrente de soldagem pode não ter sido suficiente para aumentar obter diluição entre 10% e 15% conforme proposto por Murugan e Parmar (1997).

#### 4.2.4 Geometria do cordão - oscilação magnética no sentido longitudinal - corrente nominal 200 A

As figuras 56 e 57 exibem as macrografias dos cordões de solda realizados com deflexão magnética **longitudinal** ao arco em função das tensões aplicadas no eletroímã com corrente de soldagem de aproximadamente 200 A.

A figura 56 mostra as macrografias das seções transversais dos cordões com a amplitude de deflexão de 4,0 mm e tensão no eletroímã de 5 V.

Figura 56 - Macrografias dos cordões com amplitude de deflexão de 4 mm.

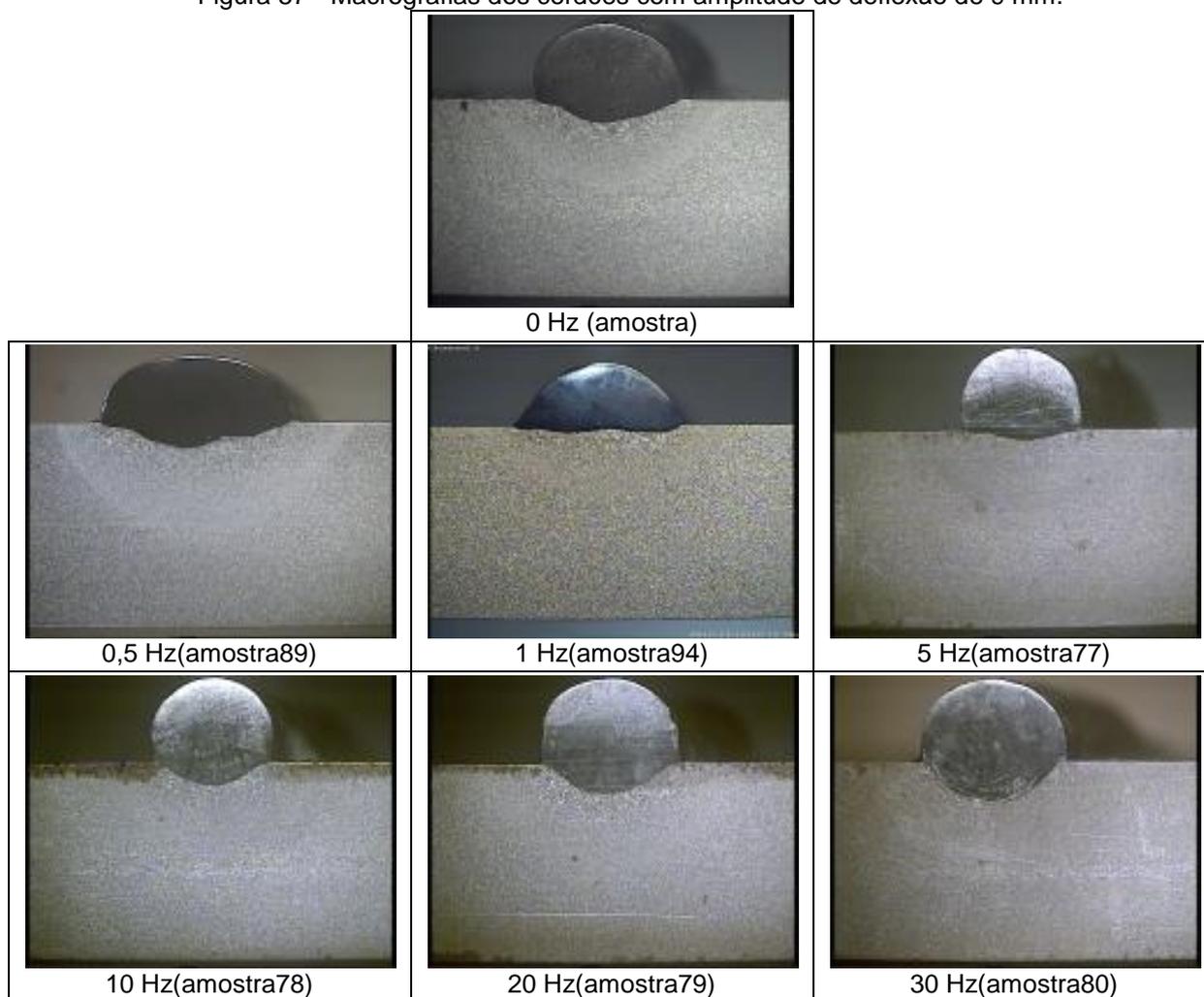


Fonte: A autora.

As amostras dos cordões realizados com frequências de 0,5 Hz e 1 Hz apresentaram larguras maiores porque o tempo que o arco permanece nas laterais é maior para frequências menores, por isso a largura é maior nestas amostras do que nas demais apresentadas com as demais frequências utilizadas.

A figura 57 mostra as macrografias das seções transversais dos cordões com a amplitude de deflexão de 9,0 mm e tensão aplicada no eletroímã de 12 V.

Figura 57 - Macrografias dos cordões com amplitude de deflexão de 9 mm.

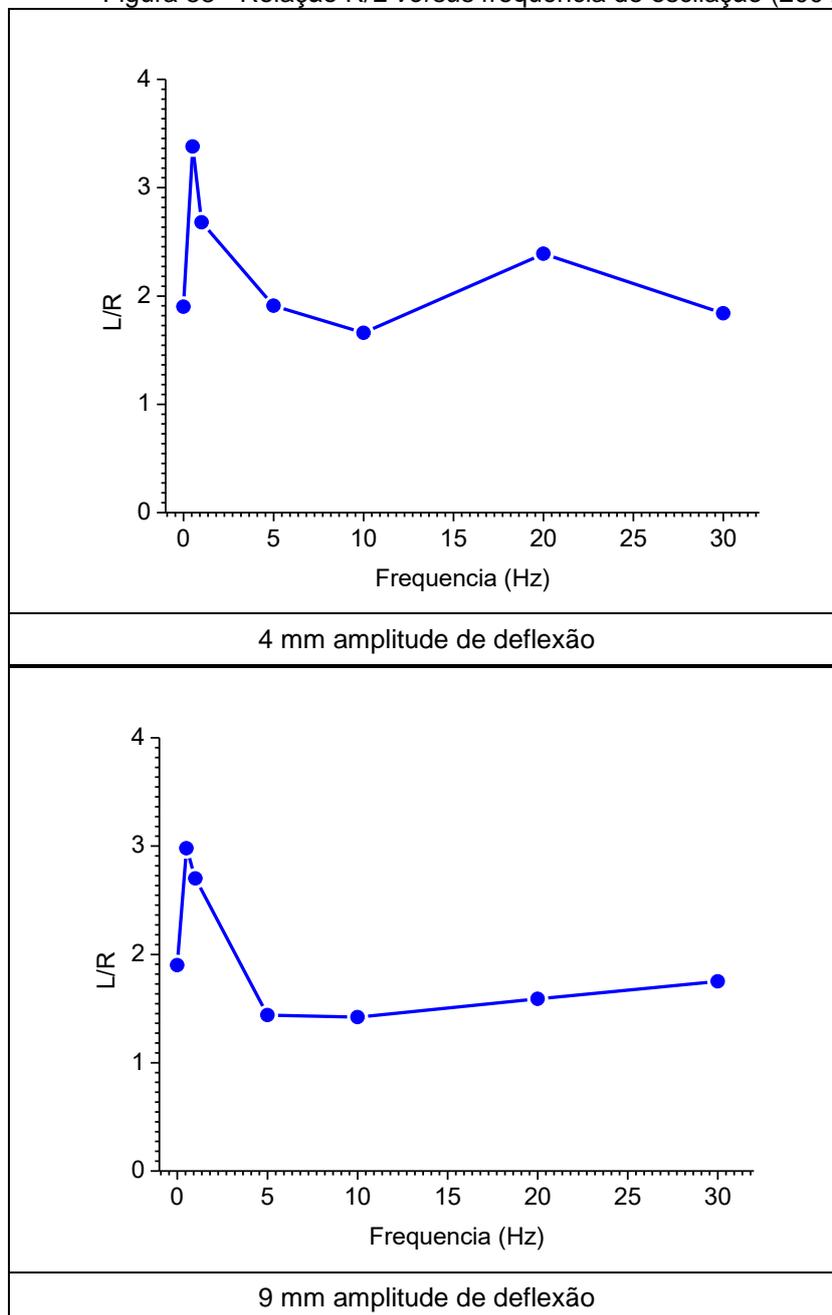


Fonte: A autora.

As amostras dos cordões realizados com frequências de 0,5 Hz e 1 Hz apresentaram larguras maiores pelo mesmo fenômeno descrito anteriormente. O tempo que o arco permanece nas laterais é maior para frequências menores, por isso a largura é maior nestas amostras do que nas demais apresentadas com as demais frequências utilizadas.

As curvas apresentadas na figura 58 mostram a relação geométrica entre largura e reforço em função da frequência de oscilação longitudinal ao cordão de solda.

Figura 58 - Relação R/L versus frequência de oscilação (200 A).

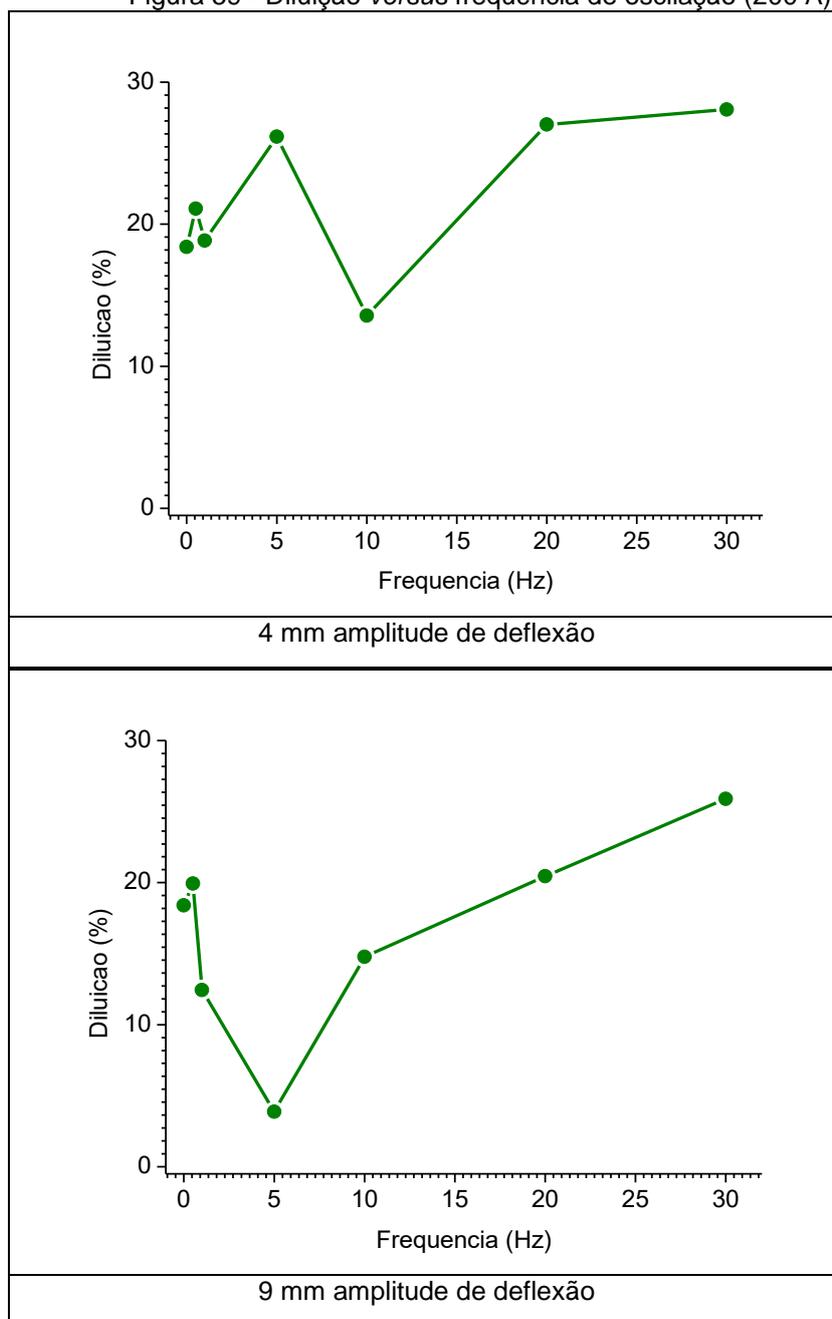


Fonte: A autora.

A morfologia do cordão (relação L/R) apresentou-se maior para as frequências de oscilação menores que 1 Hz, inclusive, para as duas amplitudes utilizadas. Na média a relação permaneceu em 2.

As curvas apresentadas na figura 59 mostram a diluição em função da frequência de oscilação longitudinal ao cordão de solda.

Figura 59 - Diluição versus frequência de oscilação (200 A).



Fonte: A autora.

A diluição dos cordões foi de aproximadamente 26% para as amostras com frequência de oscilação de 5 Hz e amplitude de deflexão de 4 mm. Já para a amplitude de deflexão de 9 mm com a mesma frequência de oscilação a diluição foi 4%.

O comportamento da diluição foi semelhante para as amostras com oscilação longitudinal com frequências de 10 Hz, 20 Hz e 30 Hz.

### 4.3 Considerações sobre a microestrutura do cordão

#### 4.3.1 Microestrutura do cordão - oscilação magnética no sentido transversal

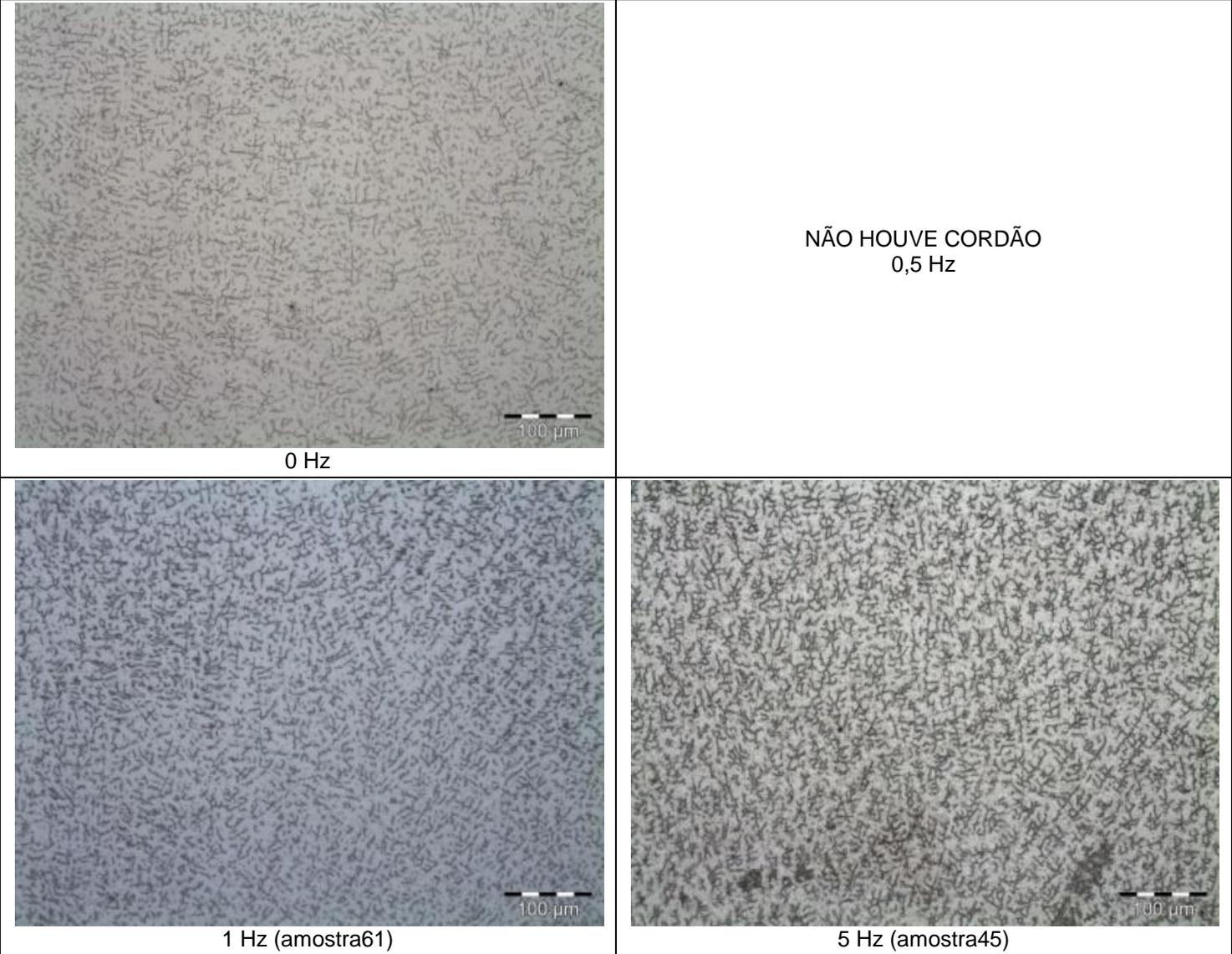
As figuras 60a, 60b, 61a, 61b, 62a, 62b, 63a e 63b apresentam as micrografias do centro dos cordões para as diferentes frequências de oscilação e para DEP = 6,2 mm.

Nota-se que para diferentes frequências de oscilação utilizadas não foi possível observar claramente alteração microestrutural. Tais resultados são semelhantes aos encontrados no estudo de Corradi *et. al.* (2015) com oscilação magnética realizada com GMAW. Além disso, a estrutura obtida nas micrografias é compatível com a estrutura bruta de fusão de aços inoxidáveis austeníticos em condições sem oscilação magnética, conforme observado por Inoue e Koseki (2007).

As imagens assemelham-se com as estruturas de solidificação ferrítica-austenítica descrita por Lippold & Kotecki (2005) (Figura 18c). Para todas as frequências utilizadas com corrente nominal de 150 A as micrografias do centro do cordão tem esta característica de solidificação matriz austenítica (parte clara) com “esqueleto” de ferrita  $\delta$  (parte escura).

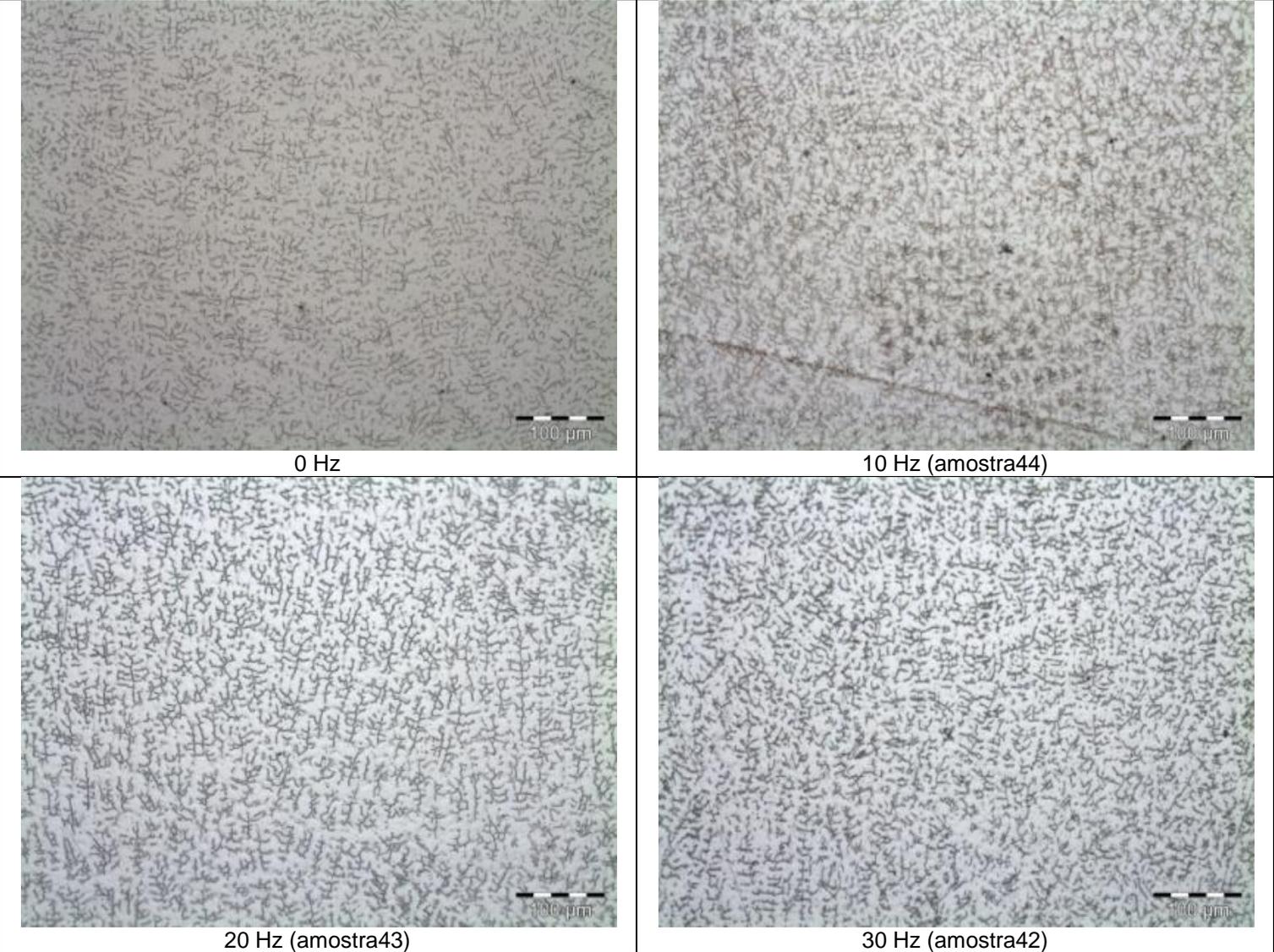
Para a corrente nominal de 200 A (figuras 62 e 63) as micrografias apresentam a mesma formação para todas as frequências de oscilação utilizadas, exceto para na micrografia do centro do cordão da frequência de oscilação de 30 Hz e amplitude de 15 mm (figura 63) em que a estrutura assemelha-se à solidificação descrita por Lippold & Kotecki (2005) tipo austenítica-ferrítica conforme a figura 18b.

Figura 60a - Micrografias: Amplitude de deflexão = 6 mm (150 A).



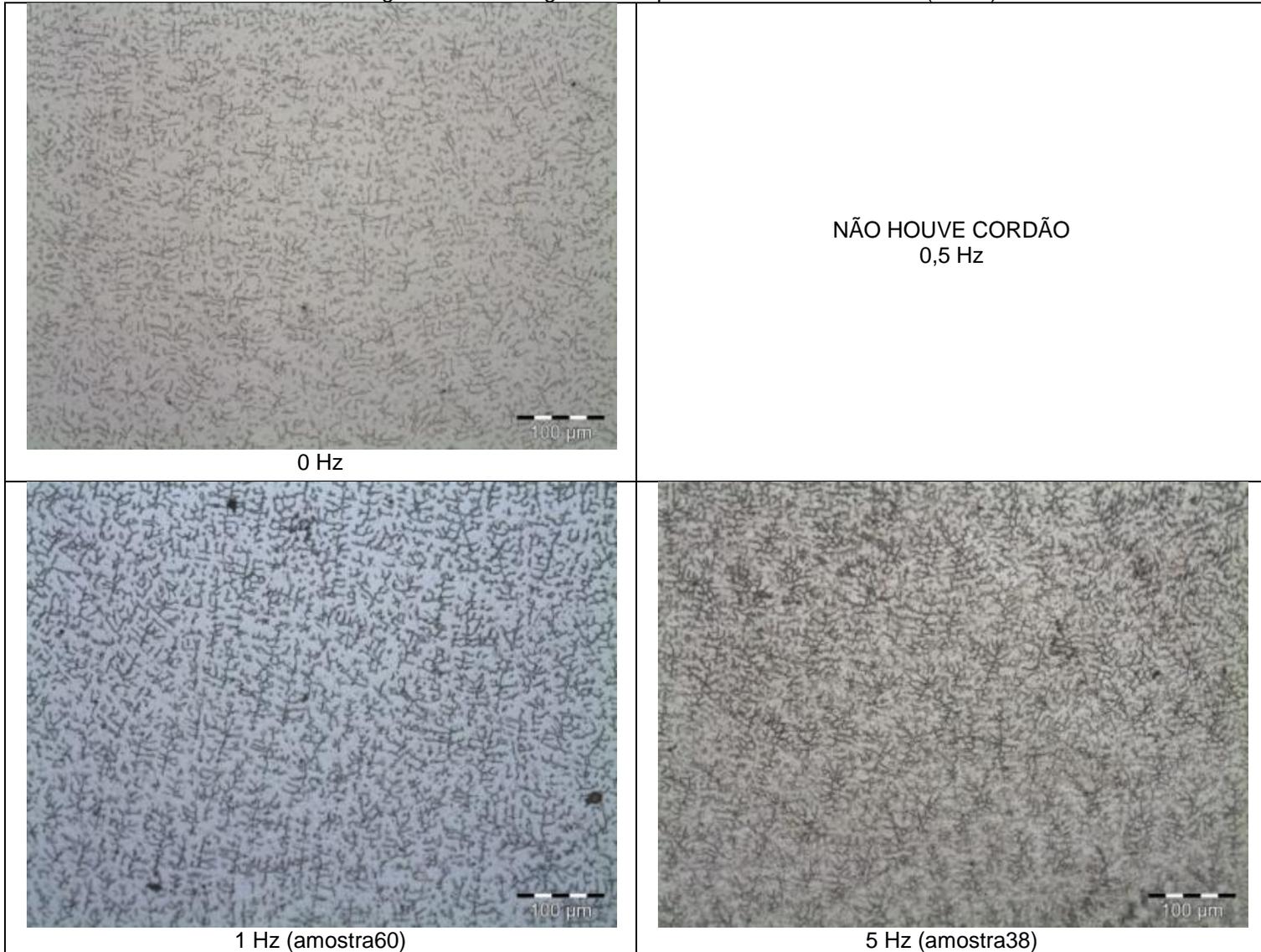
Fonte: A autora.

Figura 61b - Micrografias: Amplitude de deflexão = 6 mm (150 A).



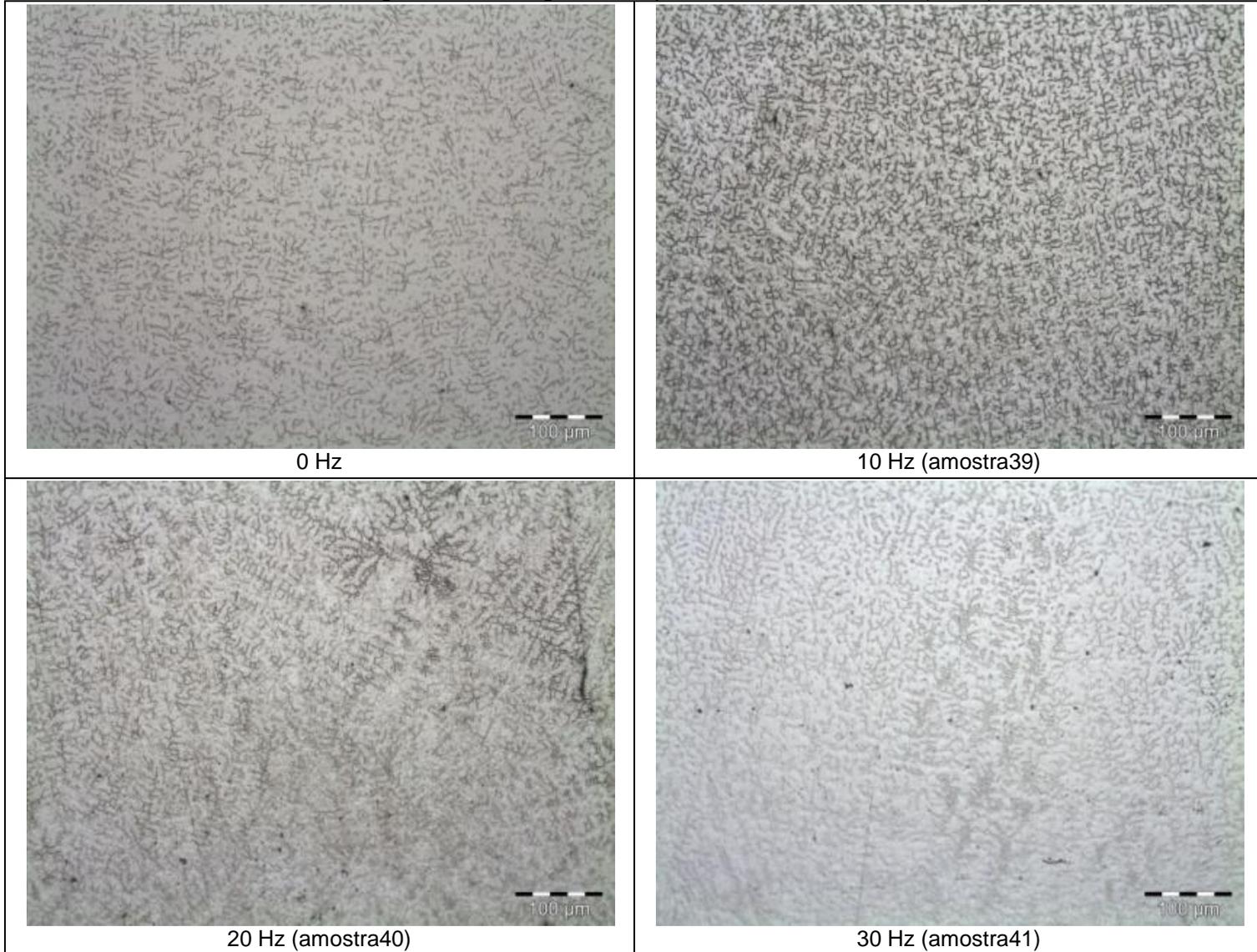
Fonte: A autora.

Figura 62a - Micrografias: Amplitude de deflexão = 7mm (150 A).



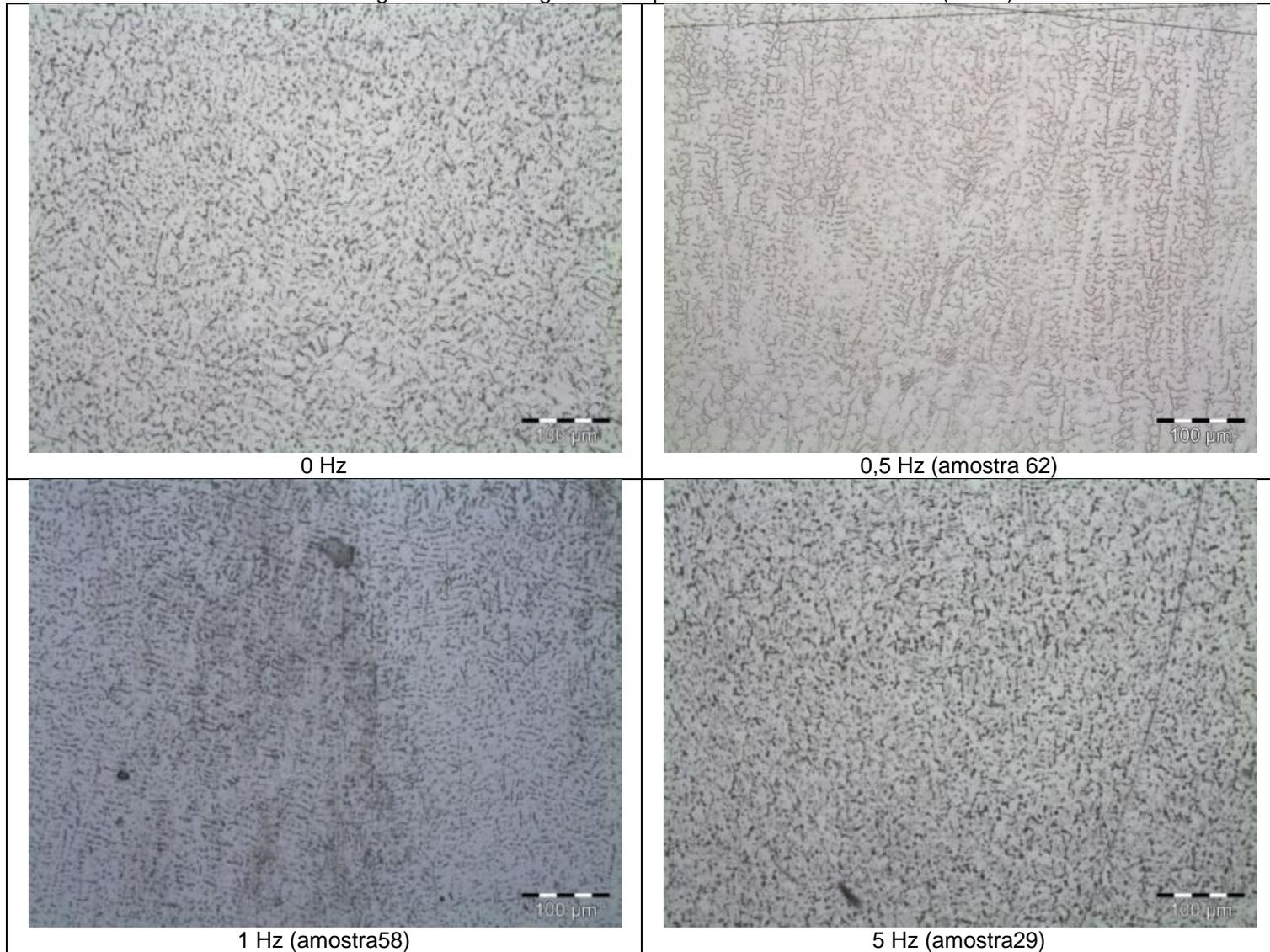
Fonte: A autora.

Figura 63b - Micrografias: Amplitude de deflexão = 7mm (150 A).



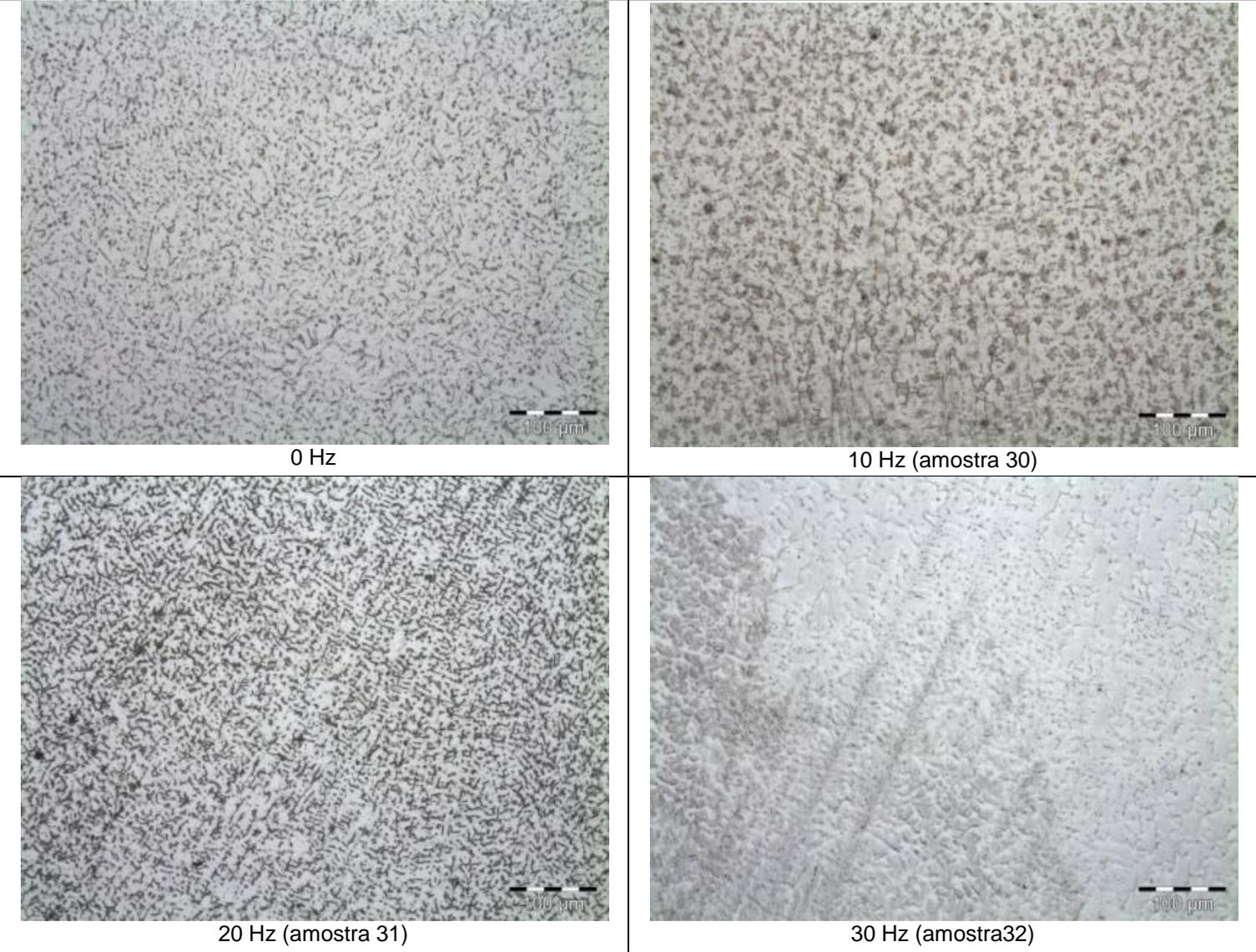
Fonte: A autora.

Figura 64a - Micrografias: Amplitude de deflexão = 12 mm (200 A).



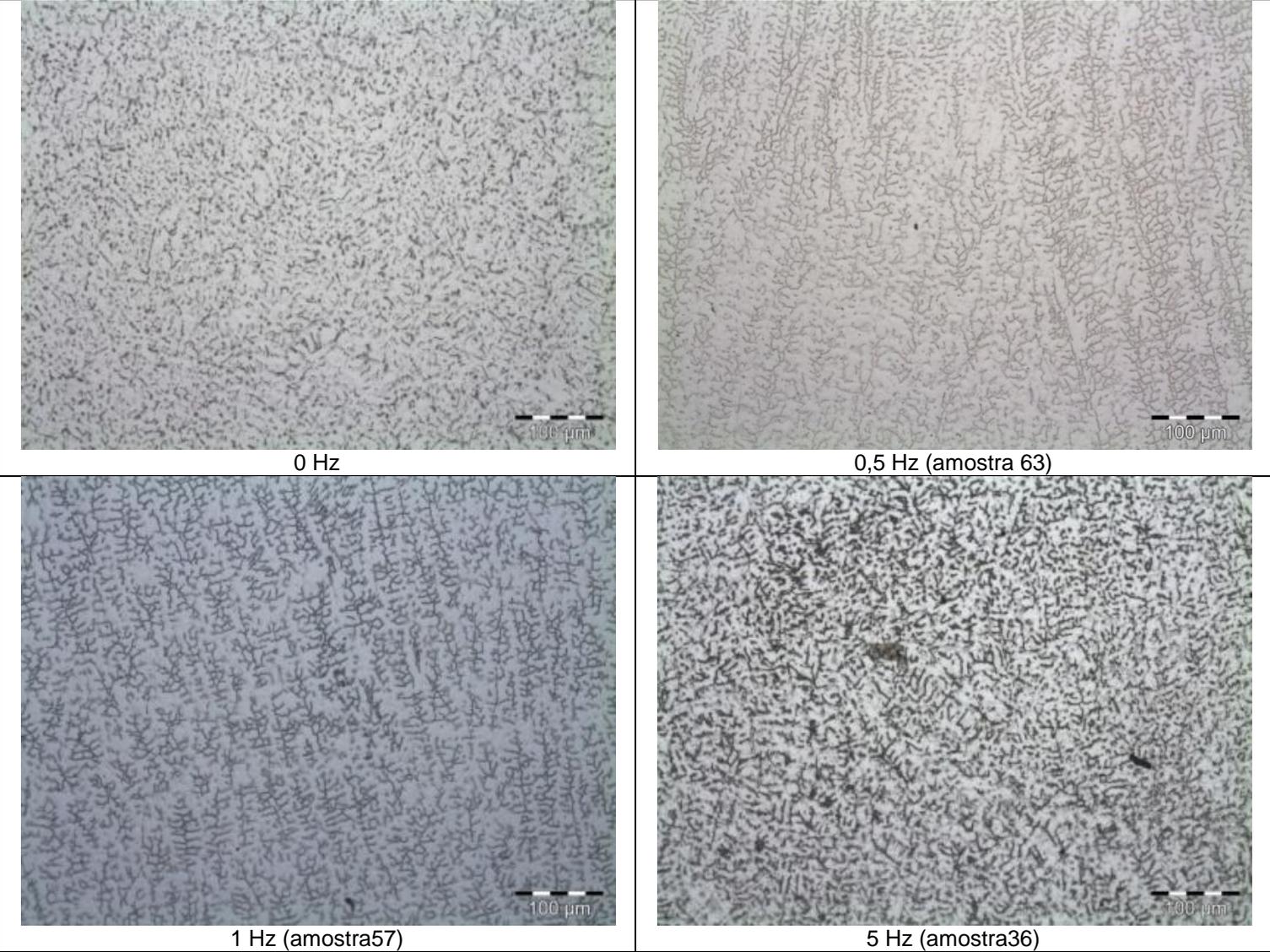
Fonte: A autora.

Figura 65b - Micrografias: Amplitude de deflexão = 12 mm (200 A).



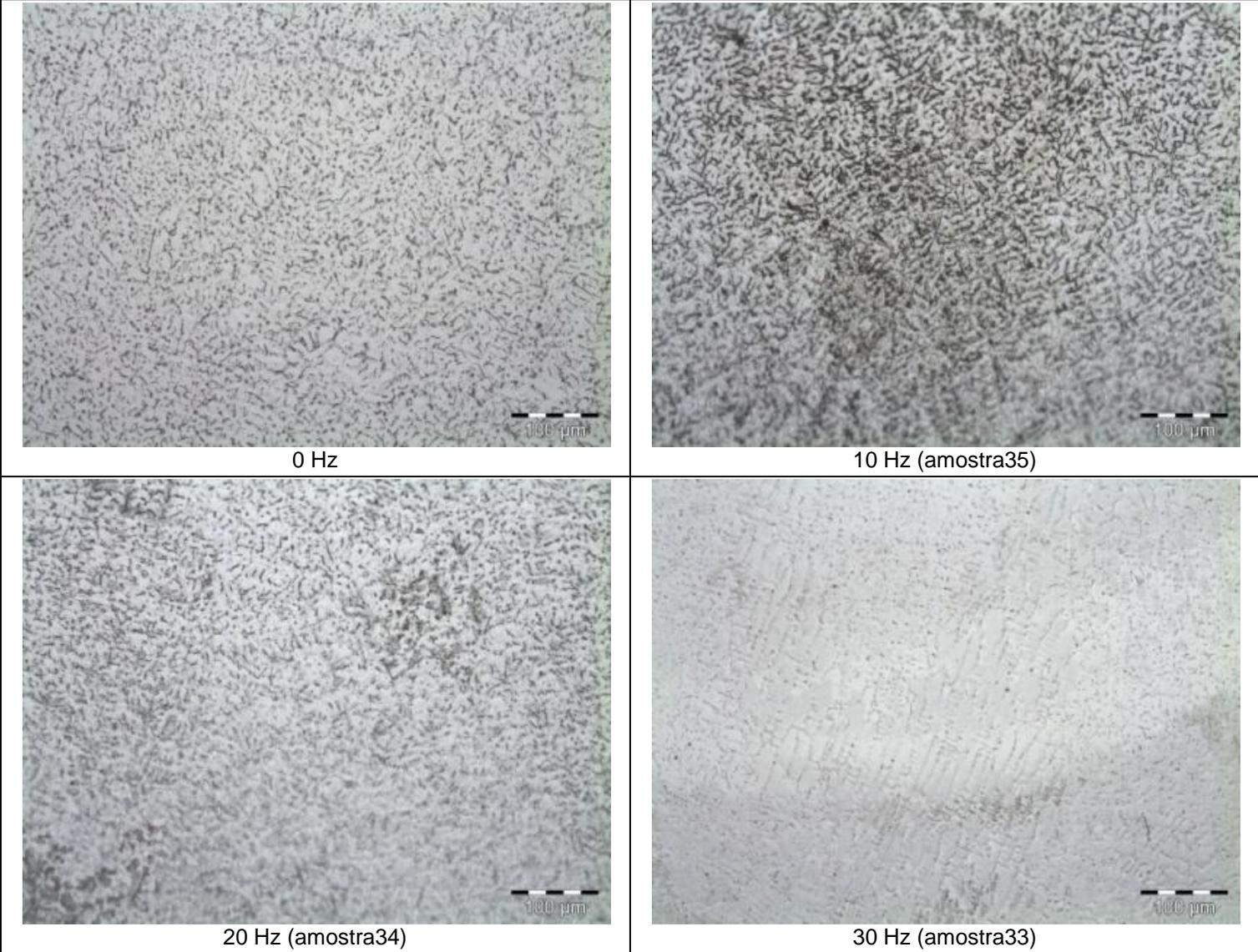
Fonte: A autora.

Figura 66a - Micrografias: Amplitude de deflexão = 15 mm (200 A).



Fonte: A autora.

Figura 67b - Micrografias: Amplitude de deflexão = 15 mm (200 A).



Fonte: A autora.

#### 4.3.2 Microestrutura do cordão - oscilação magnética no sentido longitudinal

As figuras 64a, 64b, 65a, 65b, 66a, 66b, 67a e 67b apresentam as micrografias do centro dos cordões para as diferentes frequências de oscilação e para DEP = 9,5 mm.

Nas micrografias apresentadas na figura 64a e 64b apresentam solidificação do tipo austenítica-ferrítica para as frequências de oscilação de 1 Hz, 5 Hz, 10 Hz, 20 Hz e 30 Hz, semelhante a figura 18c. Já a micrografia do centro do cordão da amostra com frequência de oscilação de 0,5 Hz assemelha-se a figura 18a (descrita por Lippold & Kotecki; 2005) com o tipo de solidificação austenítica.

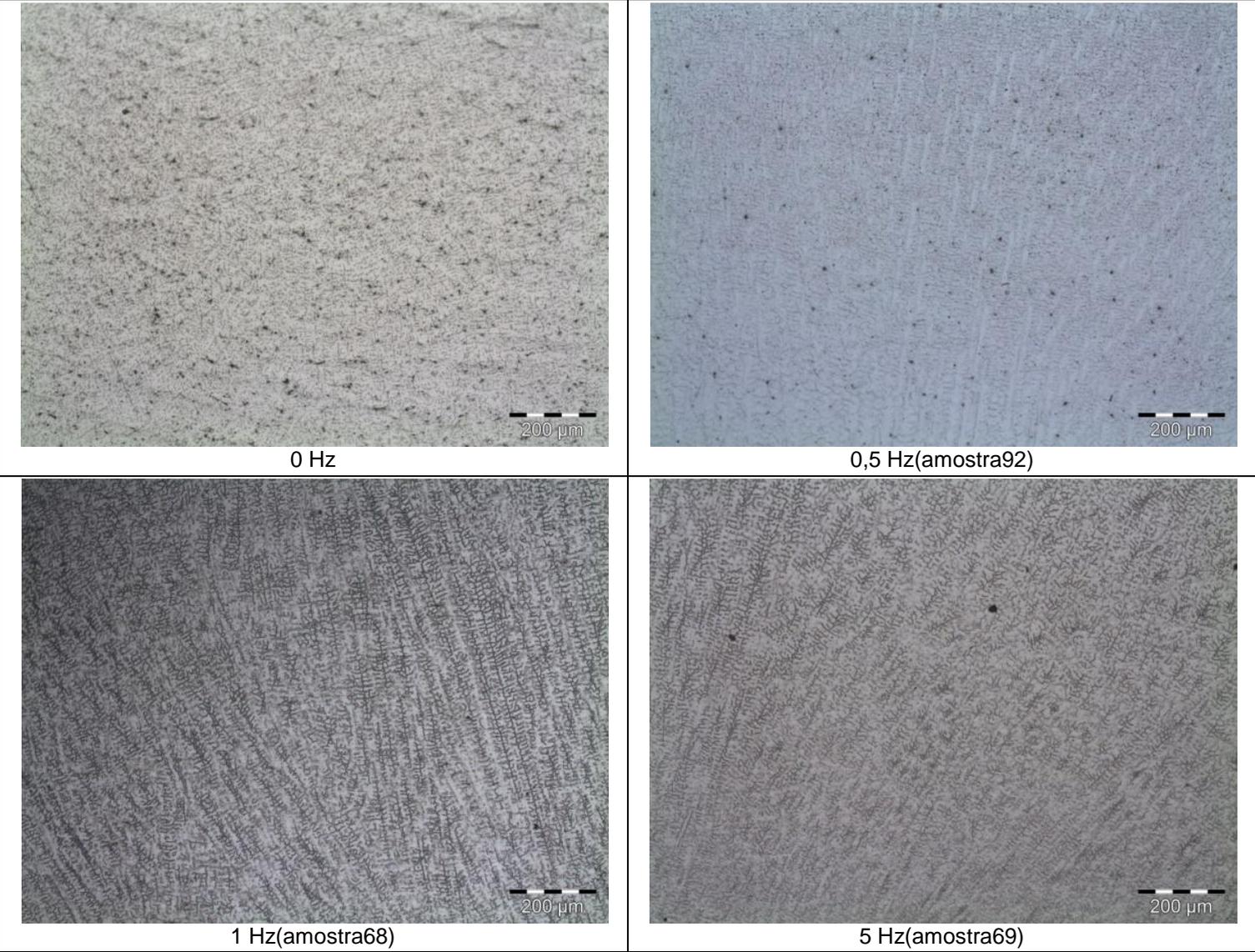
As micrografias da figura 65a com frequência de oscilação longitudinal de 0,5 Hz e 1 Hz (amplitude de deflexão de 7 mm) também apresentam a forma de solidificação austenítica. As demais frequências utilizadas assemelham-se à figura 18c com solidificação do tipo austenítica-ferrítica.

As figuras 66a, 66b, 67a e 67b mostram as micrografias dos centros dos cordões das amostras que foram realizadas com a corrente nominal de 200 A. Para esta corrente utilizada, as amostras não apresentaram alterações na forma de solidificação, assemelhando-se à forma da figura 18a, tipo de solidificação austenítica.

A micrografia da amostra de 0,5 Hz com 4 mm de amplitude de deflexão e corrente nominal de 200 A (figura 66a) apresenta da região do meio para o topo do cordão um tipo de solidificação diferente da solidificação da base para o meio do cordão. A região da base para o meio apresenta-se como solidificação austenítica e do meio para o topo a estrutura assemelha-se a solidificação ferrítica-austenítica. Este fato deve-se possivelmente ao retorno do arco, quando da sua oscilação para trás, fazendo com que o topo do cordão outrora solidificado, novamente volte ao estado líquido.

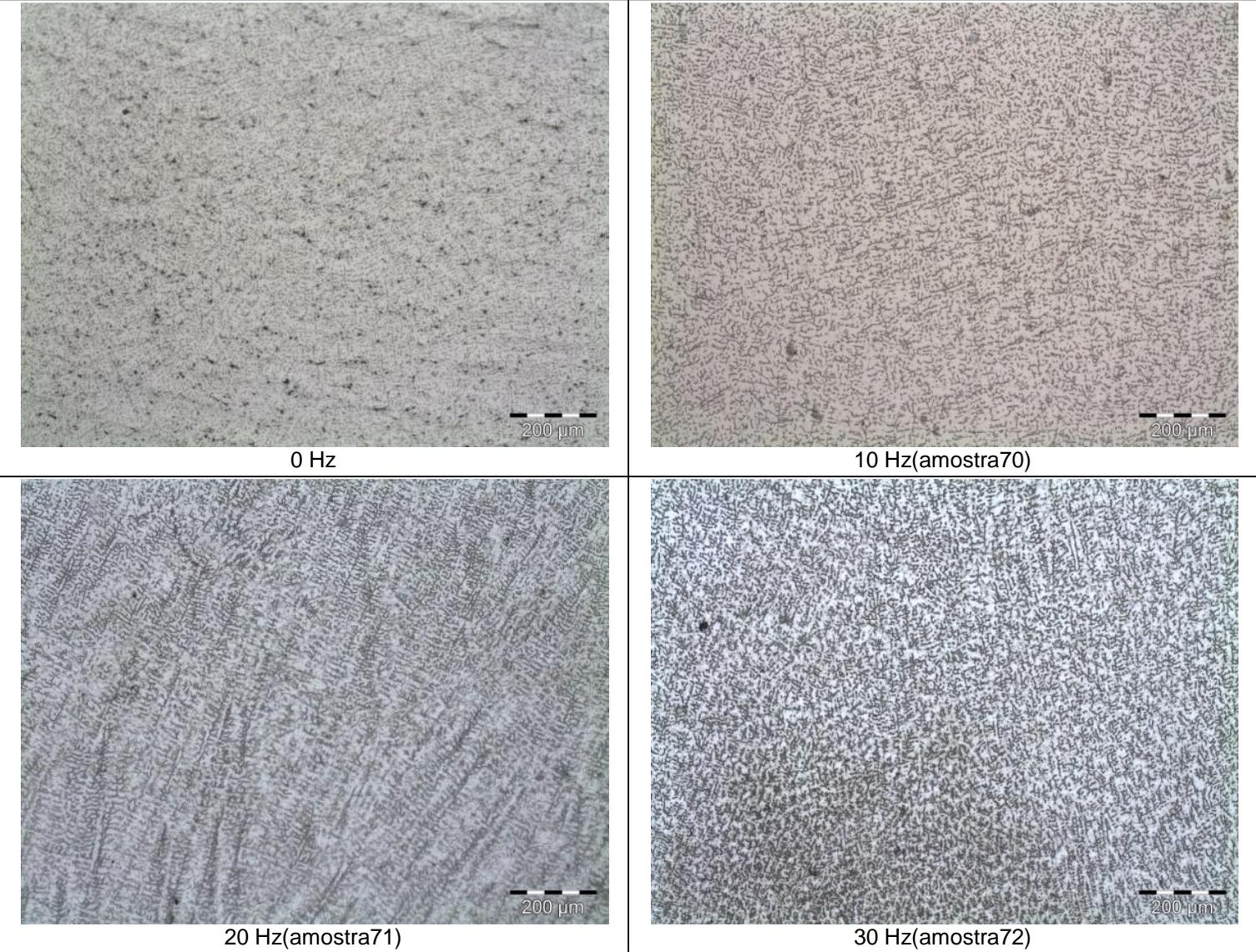
Na figura 67b, a amostra de 10 Hz de oscilação e 9 mm de amplitude de deflexão apresenta a solidificação austenítica com uma particularidade de apresentar várias direções de solidificação.

Figura 68a - Micrografias: Amplitude de deflexão = 4 mm (150 A).



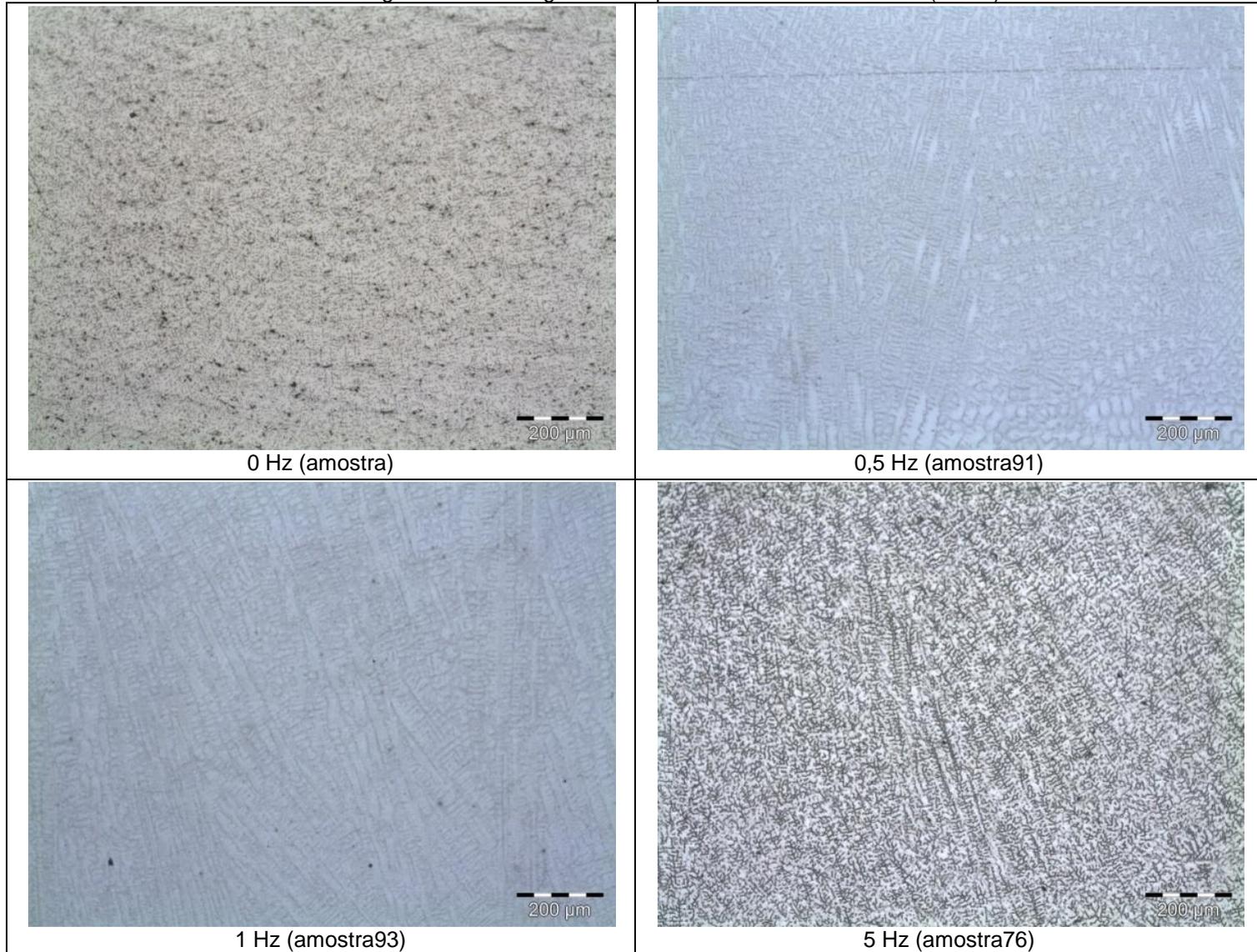
Fonte: A autora.

Figura 69b - Micrografias: Amplitude de deflexão = 4 mm (150 A).



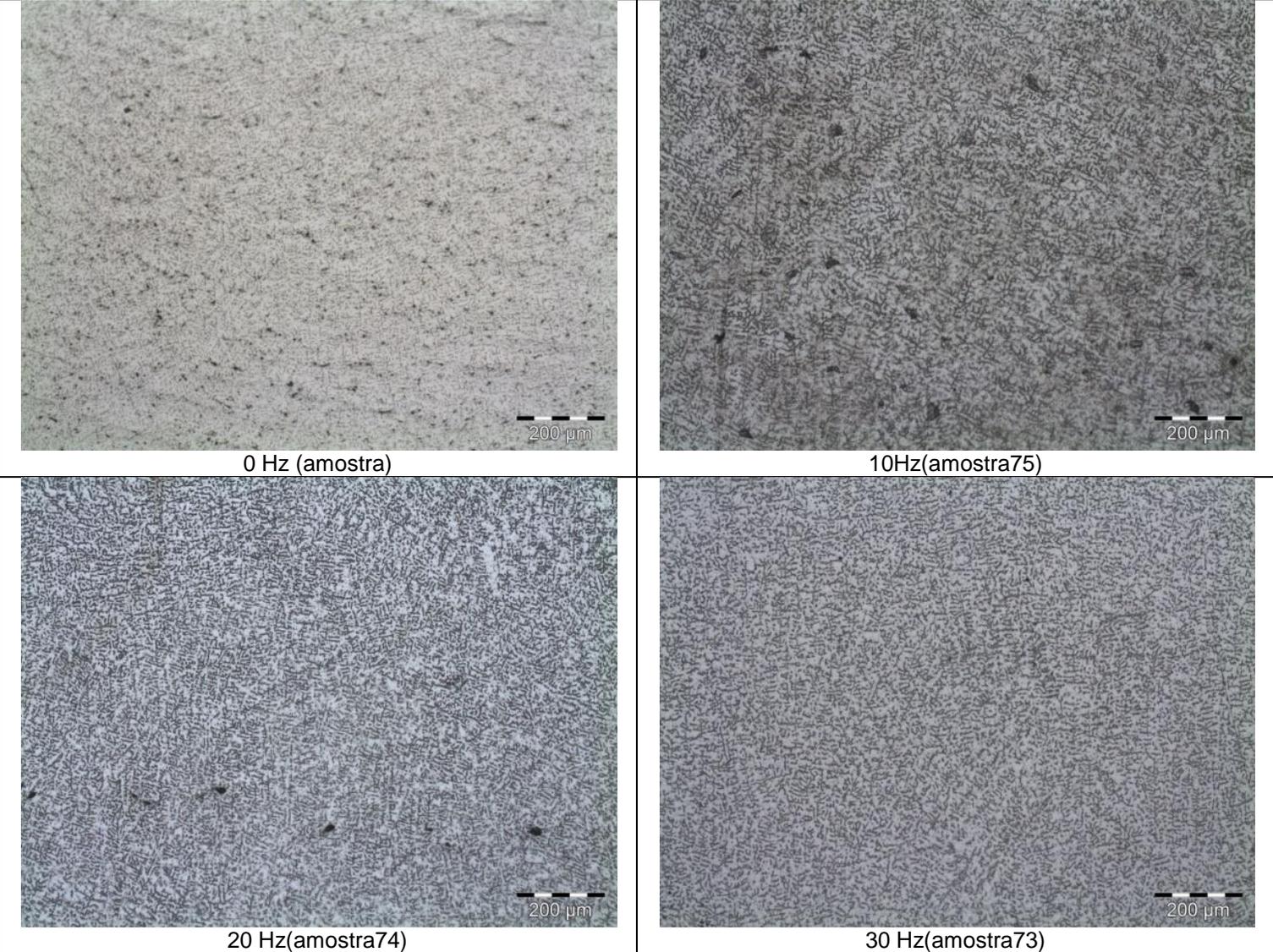
Fonte: A autora.

Figura 70a - Micrografias: Amplitude de deflexão = 7 mm (150 A)



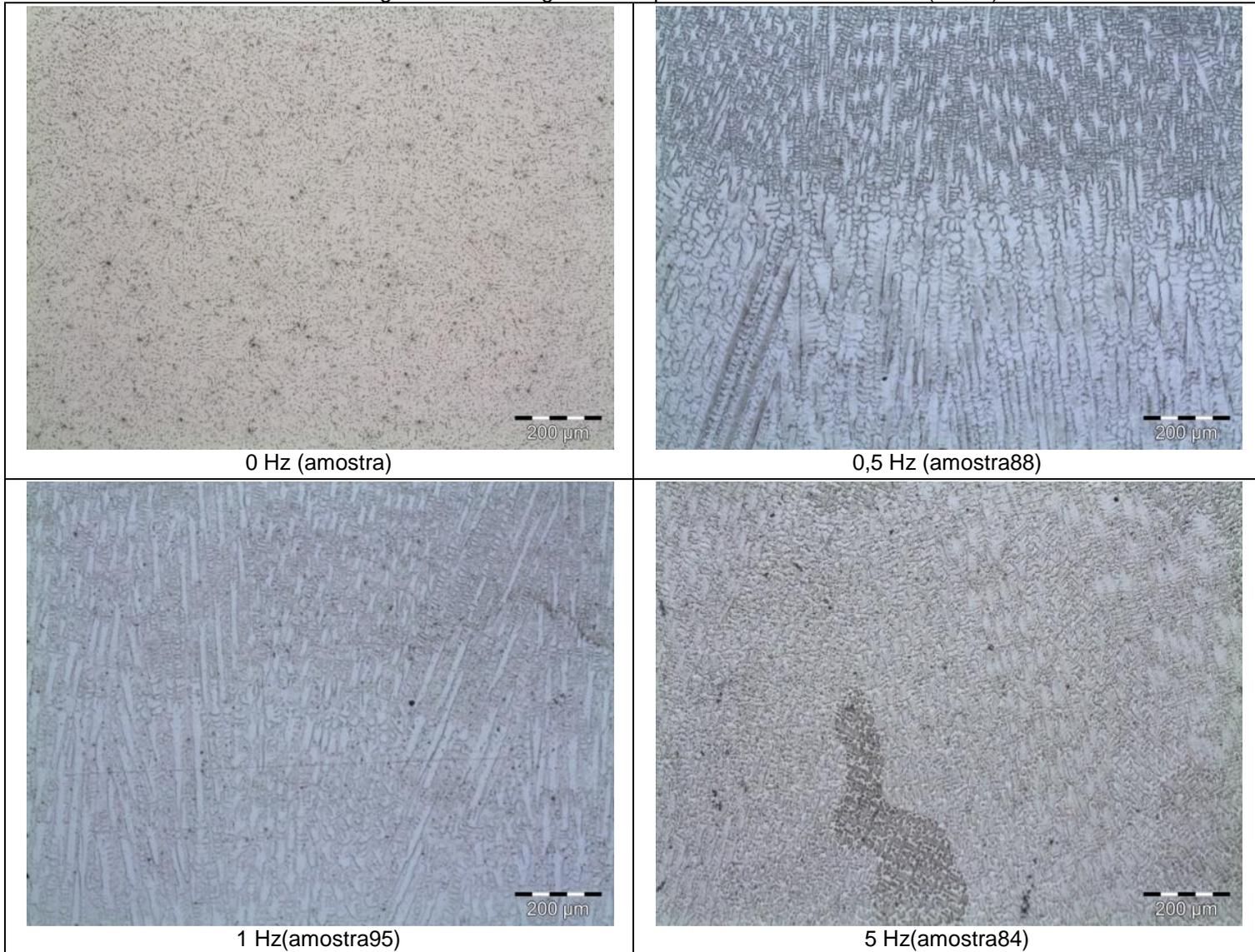
Fonte: A autora.

Figura 71b - Micrografias: Amplitude de deflexão = 7 mm (150 A).



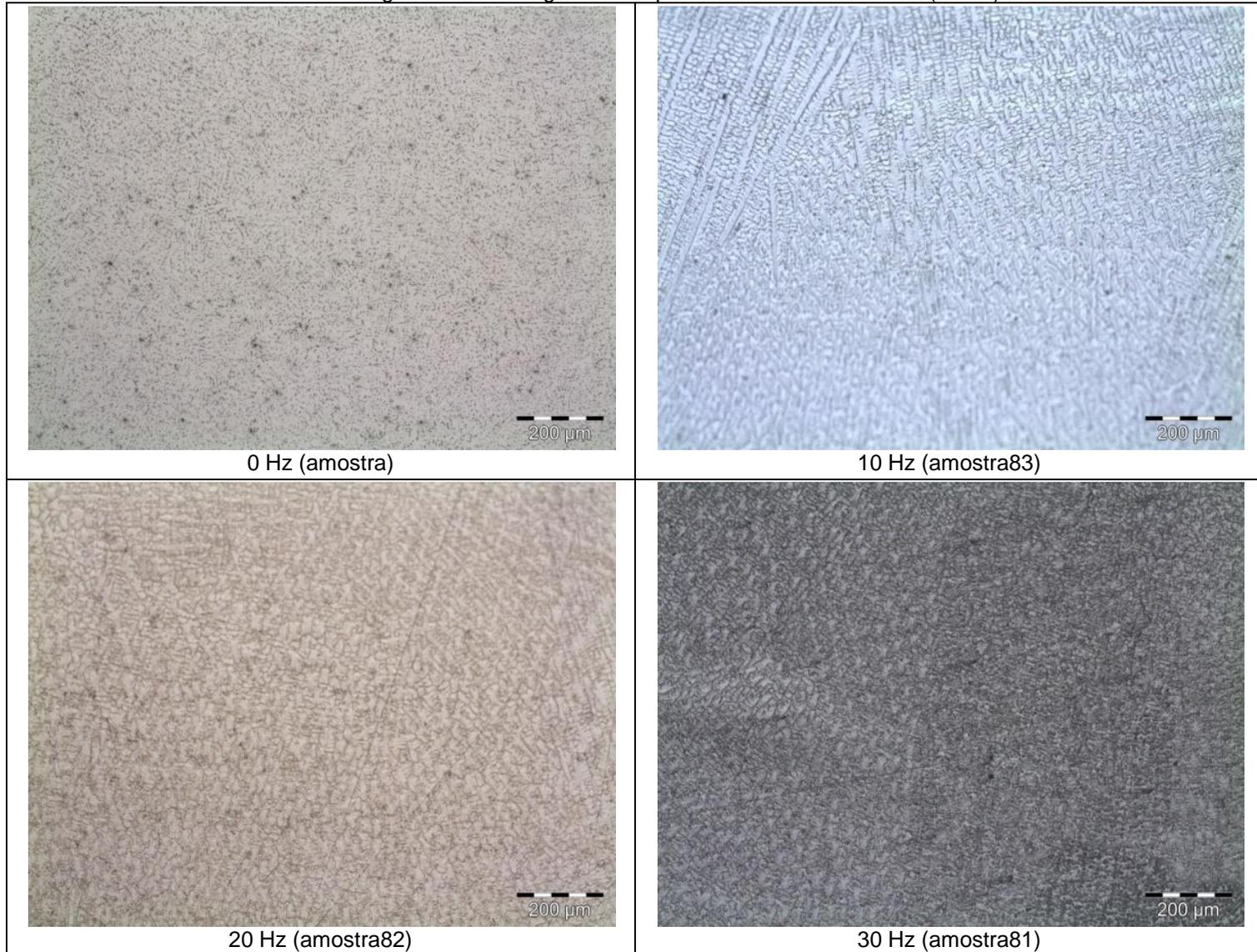
Fonte: A autora.

Figura 72a - Micrografias: Amplitude de deflexão = 4 mm (200 A)



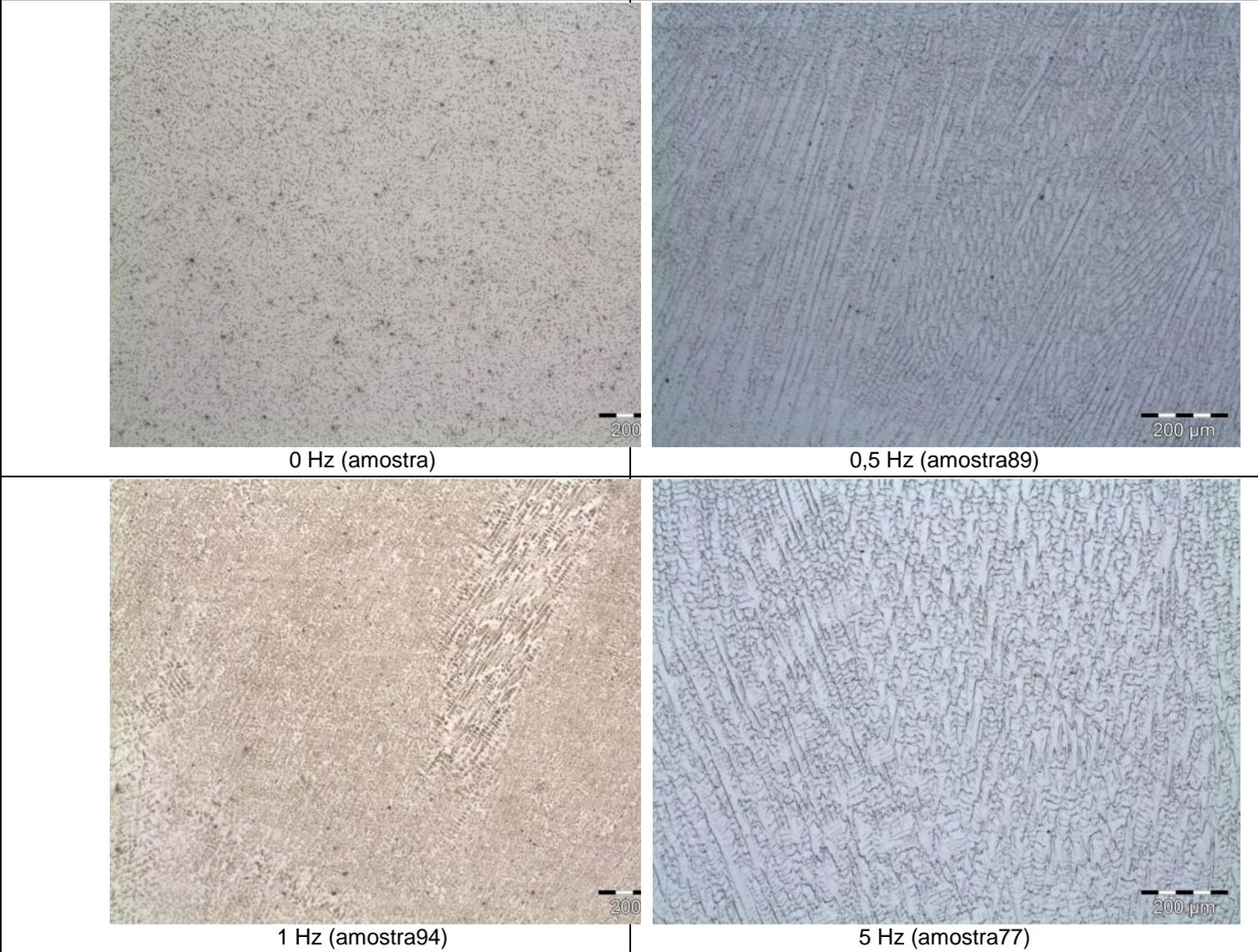
Fonte: A autora

Figura 73b - Micrografias: Amplitude de deflexão = 4 mm (200 A)



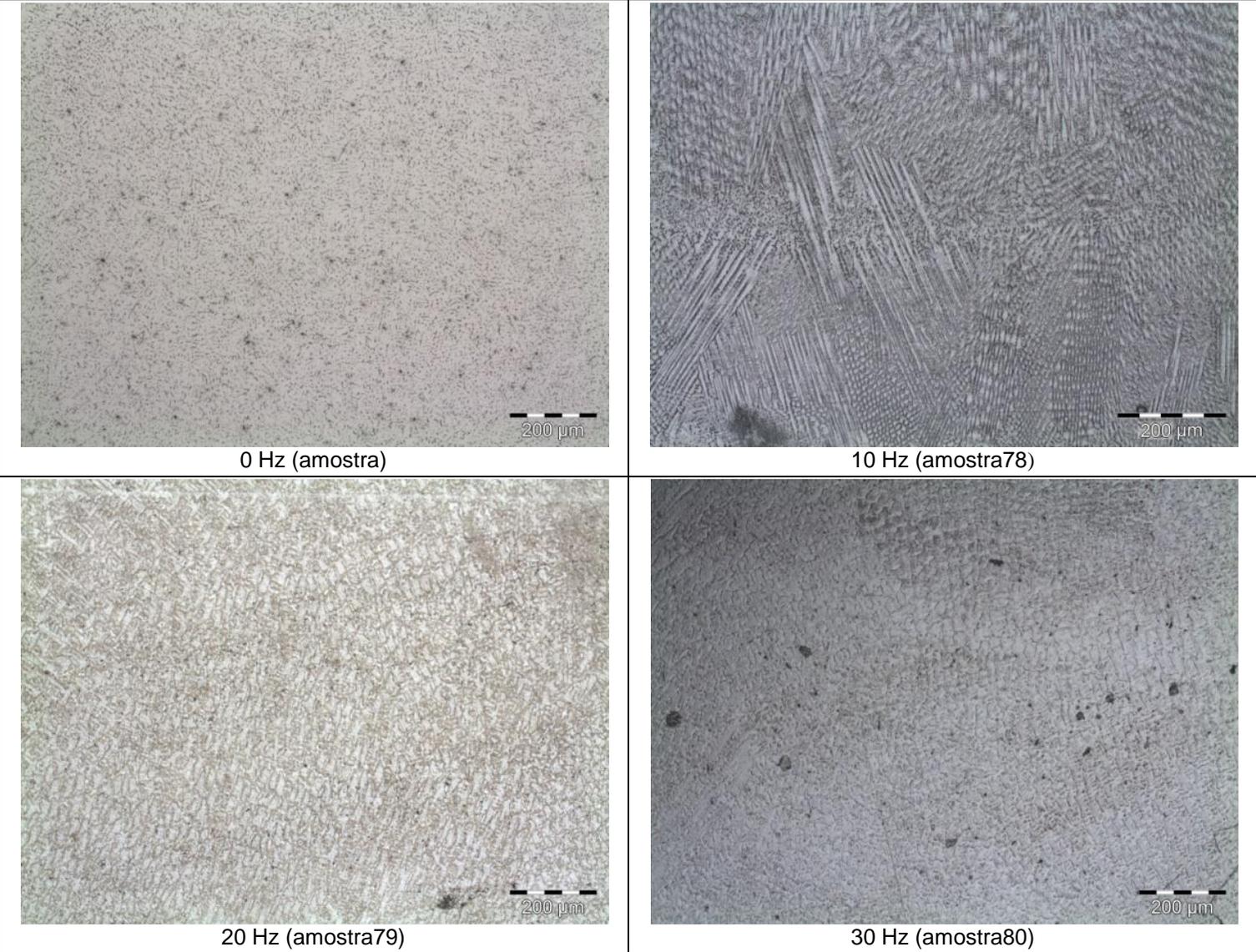
Fonte: A autora

Figura 74a - Micrografias: Amplitude de deflexão = 9 mm (200 A).



Fonte: A autora.

Figura 75b - Micrografias: Amplitude de deflexão = 9 mm (200 A).



Fonte: A autora.

## 5 CONCLUSÃO

A partir das condições, parâmetros e materiais utilizados neste trabalho pode-se concluir que:

- ✓ Maiores valores de DEP implicam em maiores valores amplitude de deflexão.

- ✓ O aumento da corrente de soldagem não mostrou uma clara relação com a amplitude de deflexão.

- ✓ As larguras dos cordões foram maiores quanto menores as frequências de oscilação, para a oscilação magnética transversal, exceto para 150 A.

- ✓ Existe uma tendência de melhora da molhabilidade com o aumento da frequência de oscilação. Para frequências abaixo de 5 Hz o comportamento parece ser mais acentuado;

- ✓ Existe uma tendência de aumento da diluição com o aumento da frequência de oscilação, exceto para frequências abaixo de 5 Hz onde a diluição apresenta forte queda.

- ✓ Quanto maior o comprimento do arco menor penetração e maior largura do cordão de solda e o reforço tende a diminuir com o aumento do comprimento do arco.

- ✓ As micrografias dos centros dos cordões apresentaram estrutura ferrítica (parte escura) e austenítica (parte clara) com as formas de solidificação totalmente austenítica, austenítica-ferrítica e ferrítica-austenítica. As frequências de oscilação utilizadas parecem não alterar a microestrutura quando comparadas as amostras realizadas sem oscilação.

## 6 TRABALHOS FUTUROS

A fim de explorar melhor a ideia proposta, algumas sugestões são apresentadas para dar continuidade a este estudo:

- Analisar comportamento da deflexão magnética com outros intervalos de DEE bem como com outros intervalos de tensões no eletroímã;
- Executar ensaios de corrosão nas amostras a fim de verificar a resistência à corrosão apresentada;
- Modificar o tipo de material do depósito verificando assim se o método proposto pode modificar a microestrutura de outro material;
- Executar cordões de solda com oscilação magnética circular (*magnetic stirring*);
- Executar mais cordões de solda sobrepostos (utilização de revestimentos) a fim de verificar a modificação da microestrutura.

## 7 REFERÊNCIAS

Arc Products - A Lincoln Electric Company. **Controls and Probes**. Disponível em <http://www.ap-automation.com/controls-probes.shtml>. Acesso em 2015.

BATISTA, V. R. *et al.*, **Efeito dos parâmetros de soldagem sobre a geometria e diluição de revestimentos de liga de níquel aplicados em aço API 5L Gr B**. Revista Eletronica de Materiais e Processos, Campina Grande , v. 6.3, n. 3, p. 181-187, 2011.

BALASUBRAMANIAN, V. *et al.* **Application of response surface methodology to prediction of dilution in plasma transferred arc hardfacing of stainless steel on carbon steel**. International Journal of Iron and Steel Research, v. 16, n. 1, p. 44-53, 2009.

BRACARENSE, A. Q. **Apostila Processo de Soldagem TIG – GTAW**. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2000.

COPAERT, H. **Metalografia dos Produtos Siderurgicos Comuns**. 3ª ed. Edgard Blücher Ltda. 1997.

CORRADI, D. R. *et al.*, **Influência da Oscilação Eletromagnética do Arco Elétrico na Soldagem GMAW do Aço Inoxidável Austenítico AISI 316L**. In: Congresso Brasileiro de Engenharia De Fabricação, 8º, 2015, Salvador, Bahia. Brasil, 2015.

ESAB. Disponível em: <http://www.esab.com.br>. Acesso em 2014.

ESAB. **Manual de Instruções - Fonte de energia para soldagem TIG e eletrodo revestido**. Revisão 2006. Disponível em: <http://www.esab.com.br>. Acesso em 2016.

ESAB. **Manual de Instruções - Alimentador de Arame**. Revisão 2006. Disponível em: <http://www.esab.com.br>. Acesso em 2016.

FASCHING, A. A.; EDWARDS, G. R.; DAVID, S. A.. **Grain refinement and hydrogen embrittlement in iron aluminide alloy FA129**. Science And Technology Of Welding And Joining. v. 2, n. 4, p.167-173, jan. 1997

FANARA, C.; VILARINHO, L.O.. **Electrical Characterization of Atmospheric Pressure Arc Plasmas – na Overview**. European Physical Journal D, v.28, p. 241-251, 2004.

Guia da soldagem TIG. Disponível em: <http://www.soldatig.org>. Acesso em 2015.

GUILHERME, L. A. **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, 2012.

GHOSH, P. K.; GUPTA, P. C.; GOYAL, V. K. **Stainless steel cladding of structural steel plate using the pulsed current GMAW process**. Welding Journal, v. 77, n. 7, p. 307-314, 1998.

GOMES, J. H. F., *et. al.* **Otimização de Múltiplos Objetivos na Soldagem de Revestimento de Chapas de Aço Carbono ABNT 1020 Utilizando Arame Tubular Inoxidável Austenítico**. Soldagem & Inspeção. São Paulo , v. 16, n. 3, p. 232-242, 2011.

GREENE, William J.; **Magnetic Oscillation of Welding Arc**. Patente, Scotch Plains. 1, 1960. Disponível em: <http://www.google.st/patents/US2920183>. Acesso em 13/12/2015.

HANGIL Autowelding, **Magnetic Arc Oscillator**. Disponível em <http://www.autowelding.com/eproduct29.htm>. Acesso em 2015.

INOUE, H.; KOSEKI, T. **Clarification of Solidification Behaviors in Austenitic Stainless Steels Based on Welding Process**. Nippon Steel Technical Report, 2007, v.95 (January), p. 62-70.

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

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

KOU, S. **Welding Metallurgy**. 2ª edição, 2003.

LIM, Y.C. *et. al.* **Effect of magnetic stirring on grain structure refinement Part 1 - Autogenous nickel alloy welds**. Science and Technology of Welding and Joining, v. 15, p. 583-589, 2010.

LIPPOLD, J. C.; KOTECKI, D. J. **Weldin Metallurgy and Weldability of Stailess Steels**. Wiley-Interscience. New Jersey. 2005. 357 p.

LORENTZ, Hendrik Antoon. Disponível em: [http://www.if.ufrgs.br/tex/fis142/mod08/m\\_s01.html](http://www.if.ufrgs.br/tex/fis142/mod08/m_s01.html). Acesso em 2015. Título: A força de Lorentz.

MAHAJAN, S. *et. al.*, **Effect of Mechanical Arc Oscillation on the Gran Structure of Mild Steel Weld Metal**. Transactions of Indian Institute of Metal , v. 65, n. 2, p. 171-177, 2012.

MODENESI, P. J. **Soldabilidade de Algumas Ligas Metálicas**.2011. 26 f. Apostila - Universidade Federal de Minas Gerais. Minas Gerais, Belo Horizonte.

MOUSAVI, M. G. *et. al.*, **Grain refinement due to grain detachment in electromagnetically stirred AA7020 welds**. Science and Technology of Welding and Joining, v. 8, n. 4, p. 309-312, 2003.

MURUGAN, N.; PARMAR, R. S. **Stainless steel cladding deposited by automatic gas metal arc welding**. Welding Journal, v. 76, p. 391s-403s, 1997.

ORSTED, Hans Christian. Disponível em: <http://brasilecola.uol.com.br/fisica/experimento-oersted.htm>. Acesso em 2015. Título: Orsted.

PALANI, P.K.; MURUGAN, N. **Optimization of weld bead geometry for stainless steel claddings deposited by FCAW**. Journal of Materials Technology, v. 190, p. 291-299, 2007.

RAO, S.R.K. *et. al.* **Grain refinement through arc manipulation techniques in Al–Cu alloy GTA welds**. Materials Science and Engineering. p. 227-234, 2005.

REIS, R.P.; SOUZA D; SCOTTI, A. **Models to Describe Plasma Jet, Arc Trajectory and Arc Blow Formation in Arc Welding**. *Welding in The World*, v. 55, p. 24-32, 2011.

REIS, R. P. **Assessment of low current tandem GMAW processes with waveform control and with aid of laser beam**. 2009. p10. p11. Tese de Doutorado - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

SALA DE FÍSICA. Free Domain. Disponível em: <http://www.geocities.ws/saladefisica8/eletromagnetismo/conductor.html>. Acesso em 2015.

SENAPAT, A.; MOHANTY, S. B. **Effects of External Magnetic Field on Mechanical Properties of a Welded**. *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)*. p. 297-303. 2014.

SILVA, C. R.; FERRARESI, V. A.; SCOTTI, A. **A quality and cost approach for welding process selection**. *J. Braz. Soc. Mech. Sci.*, Campinas , v. 22, n. 3, p. 389-398, 2000 .

SILVA, C. C. *et al* . **Minimização de defeitos em revestimentos de superligas de níquel depositada pelo processo TIG com alimentação de arame frio**. *Soldagem & Inspeção*, São Paulo , v. 19, n. 4, p. 323-332, 2014.

SILVA, A. L. C., MEI, P. R. **Aços e Ligas Especiais**. São Paulo: Edgard Blücher, 2010, 664 p.

SHAHI, A. S.; PANDEY, S. **Modelling of the effects of welding conditions on dilution of stainless steel claddings produced by gas metal arc welding procedures**. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 196, n. 1-3, p. 339-344, 2008.

SHARMA, S. S., KUMAR, M., OJHA, P. K. **Effect of Magnetic Field on Weld-Quality and Weld Geometry**. *Advances in Applied Physical and Chemical Sciences-A Sustainable Approach*, p.53-58. 2014.

SUNDARESAN, S.; RAM, G. D. J. **Use of magnetic arc oscillation for grain refinement of gas tungsten arc welds in  $\alpha$ - $\beta$  titanium alloys.** Science And Technology Of Welding And Joining, v. 4, n. 3, p.151-160, 1999.

SUUTALA N.; MOISIO T. (1979) **The relationship between solidification and microstructure in austenitic and austenitic-ferritic stainless steel welds.** Metallurgical Transactions A, vol. 10, p. 512-514.

VILARINHO, L. O. **O Arco TIG a 100 A e Argônio Puro É um Arco Especial?** Soldagem & Inspeção, v. 14, n.4, p.353-357, 2009.

VILLAFUERTE, J.C. e KERR, H. W. **Electromagnetic Stirring and Grain Refinement in Stainless Steel GTA Welds.** Welding Journal, p. 1S-13S, 1990.

WAINER, E.; BRANDI, S. D.; MELLO, F. D. H. **Soldagem: processos e metalurgia.** São Paulo: Edgard Blücher, 1992, 494 p.

## APENDICE I

Tabelas com valores de largura, reforço, relação L/R, relação R/L e diluição para cordões de solda realizados com oscilação magnética no sentido transversal ao sentido de soldagem.

Tabela 5 - Amplitude 6 mm - (150 A)

Amostra	Freq. de oscilação (Hz)	Largura (mm)	Reforço (mm)	L/R	R/L (%)	Diluição (%)
61	1	5,8	4,9	1,2	84,5	8,1
45	5	3,9	4,5	0,9	115,4	0,00
44	10	3,5	4,5	0,8	128,6	2,3
43	20	3,1	4,3	0,7	138,7	2,6
42	30	3,3	4,4	0,8	133,3	3,9

Tabela 6 - Amplitude 7 mm - (150 A)

Amostra	Freq. de oscilação (Hz)	Largura (mm)	Reforço (mm)	L/R	R/L (%)	Diluição (%)
60	1	3,8	4,8	0,8	126,3	0,0
38	5	4,7	4,3	1,1	91,5	0,0
39	10	3,9	4,5	0,9	115,4	5,7
40	20	3,0	4,4	0,7	146,7	3,0
41	30	3,2	4,5	0,7	140,6	0,0

Tabela 7 - Amplitude 12 mm - (200 A)

Amostra	Freq. de oscilação (Hz)	Largura (mm)	Reforço (mm)	L/R	R/L (%)	Diluição (%)
62	0,5	10,5	3,1	3,3	30,2	5,8
58	1	9,3	3,2	2,9	34,4	18,2
29	5	6,1	4,0	1,5	65,6	20,2
30	10	5,8	3,9	1,5	67,2	18,9
31	20	7,0	4,0	1,8	57,1	7,6
32	30	6,3	3,8	1,7	60,3	27,2

Tabela 8 - Amplitude 15 mm - (200 A)

Amostra	Freq. de oscilação (Hz)	Largura (mm)	Reforço (mm)	L/R	R/L (%)	Diluição (%)
63	0,5	12,2	3,2	3,8	26,3	5,3
57	1	8,9	3,4	2,6	38,2	18,9
33	30	7,8	3,2	2,4	41,0	29,4
34	20	7,0	3,5	2,0	50,0	22,8
35	10	6,0	3,9	1,5	65,0	16,8
37	5	5,3	3,9	1,4	73,5	16,7

Tabelas com valores de largura, reforço, relação L/R, relação R/L e diluição para cordões de solda realizados com oscilação magnética no sentido longitudinal ao sentido de soldagem.

Tabela 9 - Amplitude 4 mm - (150 A)

Amostra	Freq. de oscilação (Hz)	Largura (mm)	Reforço (mm)	L/R	R/L (%)	Diluição (%)
92	0,5	7,0	3,5	1,9	50,5	6,6
68	1	3,3	4,7	0,7	142,4	0,0
69	5	6,9	4,9	1,4	71,7	0,0
70	10	6,7	5,0	1,3	74,6	3,0
71	20	5,9	4,7	1,3	78,9	0,0
72	30	5,6	4,7	1,2	83,2	4,2

Tabela 10 - Oscilação Amplitude 7 mm - (150 A)

Amostra	Freq. de oscilação (Hz)	Largura (mm)	Reforço (mm)	L/R	R/L (%)	Diluição (%)
90	0,5	11,5	2,9	4,0	24,9	19,8
91	0,5	5,8	3,5	1,6	61,1	0,0
93	1	4,4	4,1	1,1	92,9	0,0
76	5	6,3	4,8	1,3	76,2	3,5
75	10	5,9	4,8	1,2	81,4	3,5
74	20	6,2	5,0	1,2	80,	0,0
73	30	6,2	5,0	1,2	80,8	4,9

Tabela 11 - Amplitude 4 mm - ( 200 A)

<b>Amostra</b>	<b>Freq. de oscilação (Hz)</b>	<b>Largura (mm)</b>	<b>Reforço (mm)</b>	<b>L/R</b>	<b>R/L (%)</b>	<b>Diluição (%)</b>
88	0,5	8,9	2,6	3,4	29,6	21,1
95	1	8,7	3,3	2,7	37,3	18,8
84	5	6,5	3,4	1,9	52,3	26,2
83	10	6,3	3,8	1,7	60,3	13,6
82	20	7,9	3,3	2,4	41,8	27,0
81	30	7,0	3,8	1,8	54,3	28,1

Tabela 12 - Amplitude 9 mm - ( 200 A)

<b>Amostra</b>	<b>Freq. de oscilação (Hz)</b>	<b>Largura (mm)</b>	<b>Reforço (mm)</b>	<b>L/R</b>	<b>R/L (%)</b>	<b>Diluição (%)</b>
89	0,5	9,3	3,1	2,9	33,6	19,9
94	1	8,2	3,0	2,7	37,1	12,4
77	5	5,6	3,9	1,4	69,6	3,9
78	10	5,7	4,0	1,4	70,4	14,8
79	20	6,5	4,1	1,6	62,8	20,4
80	30	6,9	3,9	1,7	57,2	25,9