

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE  
CURSO DE ENGENHARIA NAVAL

LETÍCIA MARTINS BODANESE

ANÁLISE DA SOLDAGEM MIG/MAG MECANIZADA COM TECIMENTO  
SINCRONIZADO PARA JUNTAS EM T COM ESPESSURAS DISSIMILARES

Joinville

2019

LETÍCIA MARTINS BODANESE

ANÁLISE DA SOLDAGEM MIG/MAG MECANIZADA COM TECIMENTO  
SINCRONIZADO PARA JUNTAS EM T COM ESPESSURAS DISSIMILARES

Trabalho apresentado como requisito para  
obtenção do título de bacharel no Curso de  
Graduação em Engenharia Naval do  
Centro Tecnológico de Joinville da  
Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Prof. Dr. Tiago Vieira da Cunha

Joinville

2019

LETÍCIA MARTINS BODANESE

ANÁLISE DA SOLDAGEM MIG/MAG MECANIZADA COM TECIMENTO  
SINCRONIZADO PARA JUNTAS EM T COM ESPESSURAS DISSIMILARES

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado aprovado como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Naval, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville (SC), 21 de novembro de 2019.

BANCA EXAMINADORA:

---

Dr. Tiago Vieira da Cunha  
Presidente/Orientador

---

Dra. Danielle Bond - UDESC  
Membra

---

Dr. Leonidas Cayo Mamani Gilapa – IFSC  
Membro

Joinville  
2019

## AGRADECIMENTOS

Durante os anos de graduação, muitas foram as pessoas que contribuíram para o meu desenvolvimento acadêmico e pessoal. Sou imensuravelmente grata aos meus pais, Joelcio e Viviane, por todo o amor, incentivo e confiança que depositaram em mim durante toda a minha vida.

Agradeço ao meu orientador Tiago Vieira da Cunha, pela excelência e qualidade técnica. Acima de tudo, gratifico por sempre acreditar no meu potencial, motivando-me durante todo o processo. Que nossa amizade perdure.

À todos os professores da UFSC Joinville, em particular àqueles que sempre estiveram de portas abertas para semear o conhecimento.

Aos amigos Natália Morales, Jorge Oliveira, Vitória Nunes, Rômulo Cristofoli, Géssica Pedott, Bianca Mouta, Luiza Tonett, e Giovanni Moreira pelos momentos compartilhados e por todo o apoio ao longo da graduação. Essencialmente agradeço à melhor, Liége Götz, por estar ao meu lado em todas as situações. Sou grata por todos os momentos compartilhados.

À toda a equipe LTS, pelo auxílio e companheirismo durante estes anos. Em especial agradeço à Anna Louise e ao Felipe Santos, por sempre estarem prontamente dispostos a me ajudar. Também agradeço ao técnico Rodrigo Voigt, por toda a assistência durante a elaboração deste trabalho.

Agradeço à todos os membros da equipe de competição de Hydra e por todo o aprendizado adquirido durante três anos.

Adicionalmente agradeço a todos aqueles que de forma direta ou indireta contribuíram nesta caminhada.

Por fim, à todas as oportunidades que me foram concedidas pela vida.

*“O que for teu desejo, assim será tua vontade.  
O que for tua vontade, assim serão teus atos.  
O que foram teus atos, assim será teu destino.”*

*(Deepak Chopra)*

## RESUMO

O processo de soldagem MIG/MAG é um processo caracterizado por sua versatilidade e adaptabilidade às aplicações industriais. Entretanto se mostra um processo sensível ao desalinhamento para soldagem linear de juntas em T. Neste contexto, o presente trabalho propõe a aplicação da técnica de tecimento sincronizando com as variáveis do processo, movimentando a tocha transversalmente. Para tanto, desenvolveu-se uma bancada experimental constituída por uma fonte de soldagem, sistema de deslocamento da tocha, tracionador de arame, sistema de aquisição de dados e gás de proteção. Esta foi concebida com o objetivo de permitir a realização de soldagens com tecimento sincronizado em juntas em T constituídas por chapas de espessuras dissimilares. Com posse da bancada, realizaram-se cordões de solda buscando validar a implementação da técnica proposta. A partir das macrografias obtidas realizaram-se análises dimensionais dos cordões de solda, tendo foco nas medidas de perna, penetração, largura da face, convexidade e eventuais mordeduras, com objetivo de buscar e obter uma geometria do cordão transversal mais adequada para ambas espessuras de chapas, mesmo sob condição de desalinhamento. Como resultado, a implementação da técnica se mostrou capaz de intervir na geometria do cordão de solda, cumprindo seu propósito.

**Palavras-chave:** Tecimento sincronizado, Soldagem GMAW, Junta em T, Solda de Filete, Espessuras dissimilares.

## ABSTRACT

The GMAW welding process is a process characterized by its versatility and adaptability to industrial applications. However, a misalignment-sensitive process for linear T-joint welding is shown. In this context, the present work proposes the application of the weaving technique synchronizing with the process variables, moving the torch transversely. To this end, an experimental workbench consisting of a welding source, torch displacement system, wire puller, data acquisition system and shielding gas was developed. This was designed to allow synchronized weave welding on T-joints consisting of dissimilar thickness sheets. With possession of the bench, weld beads were performed in order to validate the implementation of the proposed technique. From the obtained macrographs, dimensional analyzes of the weld beads were performed, focusing on the measurements of the leg, penetration, face width, convexity and eventual bites, aiming to search and obtain a more suitable cross-sectional geometry for both thicknesses of the weld. plates, even under misalignment condition. As a result, the implementation of the technique proved to be able to intervene in the weld bead geometry, fulfilling its purpose.

**Keywords:** Synchronized weaving, GMAW welding, T joint, Dissimilar Thickness.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema da soldagem MIG/MAG.....	16
Figura 2 – Equipamento básico para a soldagem MIG/MAG. ....	17
Figura 3 - Distância do bico de contato até a peça (DBCP), stickout e altura do arco. .....	18
Figura 4 – Oscilograma típico para transferência por curto-circuito .....	19
Figura 5 - Condições de corrente e tensão para as diferentes formas de transferência para a soldagem GMAW com um gás de proteção a base de argônio (esquemático). .....	20
Figura 6 – Movimentos de tecimento.....	21
Figura 7 – Seção transversal de amostras soldadas.....	22
Figura 8 - Superfície e secção transversal dos cordões de solda produzidos com energia de soldagem de 25 kJ/cm e amplitude de tecimento de (a) 0 mm – Linear; (b) 10 mm; (c) 15 mm; (d) 20 mm; e (e) 30 mm. ....	23
Figura 9 – Processos de soldagem com tecimento em simulação numérica. Onde o arco está (a) movendo para direita, (b) no centro, (c) movendo para esquerda.....	24
Figura 10 – Perfil de temperatura para diferentes valores de amplitude de tecimento no centro da poça de fusão. ....	25
Figura 11 - Perfil de temperatura para diferentes valores de frequência de tecimento no centro da poça de fusão. ....	26
Figura 12 - Lógica da sincronização MIG/MAG com oscilação polarizada utilizada por Gonçalves e Dutra.....	28
Figura 13 - Movimento de oscilação switch back. Onde $V_a$ é o movimento de avanço e $V_r$ o movimento de retrocesso.....	29
Figura 14 - esquerda: Switch-back com mudança de polaridade na trajetória, direita: Switch back com polaridade constante (CC+). ....	30
Figura 15 - Esquema de distribuição da polaridade no tecimento transversal utilizados por Kovalenko (2014). ....	31
Figura 16 - Os ângulos de mudança dos modos operacionais: $\beta_{1a}$ ; $\beta_{2a}$ – ângulos de .....	32
Figura 17 - Aspectos dos cordões obtidos com MIG/MAG Pulsado e MIG/MAG APSTT; (a) .....	33

Figura 18 - Esquema da sincronização do processo MIG/MAG utilizado por Skhabovski (2014).....	34
Figura 19 - Ilustração dos cordões com sobreposição na trajetória da reversão sincronizada de polaridade.....	35
Figura 20 - Aspecto do cordão do com curso da reversão sincronizada de Polaridade. Onde a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da esquerda para direita) .....	35
Figura 21 - Macroestruturas para cada tipo de arame-eletrodo para diferentes energias de soldagem .....	37
Figura 22 – Organograma do trabalho. ....	38
Figura 23 – Regiões de atuação dos programas de soldagem P1 e P2 no tecimento triangular .....	39
Figura 24 – Regiões de atuação dos programas definidas para o trabalho. ....	40
Figura 25 – Suporte basculante montado.....	41
Figura 26 – Estruturação da bancada de ensaios.....	41
Figura 27 – Desenho esquemático.de programas para o tecimento sincronizado. ...	42
Figura 28 – Perfis para solda de filete segundo AWS D1.1 (2010). ....	45
Figura 29 – Posicionamento das chapas para soldagem. ....	49
Figura 30 – Posicionamentos da tocha de soldagem empregada na realização dos ensaios.....	50
Figura 31 – Medidas analisas.....	51
Figura 32 – Macrografias dos cordões de soldagem obtidos com soldagem linear. .	53
Figura 33 - Macrografia dos cordões obtidos com soldagem linear com desalinhamento. Onde a) d1 corresponde a 1 mm e b) d2 corresponde a 1 mm.....	55
Figura 34 - Frequências analisadas para a implementação do tecimento.....	57
Figura 35 – Macrografia da seção transversal do cordão de solda realizado com amplitude de 10 mm. ....	58
Figura 36 – Macrografia da seção transversal do cordão de solda para amplitude de 5 mm. ....	58
Figura 37 - Macrografia dos cordões de solda com tecimento desalinhado 1mm da raiz da junta. Onde a) para cima e b) para baixo. ....	59
Figura 38 - Macrografia dos cordões de solda com tecimento desalinhado 2mm da raiz da junta. Onde a) para cima e b) para baixo. ....	60
Figura 39 – Macrografia do cordão de solda utilizando tecimento sincronizado. ....	61

Figura 40 – Macrografias dos cordões de solda realizados com tecimento sincronizado desalinhado do centro da junta. Onde a) 1mm para cima, b) 1 mm para baixo, c) 2mm para cima e d) 2 mm para baixo. ....62

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Forma de preparação para diversas espessuras para soldagem com processo MIG/MAG.....	17
Tabela 2 – Parâmetros de soldagem. ....	30
Tabela 3 – Parâmetros de soldagem utilizados por Tasalloti, Kah e Martikainen (2013). .....	37
Tabela 4 – Parâmetros recomendados pela Norma ISSO 5817. ....	43
Tabela 5 – Valores de perfil de solda com base na Figura 28.....	45
Tabela 6 – Tamanho mínimo de perna para cordões de solda de filete de acordo com a NBR8800 (2008). ....	46
Tabela 7 – Tamanho mínimo para garganta efetiva para solda de filete de acordo com a NBR8800 (2008). ....	46
Tabela 8 – Tamanho mínimo da perna para solda de filete CSA. ....	47
Tabela 9 – Critérios Adicional.....	47
Tabela 10 – Parâmetros, medições e avaliações dos cordões obtidos com soldagem linear. Onde as medidas estão apresentadas em milímetros.....	54
Tabela 11 - Parâmetros, medições e avaliações dos cordões obtidos com soldagem linear para desalinhamento de 1 mm. ....	56
Tabela 12 - Avaliação normativa referente à amostra 23. ....	61
Tabela 13 – Avaliação normativa das amostras 25, 26, 27 e 28. ....	63
Tabela 14 – Exposição plena dos ensaios de soldagem com tecimento e tecimento sincronizado. ....	68
Tabela 15 – Avaliação normativa dos ensaios de soldagem com tecimento e tecimento sincronizado. ....	69

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

MIG/MAG –Metal Inert Gas/Metal Active Gas

TIG – Tungsten Inert Gas

DBCP – Distância bico de contato peça

CC - - Corrente com polaridade negativa

CC + - Corrente com polaridade positiva

APSTT – Alternância da polaridade sincronizada com tecimento transversal

RSSP – Reversão sincronizada do sentido da tocha e da polaridade

CCC- - curto-circuito controlado com polaridade negativa

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

LTS – Laboratório de tecnologia da soldagem

AWS – American Welding Society

P1 – Programa de soldagem para a chapa 1

P2 – Programa de soldagem para a chapa 2

V – Tensão (V)

A – Corrente (A)

Va – Velocidade de alimentação do arame (m/min)

Vs – Velocidade de soldagem (cm/min)

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
1.2 OBJETIVOS .....	14
1.2.1 Objetivo Geral .....	14
1.2.2 Objetivos Específicos .....	15
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>16</b>
2.1. O PROCESSO MIG/MAG .....	16
2.2 TÉCNICA DE TECIMENTO.....	20
2.3 TECIMENTO SINCRONIZADO .....	26
<b>3 DESENVOLVIMENTO</b> .....	<b>38</b>
3.1 CONCEPÇÃO DA BANCADA PARA SOLDAGEM COM TECIMENTO SINCRONIZADO .....	39
3.2 DETERMINAÇÃO DOS CRITÉRIOS DE ACEITABILIDADE DOS CORDÕES DE SOLDA. ....	42
3.2.1 Norma ISO .....	42
3.2.2 Norma AWS.....	44
3.2.3 Norma NBR .....	45
3.2.4 Norma CSA .....	46
3.2.5 Critério Adicional.....	47
<b>4 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>48</b>
4.1 MATERIAS .....	48
4.2 POSICIONAMENTO DAS CHAPAS EM JUNTA EM T .....	48
4.3 PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM.....	50
4.4 ANÁLISE METALOGRÁFICA.....	51
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>52</b>
5.1 DETERMINAÇÃO DO CONJUNTO DE PARÂMETROS PARA SOLDAGEM CONVENCIONAL EM ÂNGULO COM AVANÇO LINEAR DA TOCHA DE SOLDAGEM .....	52
5.2 EFEITO DO DESALINHAMENTO NA SOLDAGEM LINEAR DE JUNTA EM T ..	55
5.3 APLICAÇÃO DO TECIMENTO PARA DETERMINAÇÃO DA AMPLITUDE E FREQUÊNCIA.....	56

5.4 EFEITO DO DESALINHAMENTO NA SOLDAGEM DE FILETE COM TECIMENTO NA JUNTA EM T. ....	59
5.5 APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE TECIMENTO SINCRONIZADO PARA JUNTAS EM T COM ESPESSURAS DISSIMILARES .....	60
5.6 EFEITO DO DESALINHAMENTO NA SOLDAGEM COM TECIMENTO SINCRONIZADO NA JUNTA EM T .....	62
<b>6 CONCLUSÕES .....</b>	<b>64</b>
<b>7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>65</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>66</b>
<b>APÊNDICE A – IMAGENS DOS ENSAIOS DE SOLDAGEM REALIZADOS .....</b>	<b>68</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O processo de soldagem MIG/MAG (Metal Inert Gas/Metal Active Gas) é um processo caracterizado por suas vantagens e versatilidades, apresentando-se um processo conveniente para a indústria em geral. A alta taxa de deposição denomina-se como sua principal vantagem quando comparado com outros processos a arco elétrico, como TIG (Tungsten Inert Gas) e Eletrodo Revestido. Além disso, outras vantagens podem ser obtidas com o processo MIG/MAG, como por exemplo, limpeza do processo devido não haver a necessidade de remoção de escória, alimentação contínua do arame eletrodo, aplicação em ampla faixa de espessuras para o metal de base e suas juntas, abrangência de ligas para o arame de alimentação, possibilidade de realizar a soldagem em distintas posições, adaptabilidade do processo, entre outras. (WELDING HANDBOOK, 2001)

Um evento corriqueiramente necessitado industrialmente é a realização da união de chapas com espessuras dissimilares. Como por exemplo, na indústria naval, onde há a necessidade de unir as chapas espessas do fundo da embarcação com os reforçadores estruturais de menor espessura. E até mesmo na indústria de construção civil na fabricação de vigas, onde a alma da viga é de menor espessura ao se comparar com a espessura dos flanges. Quando a solda é realizada manualmente por soldadores experientes, o ajuste da transferência de energia de soldagem é realizado diretamente pelo soldador, de forma que ao migrar da chapa menos espessa para a mais espessa, aumenta-se o tempo de fornecimento de calor (diminuindo a velocidade de avanço da soldagem), buscando garantir uma penetração adequada em ambas as chapas.

Discorrendo sobre a adaptabilidade do processo, ao mecanizá-lo é possível incrementar tecimento de forma controlada. Nesta técnica, há a oscilação da tocha transversal ou longitudinalmente sobre a junta, com a qual podemos obter cordões com maior molhabilidade, melhor distribuição de calor sobre a junta e influenciando no perfil de largura e penetração do cordão. O tecimento por si só já produz mudanças na penetração do cordão, porém ainda não é suficiente para controlar sozinho o perfil de penetração. (KOVALENKO, 2014)

De maneira a buscar um maior controle do perfil do cordão de solda para juntas em T com chapas de espessuras dissimilares com a soldagem mecanizada, depara-

se com a possibilidade de incrementar, ao tecimento, a variação de parâmetros inerentes à soldagem, como a corrente de soldagem, por exemplo. Desta forma, esperou-se distribuir a energia de soldagem de maneira mais adequada na junta, almejando um perfil transversal do cordão de solda mais regular e com fusão adequada em ambas as chapas.

Contudo, segundo *Welding Handbook* (1991), o posicionamento e orientação da tocha de soldagem em relação à peça base também possui grande influência sobre largura, penetração e regularidade do cordão de solda. Dito isto, também analisou-se a influência do desalinhamento da tocha em relação ao centro da junta.

Já se referindo sobre a abordagem normativa, ao tratarmos de uma junta de topo, encontramos de forma fácil e clara normas de soldagem relacionadas aos critérios de aceitabilidade geométrica dos cordões de solda. No entanto, quando tratamos da soldagem em juntas em T para espessuras dissimilares, não há apresentação direta deste tema por normas de soldagem ou pela literatura. Segundo Bonacorso (2017), os parâmetros para soldas de filete são mais difíceis de serem encontradas até mesmo de forma experimental. Dada esta dificuldade, há certa dificuldade para a averiguação e padronização de soldas de compromisso.

Devido aos poucos estudos recentes sobre o sincronismo do tecimento com parâmetros de soldagem tanto para mesmas espessuras quanto para espessuras dissimilares, e, tendo em vista a necessidade de expandir a aplicabilidade do processo MIG/MAG, o presente trabalho se faz oportuno.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo Geral

Com base no texto exposto acima, tem-se, portanto, como objetivo avaliar a aplicação da técnica de tecimento sincronizado com a mudança de parâmetros de soldagem em junta em T composta de chapas de espessuras dissimilares. Isto, buscando uma melhor distribuição da energia de soldagem, com a finalidade de obter um perfil com geometria adequada.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

Com o objetivo de atingir de forma íntegra o nível de conhecimento esperado por este trabalho, o objetivo geral desdobra-se nos seguintes objetivos específicos:

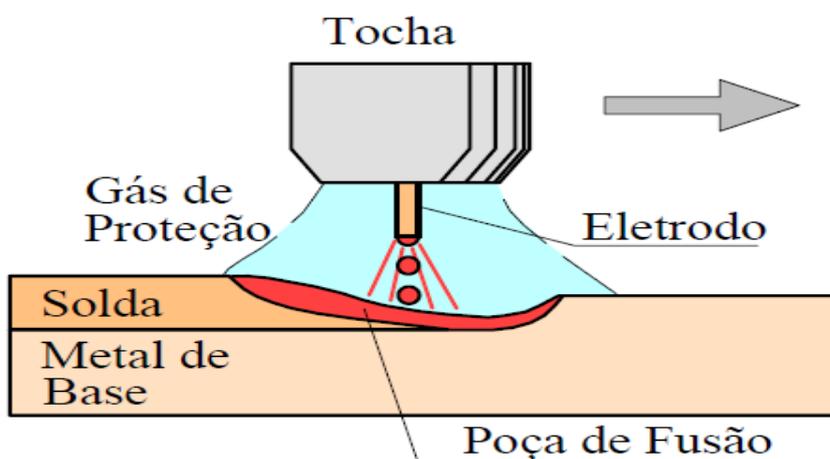
- Estruturar uma bancada de ensaios que permita a alteração de sua posição em relação à raiz da junta, de forma a atender a posição necessária para soldagem de chapas com tecimento sincronizado para junta em T;
- Realizar soldagem com o processo MIG/MAG utilizando a técnica de tecimento sincronizado com os parâmetros de soldagem;
- Avaliar o efeito da aplicação desta técnica em relação à geometria do cordão de solda.
- Obter um cordão de solda com geometria adequada e simétrica.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1. O PROCESSO MIG/MAG

O processo MIG/MAG é um processo de soldagem utilizado para união e revestimento de chapas metálicas. Sua fonte de calor provém de um arco elétrico mantido entre o arame eletrodo alimentado continuamente e o material de base. A proteção da região de solda é realizada pelo gás de proteção, este gás tem característica inerte para o processo MIG e ativo para MAG. A proteção gasosa possui a função de evitar a contaminação, pelos gases presentes na atmosfera, das gotas de metal fundido que se transferem para a poça de fusão e também do próprio cordão de solda (Figura 1). Além disso, o gás exerce a função de ser o meio ionizante, conferindo propriedades de estabilidade do arco e controlando a transferência metálica, consumo do eletrodo e fusão do metal de base. (SCOTTI E PONOMAREV, 2008).

Figura 1 – Esquema da soldagem MIG/MAG.



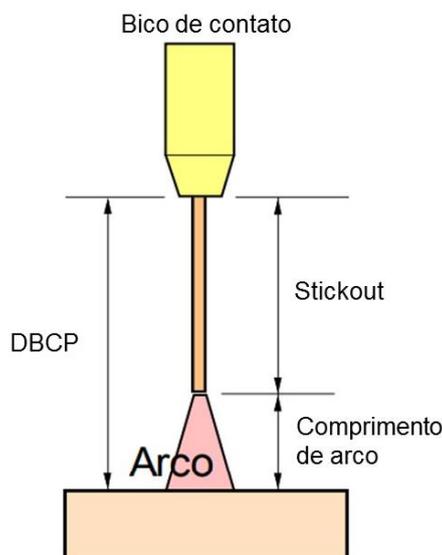
Fonte: Marques, Modenesi e Bracarense (2005).

Segundo Marques, Modenesi e Bracarense (2005), a soldagem MIG/MAG é normalmente semiautomática, pois a alimentação do arame eletrodo é realizada por intermédio de um alimentador motorizado. O equipamento básico para o processo é composto por uma fonte de energia, um alimentador de arame, uma tocha de soldagem e gás protetor, além de cabos e mangueiras, como exposto na Figura 2. Em



transferência e depende ainda da velocidade de alimentação do arame, DBCP, da corrente e da tensão de soldagem.

Figura 3 - Distância do bico de contato até a peça (DBCP), stickout e altura do arco.



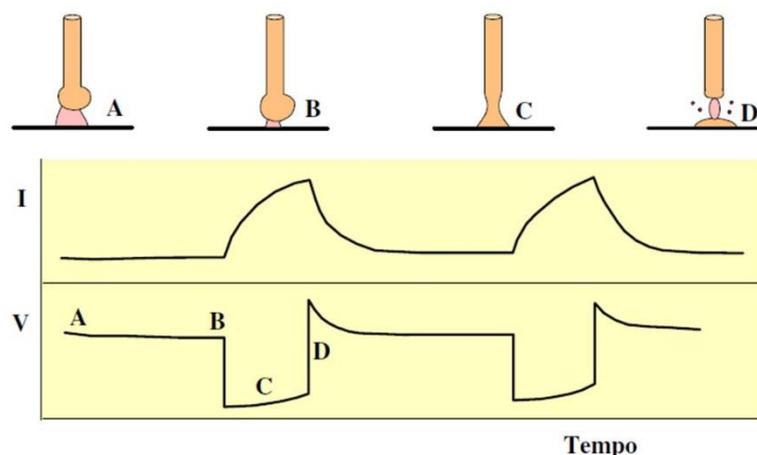
Fonte: Adaptado de Modenesi (2012).

Adicionalmente, o modo como o material de adição é transferido à peça de trabalho também possui influência sobre o perfil do cordão de solda. Há três modos naturais de transferência metálica, sendo estas, curto-circuito, globular e goticular. Segundo Silva et al. (2014) os modos são identificados e caracterizados pelo tamanho e frequência de transferência da gota. Ainda, estão associados a diversos fatores como corrente de soldagem, diâmetro do arame, comprimento de arco, tensão, características de fonte de energia e gás de proteção.

De acordo com Welding Handbook (1991), o modo curto-circuito engloba a menor faixa de corrente de soldagem associados à soldagem MIG/MAG. Geralmente é utilizado para soldagens fora da posição plana ou para chapas de pequenas espessuras, onde é necessária uma menor energia de soldagem. Neste modo de transferência, a gota formada na ponta do eletrodo cresce na direção da poça de fusão e é transferida no momento de contato entre ambos, através da tensão superficial. Este momento de transferência gera uma instabilidade do arco e pode causar respingos. Segundo Marques, Modenesi e Bracarense (2005) a quantidade de respingos pode ser limitada pela seleção adequada de parâmetros de soldagem e ajuste da indutância na fonte de energia, de forma que os curtos-circuitos ocorram de

forma mais suave. A sequência de eventos ocorridos neste modo de transferência é demonstrada na Figura 4. Entre os instantes A e B, há arco voltaico. O curto-circuito ocorre no instante C, e finalmente no instante D, tem-se o estabelecimento do arco novamente.

Figura 4 – Oscilograma típico para transferência por curto-circuito

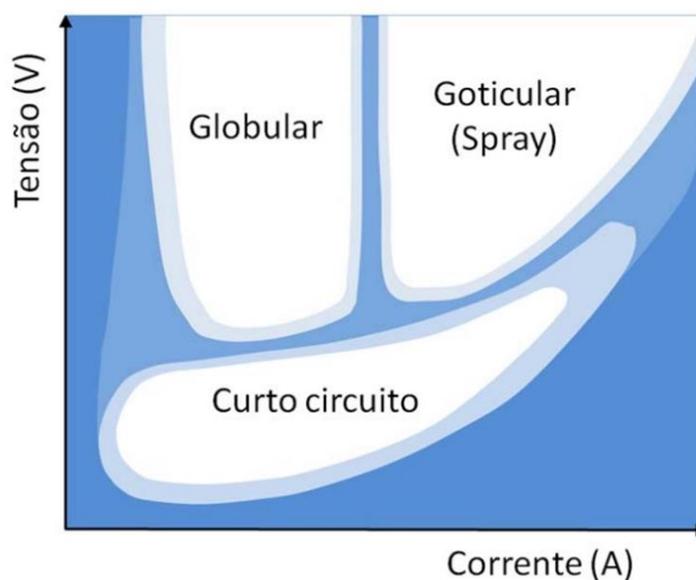


. Fonte: Modenesi (2012).

Já a transferência globular, é caracterizada pela presença de grandes gotas de metal líquido formadas na ponta do arame. Muitas vezes esta forma de transferência é indesejada, pois, ao se soltar da ponta do arame, a gota pode deixar a superfície do cordão de solda irregular e causar respingos. Além disso, limita o processo à soldagem plana e horizontal. (SILVA et al, 2011).

Quando se trata do modo de transferência goticular, o destacamento da gota se dá a partir de forças de origem eletromagnética, que se sobrepõem à força gravitacional, desta forma, em princípio, pode ser aplicado à qualquer posição de soldagem. Por outro lado, este modo de transferência exige elevados valores de corrente, não podendo ser aplicado às chapas finas. (MARQUES, MODENESI; BRACARENSE, 2005). De acordo com Modenesi (2012), a transferência goticular tende a ser muito estável, com perturbações mínimas no arco e poucos respingos. A Figura 5 representa, de forma esquemática, os campos de obtenção dos modos naturais de transferência metálica em função dos valores de tensão e corrente do processo.

Figura 5 - Condições de corrente e tensão para as diferentes formas de transferência para a soldagem GMAW com um gás de proteção a base de argônio (esquemático).

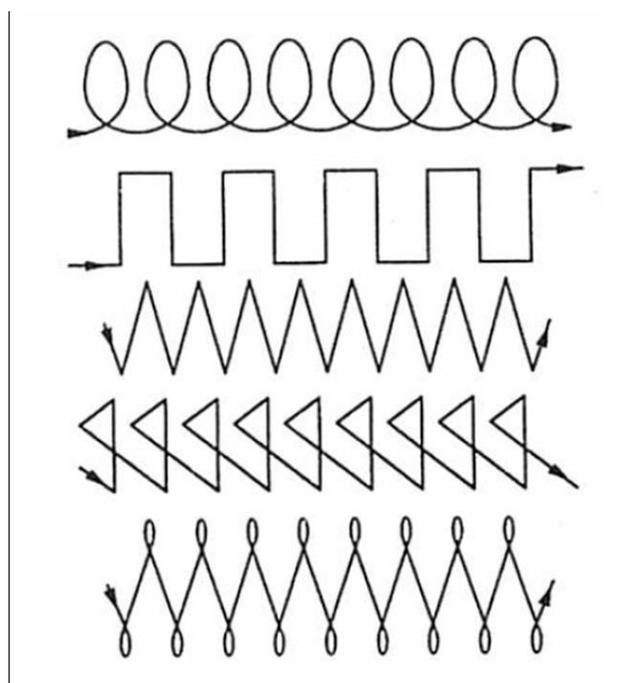


Fonte: Modenesi (2012).

## 2.2 TÉCNICA DE TECIMENTO

De acordo com Marques, Modenesi e Bracarense (2005), esta técnica se trata de um deslocamento lateral do eletrodo em relação ao eixo da solda. Podendo ser utilizado para obter cordões mais largos, garantindo assim a fusão das paredes do chanfro. Ao se tratar da utilização do tecimento no processo de soldagem com eletrodo revestido manual, Modenesi (2012) apresenta a Figura 6 com movimentos de tecimento comuns realizados por soldadores experientes. No entanto, também é possível realizar tecimento manual em outros processos de soldagem a arco, bem como TIG e MIG/MAG.

Figura 6 – Movimentos de tecimento.



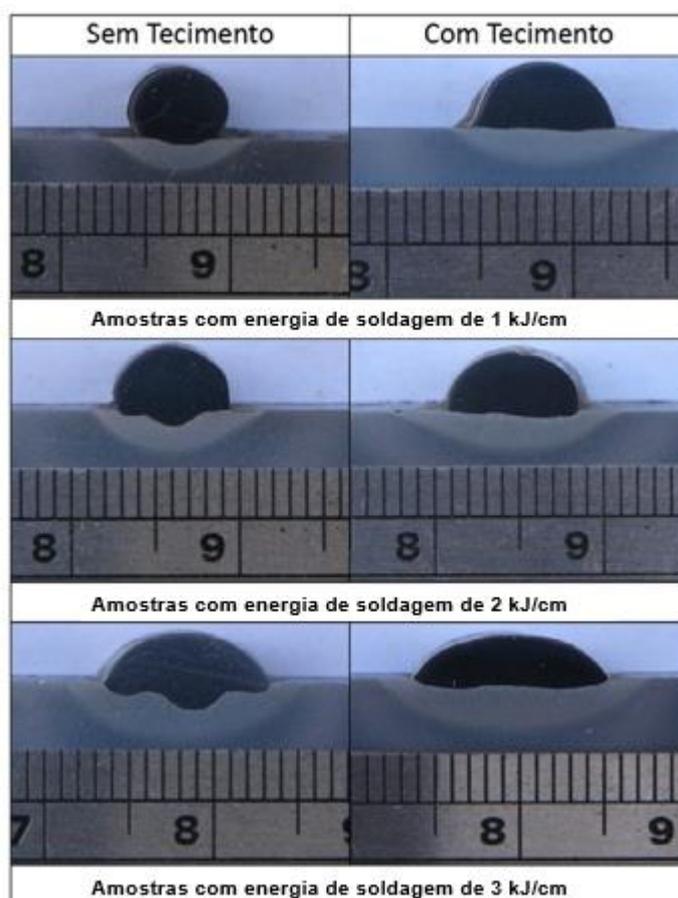
Fonte: Modenesi (2012).

Visto isso, ao tornar possível que o movimento relativo entre a tocha de soldagem e a peça de trabalho seja mecanizado, a técnica de tecimento pode ser aplicada a outros processos de soldagem, como por exemplo, o processo TIG, MIG/MAG e arco submerso.

Neste contexto, Miranda et. al (2015), avaliam a influência do tecimento no grau de diluição e geometria do cordão de solda no processo TIG com alimentação mecanizada de arame frio, visando a aplicação futura em revestimentos para ligas de níquel. Para que a avaliação pudesse ser estudada, soldagens de simples deposição foram realizadas sem e com tecimento para três diferentes energias de soldagem. O material de base adotado foi o aço carbono ASTM A516 Gr 60 e material de adição AWS ER NiCrMo-3 com velocidade de soldagem de 25 cm/min. No que tange aos parâmetros de tecimento, utilizaram frequência de 2,08 Hz e amplitude de 4 mm. Estes autores observaram que o uso do tecimento, altera significativamente os valores de diluição, reforço, largura e penetração em relação às condições sem tecimento. Um comparativo entre o cordão com e sem a utilização de tecimento, para as energias de soldagem de 1, 2 e 3 kJ/cm é exposto na Figura 7. Uma justificativa apresentada por Miranda et al. (2015) para a diferença entre os perfis é a melhor distribuição de calor ao longo da área do cordão, e também, afirma que o uso do tecimento reduziu de

forma considerável a relação entre reforço e largura. Esta relação é um parâmetro importante pois indica o grau de convexidade do cordão de solda. Ademais, Miranda et al. (2015) afirma que a redução da convexidade do cordão de solda contribui decisivamente para minimizar o risco de formação de defeitos entre passes devido a sobreposição lateral de múltiplos passes para a formação de camadas de revestimento.

Figura 7 – Seção transversal de amostras soldadas.

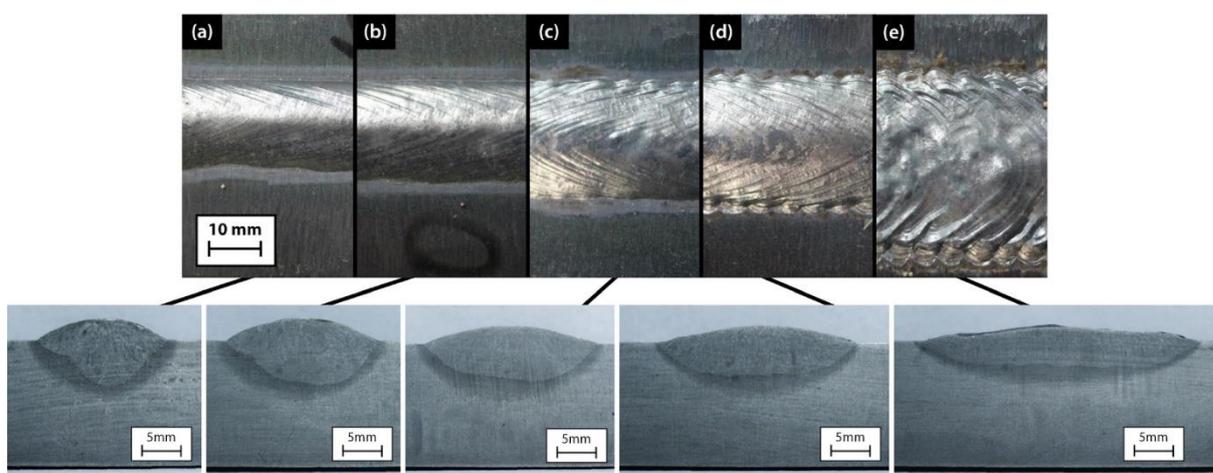


Fonte: Adaptado de Miranda et al. (2015).

Ao implementar o tecimento na soldagem de arco submerso, Cunha e Ribeiro (2018) acreditam, que, com parâmetros bem regulados é possível se obter vantagem neste processo com oscilação da tocha de soldagem. No entanto, os autores ressaltam que devem ser considerados fatores relacionados à inclusão de escória, dado que o processo de arco submerso é caracterizado pela camada de fluxo que cobre o arco voltaico e a poça de fusão. Cunha e Ribeiro (2018) avaliaram os efeitos oriundos do tecimento através de uma matriz de experimentos com frequência de

tecimento fixada em 1 Hz, velocidades de soldagem de 30 e 40 cm/com, com padrão triangular e energias de soldagem de 10, 15, 19 e 25 kJ/cm. Ao avaliar visualmente os resultados, Cunha e Ribeiro (2018) encontraram um limite superior de amplitude de tecimento em 30 mm. A Figura 8, mostra a superfície e seção transversal dos cordões de solda para a energia de soldagem de 25 kJ/cm.

Figura 8 - Superfície e seção transversal dos cordões de solda produzidos com energia de soldagem de 25 kJ/cm e amplitude de tecimento de (a) 0 mm – Linear; (b) 10 mm; (c) 15 mm; (d) 20 mm; e (e) 30 mm.



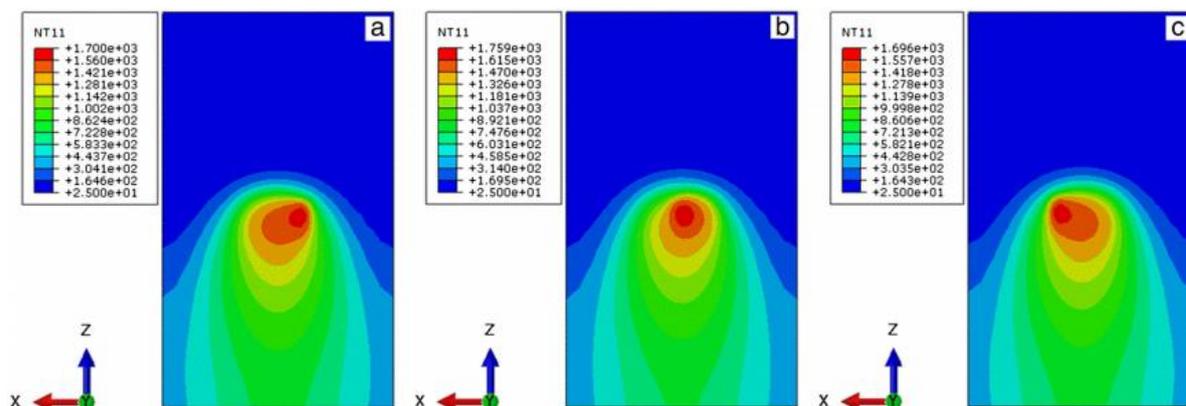
Fonte: Cunha e Ribeiro (2018).

De forma geral, para os corpos de prova válidos analisados, Cunha e Ribeiro (2018) concluem que o reforço diminuiu à medida que a amplitude de tecimento aumentou, para uma mesma energia de soldagem. O aumento da amplitude de tecimento resultou em maiores larguras dos cordões, em concordância com Miranda et al. (2015). Além disso, ao comparar a área fundida sem tecimento e com tecimento, Cunha e Ribeiro (2018) relatam um ganho de até 78% de área. Em conclusão, os autores julgaram perfeitamente viável a aplicação da técnica de tecimento no processo de soldagem a arco submerso. Ademais, para as energias de soldagem analisadas, a aplicação da técnica resultou em maior rendimento de fusão e não apresentou instabilidades e inclusões de escória.

Em um contexto pertinente, Chen et al. (2014) investigam o efeito da frequência e amplitude de tecimento no campo de temperatura de soldagens com tecimento. Para tanto, análises experimentais e numéricas foram realizadas.

Ao comparar os resultados obtidos de forma experimental e numérica, pode-se validar o modelo matemático utilizado em elementos finitos para simular o calor imposto no processo de soldagem MIG/MAG. A Figura 9 demonstra a distribuição de temperatura durante a soldagem com tecimento.

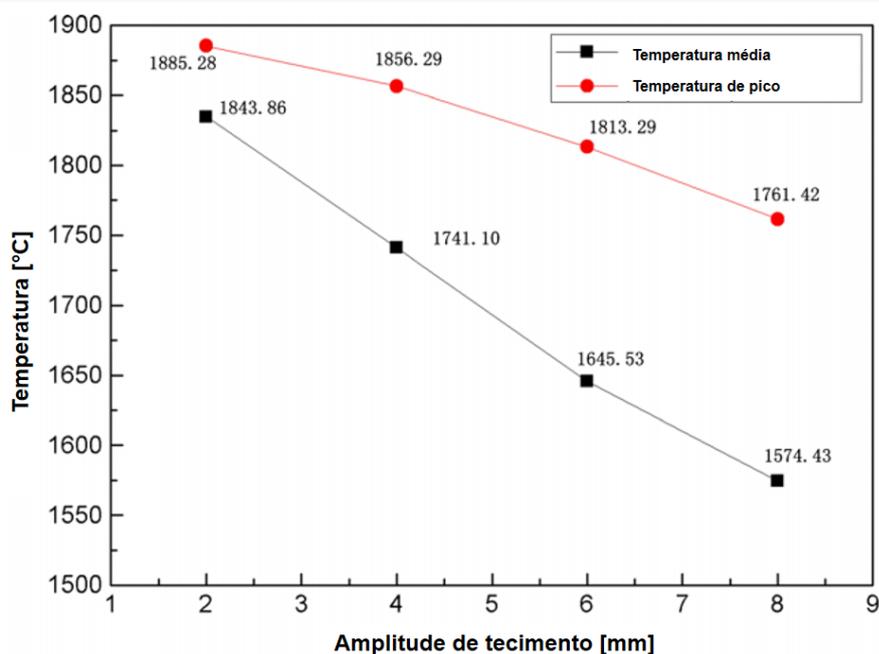
Figura 9 – Processos de soldagem com tecimento em simulação numérica. Onde o arco está (a) movendo para direita, (b) no centro, (c) movendo para esquerda.



Fonte: Chen et al. (2014).

Para que a análise do efeito da amplitude pudesse ser realizada, os autores utilizaram amplitudes de 2, 4, 6 e 8 mm. Os parâmetros inerentes à soldagem como tensão e velocidade de soldagem foram fixados em 22 V e 6 cm/min. A Figura 10 apresenta o perfil de temperatura traçado para os diferentes valores de amplitude de tecimento.

Figura 10 – Perfil de temperatura para diferentes valores de amplitude de tecimento no centro da poça de fusão.

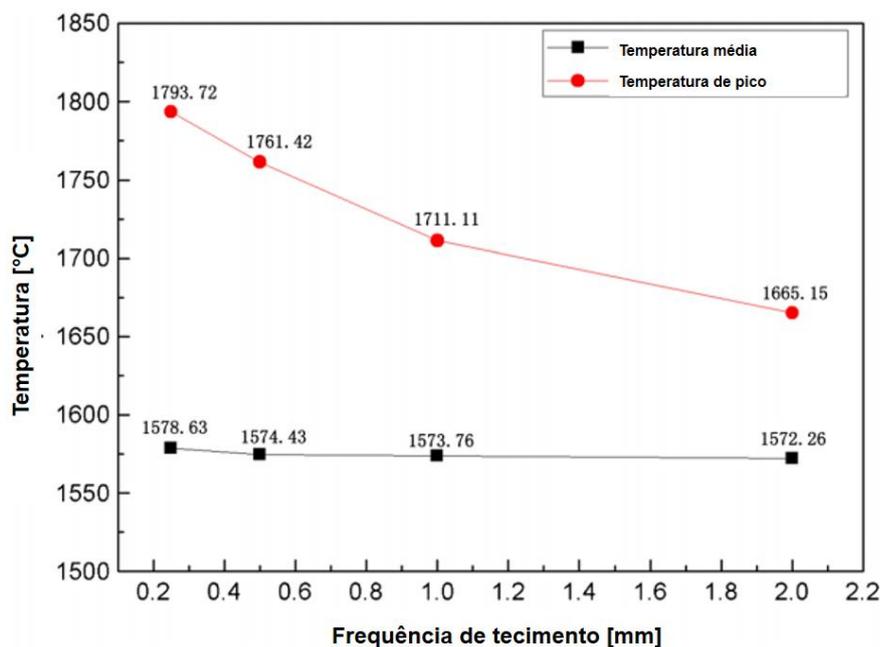


Fonte: Adaptado de Chen et al. (2014).

Chen et al. (2014) concluem com base nesta análise que o aumento da amplitude de tecimento influencia reduzindo densidade de energia, interferindo tanto na temperatura média no centro da poça de fusão quanto na temperatura de pico.

Para que a influência da frequência de tecimento no perfil de temperatura pudesse ser analisada, Chen et al. (2014) utilizaram parâmetros de frequência de 0,25; 0,5; 1 e 2 Hz. Foram utilizados os mesmos parâmetros de soldagem dos ensaios para análise da influência da amplitude, no entanto, com amplitude fixa de 8 mm. A Figura 11 apresenta o perfil de temperatura traçado para os diferentes valores de frequência de tecimento.

Figura 11 - Perfil de temperatura para diferentes valores de frequência de tecimento no centro da poça de fusão.



Fonte Adaptado de Chen et al. (2014).

Para esta análise, os autores concluem que para menores amplitudes de tecimento a temperatura de pico no centro da poça é maior, já a temperatura média, se mantém próxima para as frequências analisadas.

Em conclusão, Chen et al. (2014) perfazem que, para os mesmos parâmetros de tensão e corrente, o fator mais influente no perfil de temperatura média em uma soldagem com tecimento, é a amplitude. Já se tratando da temperatura de pico, ambos os parâmetros possuem influência.

### 2.3 TECIMENTO SINCRONIZADO

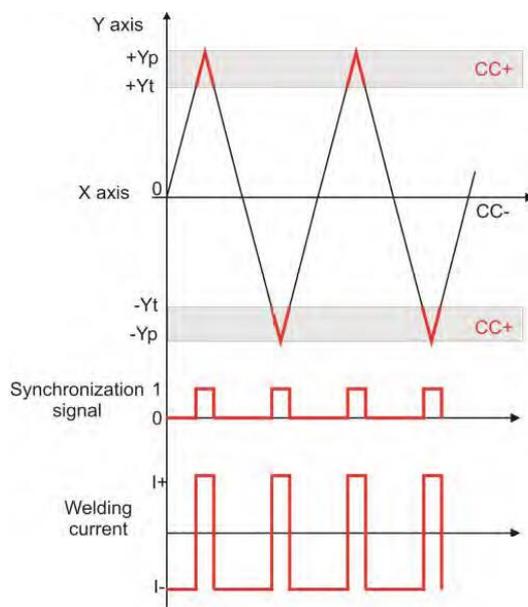
Buscando um maior controle do perfil do cordão de solda, depara-se com a possibilidade de incrementar ao tecimento, variações dos parâmetros de soldagem. Na literatura, encontra-se poucos estudos que apresentam o sincronismo de tecimento com variação de parâmetros de soldagem. Os autores Gonçalves e Dutra (2013), Kovalenko (2014) e Skhabovski (2014), trazem em seus respectivos trabalhos a sincronização entre o tecimento e a polaridade do arame, obtendo assim, resultados de otimização do processo em seus respectivos escopos.

O trabalho de Gonçalves e Dutra (2013) teve por objetivo desenvolver um sistema automatizado de soldagem capaz de determinar a posição da tocha na oscilação do movimento para que fosse possível o ajuste dos parâmetros de acordo com a localização da tocha em relação à junta. Adicionalmente, os autores buscaram garantir produtividade, boas propriedades de molhabilidade e uma adequada geometria do cordão de solda ou do revestimento. Para tal, os autores desenvolveram um software de modo que, de acordo com a posição da tocha em relação ao material de base, os parâmetros de soldagem fossem alterados.

Em um primeiro momento Gonçalves e Dutra (2013) implementaram a técnica para revestimentos metálicos onde o desafio foi manter a produtividade ao mesmo tempo que boas propriedades de molhabilidade e uma boa geometria no que tange aos aspectos adequados para revestimento. Neste modo o movimento de oscilação da tocha foi transversal em relação à direção de soldagem, de forma que, quando a tocha passa pelo centro da junta a corrente CC- é fornecida ao eletrodo e quando está nos extremos, CC+, como mostrado na Figura 12. A sincronização dos comandos fornecidos pela fonte com o manipulador da tocha foi realizada através de um sinal de sincronização digital gerado pelo próprio manipulador e reconhecido pela fonte de soldagem.

Os resultados para revestimento foram julgados, pelos autores, satisfatórios para aplicação de revestimento, molhabilidade adequada, superfície de qualidade sem respingos excessivos e defeitos livres.

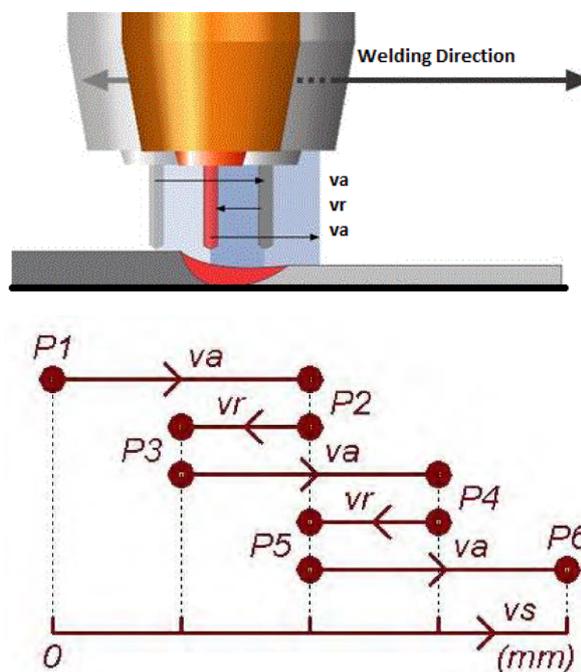
Figura 12 - Lógica da sincronização MIG/MAG com oscilação polarizada utilizada por Gonçalves e Dutra.



Fonte: Gonçalves e Dutra (2013).

No segundo momento, Gonçalves e Dutra (2013), analisaram a implementação de seu método, oscilando a polaridade do arame eletrodo com o seu movimento longitudinal. Esta técnica é conhecida pela literatura como switch back, onde a velocidade final de soldagem é composição da velocidade de avanço e da velocidade de retrocesso do manipulador, de maneira que o movimento para a frente é sempre mais longo do que o para trás. O efeito procurado foi uma melhor distribuição do calor ao longo da junta. A tocha foi movimentada para frente com polaridade no arame de CC- e retrocedendo com CC+. O esquemático do movimento está sendo representado na Figura 13. Segundo os autores, este movimento deve assegurar uma molhabilidade adequada e uma melhor distribuição global de calor do arco sobre a poça de fusão.

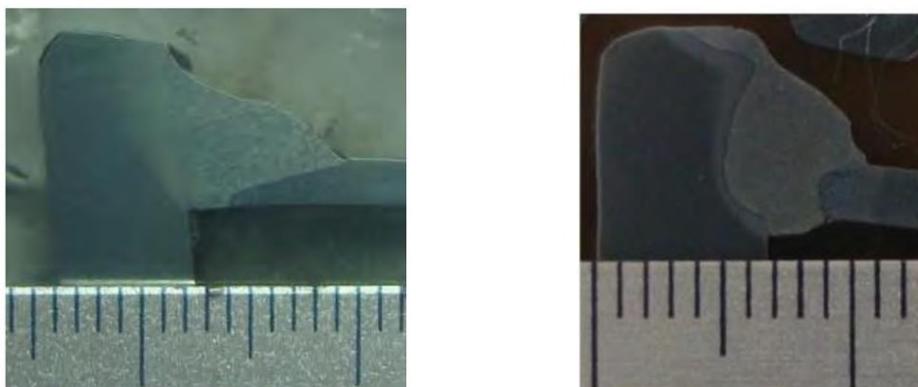
Figura 13 - Movimento de oscilação switch back. Onde  $V_a$  é o movimento de avanço e  $V_r$  o movimento de retrocesso.



Fonte: Gonçalves e Dutra (2013).

Os testes realizados para este modo foram realizados em junta em T, com chapas de espessuras dissimilares (2,25 mm e 6,35 mm) e gap variável de 0 a 2 mm. A fim de obter um referencial, cordões de solda foram realizados com polaridade constante de CC+ e switch back. Após análise, os cordões com a técnica implementada pelos autores, se apresentou menos proeminente. Os parâmetros utilizados para a produção do perfil transversal da solda exposta Figura 14 estão apresentados na Tabela 2.

Figura 14 - esquerda: Switch-back com mudança de polaridade na trajetória, direita: Switch back com polaridade constante (CC+).



Fonte: Gonçalves e Dutra (2013).

Tabela 2 – Parâmetros de soldagem.

Velocidade de avanço, $V_a$ CC-	3,2 m/mm
Corrente de soldagem CC-	-220 A
Comprimento de avanço	5mm
Velocidade de retrocesso, $V_r$ CC+	2,0m/min
Corrente de soldagem CC+	280 A
Comprimento de retrocesso	3mm
Velocidade de alimentação do arame	Constante 11,0 m/min

Fonte: Gonçalves e Dutra (2013).

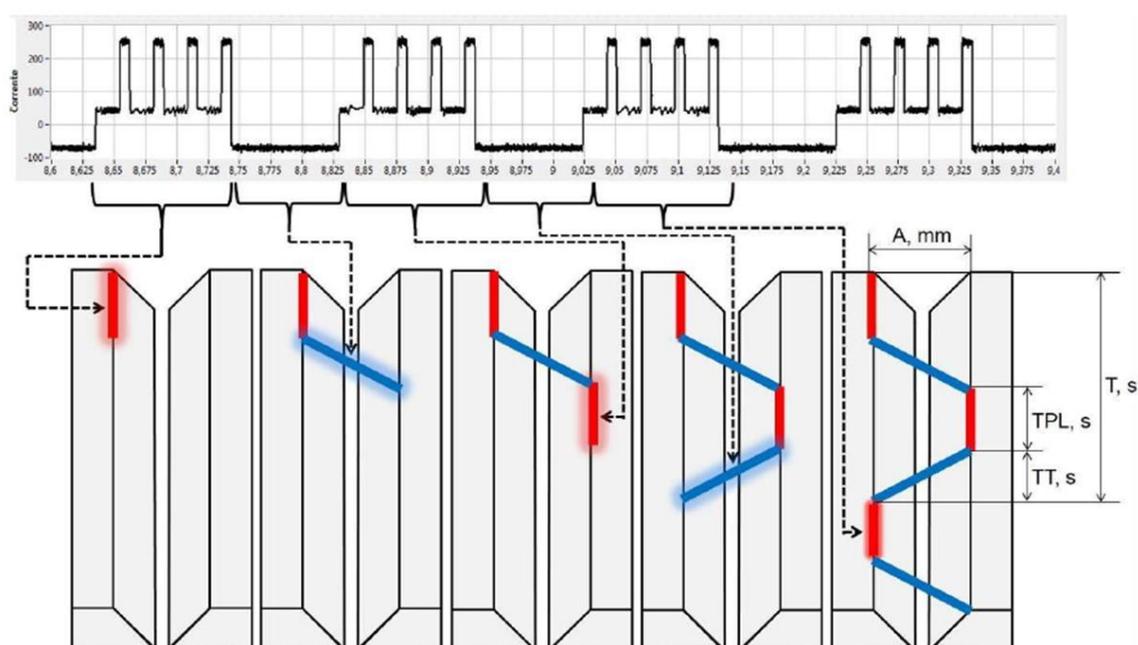
Em conclusão, Gonçalves e Dutra (2013) julgaram satisfatórios os resultados obtidos com a técnica aplicada. Onde se possibilitou um controle mais amplo da entrada de calor na união soldada. Os autores atingiram também, maior produtividade levando em consideração os quesitos de maior taxa de fusão, maior velocidade de soldagem e menor retrabalho.

Kovalenko (2014) teve como objetivo principal de seu trabalho, o desenvolvimento e avaliação de uma nova técnica de soldagem denominada APSTT (Alternância da Polaridade Sincronizada com Tecimento Transversal) no processo MIG/MAG, visando controlar a poça de fusão para possibilitar a soldagem de passes de raiz com penetração total e sem perfurações na soldagem automatizada de tubulações. Segundo Kovalenko (2014), poucos trabalhos aproveitam a combinação de diferentes modos de soldagem, logo, Kovalenko (2014) propõe combinar os modos operacionais pulsado e CC- no processo MIG/MAG. E também, demonstrar a

viabilidade da aplicação de diferentes modos operacionais sincronizados com o tecimento da tocha.

De modo a ilustrar o procedimento, a Figura 15 demonstra os trechos com diferentes parâmetros. No centro da junta é utilizado CC- e, nas laterais, CC+. Desta maneira, é possível obter maior calor nas laterais do cordão, e no centro, é oferecido um menor aporte térmico. (KOVALENKO, 2014).

Figura 15 - Esquema de distribuição da polaridade no tecimento transversal utilizados por Kovalenko (2014).

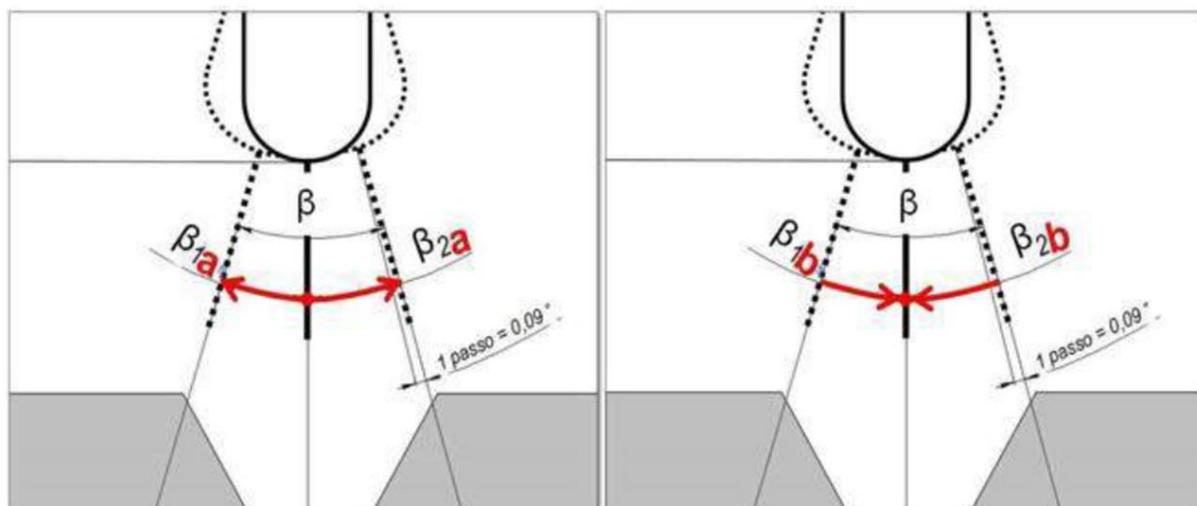


Fonte: Kovalenko (2014).

Para a realização do tecimento, Kovalenko (2014), utilizou o aparelho de tecimento transversal chamado de COMPORTE, desenvolvido pelo Laboratório Laprosolda da Universidade Federal de Uberlândia. O princípio de funcionamento da interface é baseado no recebimento de um sinal da posição da tocha durante o tecimento da mesma (sinal enviado para o driver) e no consequente envio de um sinal para a fonte alterar o programa. Possibilitando que o sincronismo entre o tecimento e os modos operacionais fosse realizado. Este aparelho atua na angulação da tocha de soldagem em relação à junta, como mostra a Figura 16, logo, para a atuação, é

necessário informar o ângulo de abertura do movimento pendular ( $\beta$ ), e também, ângulos de subida e descida da tocha ( $\beta_{1a}$ ;  $\beta_{2a}$ ;  $\beta_{1b}$  e  $\beta_{2b}$ ), respectivamente.

Figura 16 - Os ângulos de mudança dos modos operacionais:  $\beta_{1a}$ ;  $\beta_{2a}$  – ângulos de subida;  $\beta_{1b}$ ;  $\beta_{2b}$  – ângulos de descida.



Fonte: Kovalenko (2014).

Com o objetivo de atingir a combinação dos modos operacionais de forma alternada e de se obter um maior controle da poça, além da alteração dos parâmetros no centro e nas laterais da junta, Kovalenko (2014) determinou tempo de parada lateral para a tocha, possibilitando o resfriamento do cordão, e concluiu que a utilização da alternância da polaridade possibilitou a distribuição da energia de forma controlada ao longo da junta, e ainda, permitiu a atuação sobre o perfil da penetração do cordão, formando cordões adequados para soldagem de passe de raiz. Quanto aos critérios de aceitabilidade adotados, Kovalenko (2014) seguiu API Standard 1104 “Welding of Pipelines and Related Facilities “:

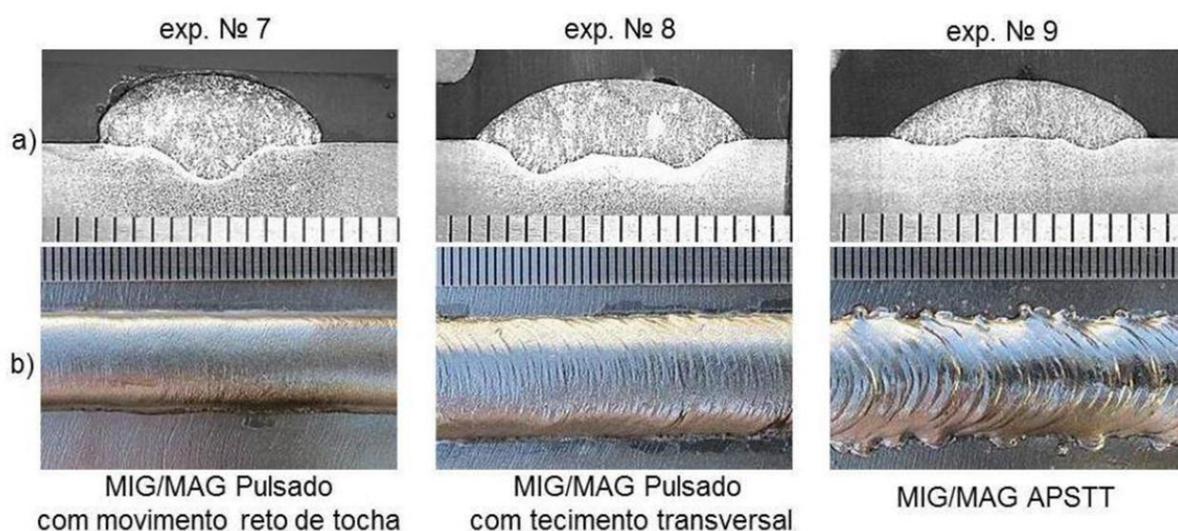
1. Cordões sem perfurações;
2. Penetração total nas laterais do chanfro;
3. Bom acabamento na face de cima do cordão, sem ondulações e concavidades inadequadas;
4. Bom acabamento na face de raiz do cordão, sem concavidades internas e penetrações inadequadas;
5. Estabilidade e regularidade do reforço da raiz ao longo de todo comprimento do cordão;

6. Inclusões de escória e porosidades. Sendo que o indicador de escória não pode ser maior que 0,8mm e a quantidade total de inclusões não pode ser maior do que 8% do comprimento do cordão. Os poros não podem possuir tamanho individual superior a 3mm e se o comprimento de todas as indicações de porosidades ultrapassar 8% do comprimento do cordão.

7. Reforço de raiz de até 1,6 mm.

Na avaliação da técnica APSTT sobre a distribuição de calor na poça de fusão, Kovalenko (2014) obteve os resultados apresentados Figura 17.

Figura 17 - Aspectos dos cordões obtidos com MIG/MAG Pulsado e MIG/MAG APSTT; (a) – seções transversais; (b) – superfície dos cordões



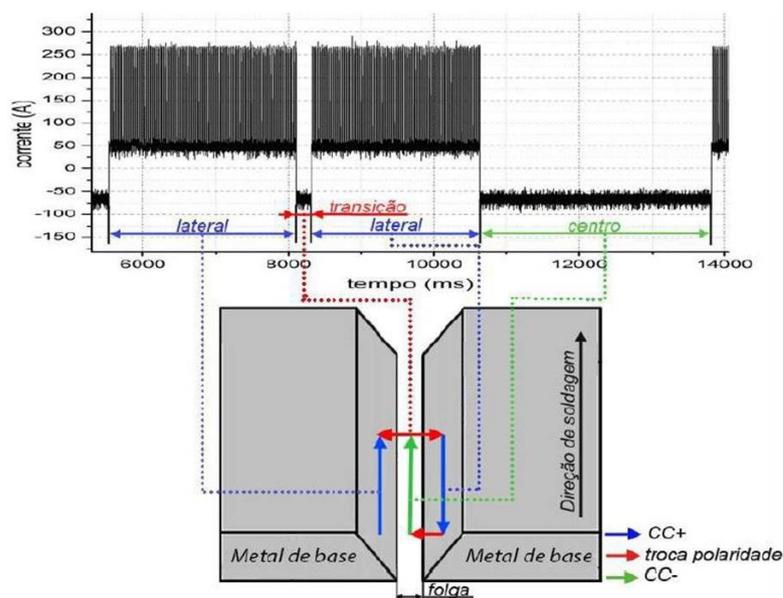
Fonte: Kovalenko (2014).

Segundo a avaliação de Kovalenko (2014), o processo MIG/MAG pulsado com movimento reto da tocha no geral apresentou as piores características para soldagem passe de raiz, ou seja, menor largura e maior penetração. Mas os outros resultados confirmam que o tecimento transversal com paradas laterais por si só já é satisfatório para diminuir a penetração de cordão, mas ainda não é suficiente para controlar sozinho o perfil de penetração. Adicionalmente, Kovalenko (2014) alerta para a possibilidade da perfuração da chapa para frequências de tecimento elevadas, e também, a possibilidade de haver falta de material depositados nos casos onde a frequência é baixa.

Em conclusão, Kovalenko (2014) obteve resultados positivos, demonstrando que a técnica de soldagem com Alternância da Polaridade Sincronizada com o Tecimento Transversal é capaz de controlar a poça de fusão.

De maneira similar à Kovalenko (2014), Skhabovski (2014) avaliou a reversão sincronizada do sentido da tocha e da polaridade, visando, também, a automação da soldagem em passes de raiz em tubulações. A proposta metodológica de Skhabovski (2014) é controlar a poça de fusão pela distribuição de calor o longo da junta durante a soldagem, fazendo com que mais calor seja aportado nas laterais da junta e menos calor e/ou menos pressão do arco/gotas em transferência esteja atuando quando a tocha estiver mudando de posição entre as laterais da poça (assim como Kovalenko (2014)). Para tal, o autor propôs a sincronização da corrente de soldagem com a posição da tocha na técnica switch back, com o objetivo de resfriar o centro da junta e adicionar calor nas laterais de mesma. Nesta técnica, o eletrodo com polaridade CC+ pulsado atua nas laterais da junta. Já o eletrodo com polaridade CC- no modo corrente contínua ou curto-circuito controlado, atua no centro, como apresentado na Figura 18.

Figura 18 - Esquema da sincronização do processo MIG/MAG utilizado por Skhabovski (2014).

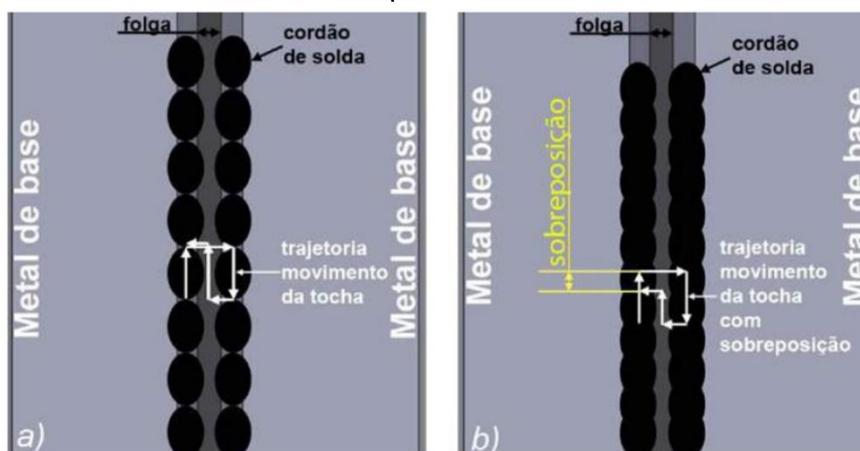


Fonte: Skhabovski (2014).

Para avaliar a aplicação da técnica de soldagem MIG/MAG com Reversão Sincronizada do Sentido da Tocha e da Polaridade (denominado MIG/MAG RSSP),

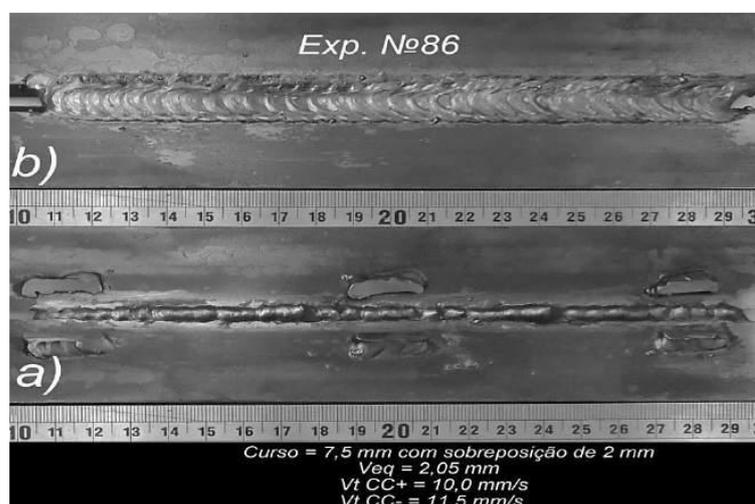
Skhabovski (2014) propôs a soldagem com curto-circuito controlado na polaridade negativa (CCC-) no centro da junta e CC+ pulsado nas laterais. Após encontrar parâmetros estáveis para o processo CCC-, Skhabovski (2014) percebeu que o arame precisaria de apoio, no caso, uma poça de fusão para absorver o metal de adição transferido. Para isso, o autor incluiu um novo movimento na trajetória comum da reversão, denominado sobreposição, exposto na Figura 19. A aplicação da técnica RSSP juntamente com a sobreposição, se mostrou capaz de uniformizar a distância entre cordões e garantir o apoio esperado no centro pelo processo CCC-, conforme mostra a Figura 20.

Figura 19 - Ilustração dos cordões com sobreposição na trajetória da reversão sincronizada de polaridade.



Fonte: Skhabovski (2014).

Figura 20 - Aspecto do cordão do com curso da reversão sincronizada de Polaridade. Onde a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da esquerda para direita)



Fonte: Skhabovski (2014).

Skhabovski (2014) conclui que a combinação dos dois modos de soldagem. Pulsado em CC+ e CCC-, mostrou boa estabilidade e repetitividade do processo. Além disso, os cordões não apresentaram falta de fusão nas laterais das juntas. No entanto, apresentou baixa robustez em termos de parametrização do processo, dado que uma pequena mudança na velocidade da tocha pode alterar completamente o acabamento e qualidade do cordão. Por fim, analisando a integridade da técnica MIG/MAG RSSP para desnivelamentos e desalinhamentos, esta se mostrou muito robusta para desnivelamento. Porém, com baixa robustez para desalinhamentos, entretanto, o autor ressalta que essa baixa robustez não deve ser considerada tão relevante, visto que durante o processo de fabricação de tubulações/duros esta imperfeição normalmente não acontece.

Em se tratando da implementação de tecimento em juntas em T, encontra-se o trabalho de Tasalloti, Kah e Martikainen (2013), onde é avaliado o efeito de diferentes materiais de adição no processo MIG/MAG utilizando tecimento para chapas em junta em T com materiais dissimilares.

Para o procedimento experimental, os materiais de base aço inoxidável AISI 304L e aço estrutural de baixa liga S355MC, de mesma espessura (5mm) foram dispostos em junta T. Três arames-eletrodos de diferentes composições foram utilizados, a saber: Esab ok Autrod 16.54 (EAO16.54), Esab OK Autrod 16.55 (EOA16.55) e Elga Cromarod 316LSi (EC316LSi). Os parâmetros de soldagem estão apresentados pela Tabela 3, com o gás de proteção Ar + 2%CO<sub>2</sub>, vazão constante de 16L/min. Já os parâmetros de tecimento, foram fixados em 3 Hz de frequência e 1,5 mm de amplitude a partir do entro da junta.

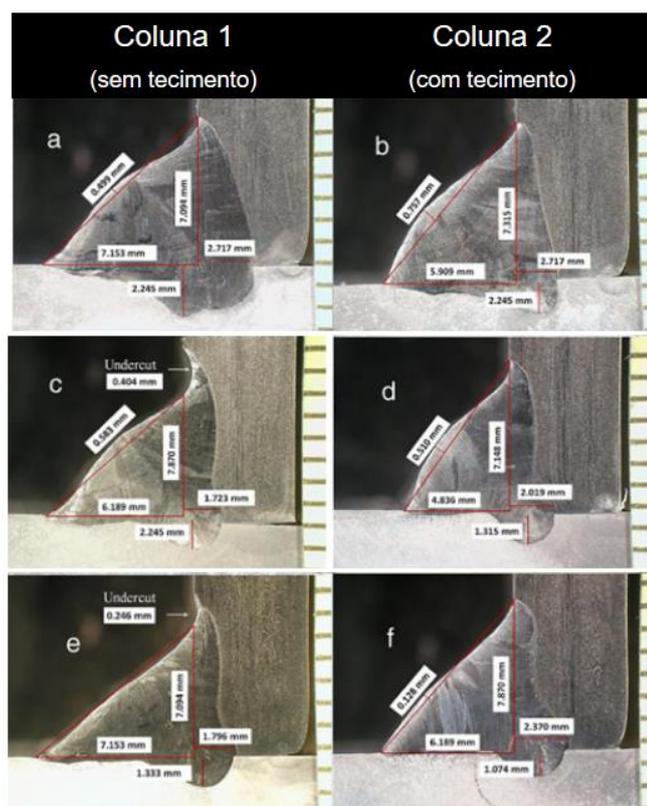
Com base na Figura 21, Tasalloti, Kah e Martikainen (2013) percebem uma penetração superior do lado austenítico. Efeito atribuído ao menor ponto de fusão do aço inoxidável em relação ao aço estrutural. Também, relatam que penetração diminui com a utilização do tecimento para o aço S355MC, enquanto aumenta para o aço austenítico AISI 304L. A maior penetração ocorrida no lado austenítico é atribuída ao baixo grau de condutividade térmica do aço AISI 304L quando comparado à condutividade térmica do aço S355MC

Tabela 3 – Parâmetros de soldagem utilizados por Tasalloti, Kah e Martikainen (2013).

Arame	D (mm)	Va (m/min)	Stick-out (mm)	I (A)	U (V)	Vs (mm/s)	Es (kJ/mm)
EOA16.54	1.2	11.2	20	260	8.4	8.4	0.61
EOA16.55	1	11.4	17	227	7.5	7.5	0.58
EC316LSi	1	11.4	17	227	7.5	7.5	0.58

Fonte: Adaptado de Tasalloti, Kah e Martikainen (2013).

Figura 21 - Macroestruturas para cada tipo de arame-eletrodo para diferentes energias de soldagem



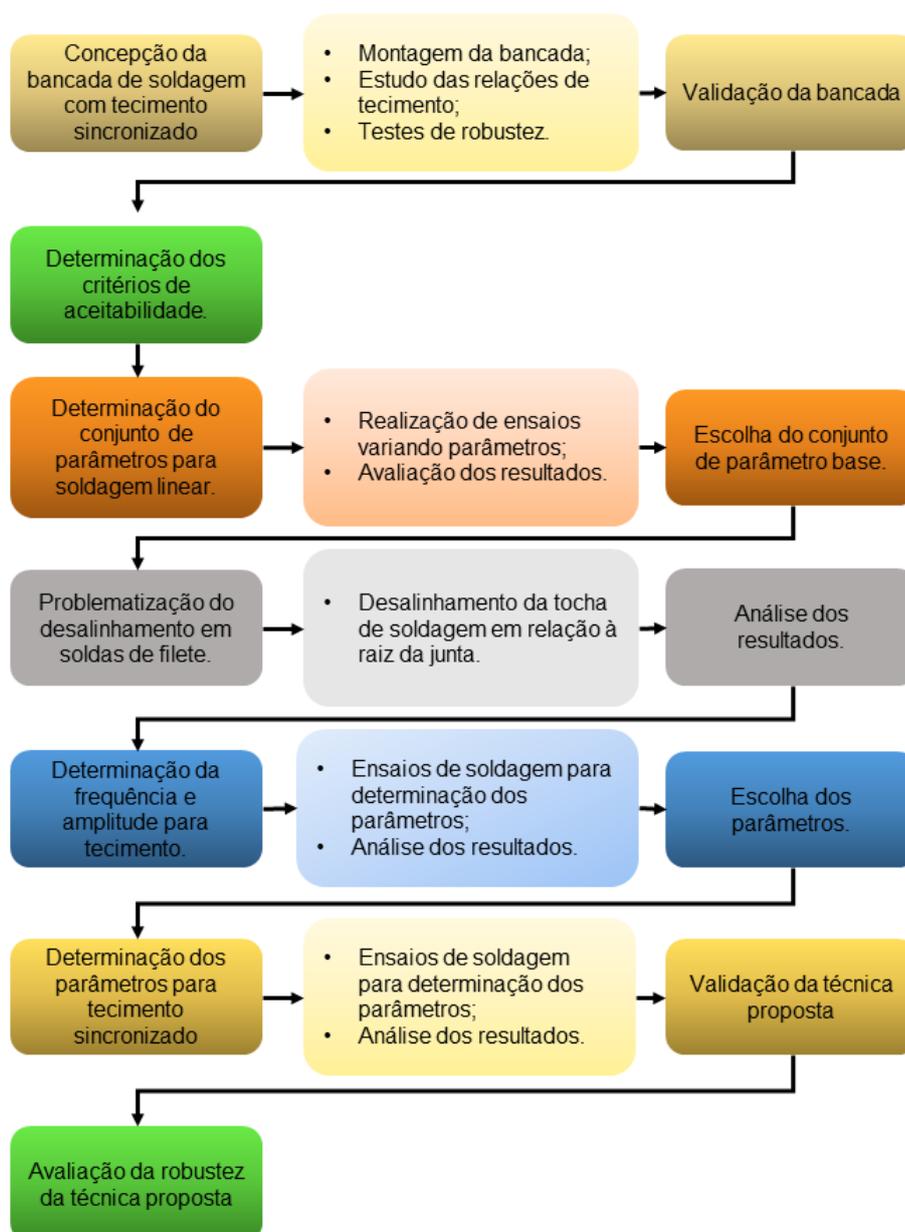
Fonte: Adaptado de Tasalloti, Kah e Martikainen (2013).

Dado o fato da escassez de estudos sobre a alteração de parâmetros de soldagem durante o tecimento em juntas em T de espessuras dissimilares, a importância do presente trabalho se faz reafirmada.

### 3 DESENVOLVIMENTO

Para que os objetivos do trabalho fossem plenamente atingidos, o mesmo foi dividido em 7 grandes etapas, as quais resultaram em outras sub etapas. Para melhor entendimento da estruturação do trabalho, a Figura 22 apresenta um fluxograma sintetizado das etapas realizadas.

Figura 22 – Fluxograma do trabalho.



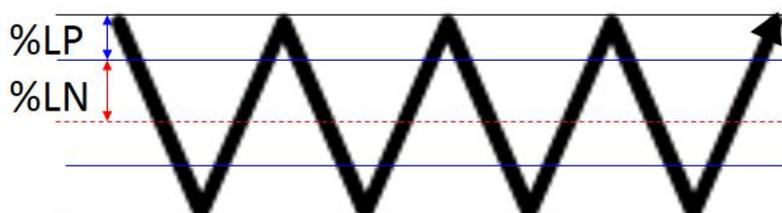
Fonte: Autora (2019).

### 3.1 CONCEPÇÃO DA BANCADA PARA SOLDAGEM COM TECIMENTO SINCRONIZADO

Para alcançar o objetivo íntegro deste trabalho, uma bancada de ensaios foi estruturada no Laboratório de Tecnologia de Soldagem (LTS) na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville. Para validar a capacidade de sincronismo da fonte de soldagem com o sistema de movimentação, em um primeiro momento, estruturou-se uma bancada de ensaios constituída por uma fonte de energia modelo DigiPLUS A7 IMC com capacidade de corrente de até 450 A, tocha de soldagem, tracionador de arame, bobina de arame, sistema de aquisição de dados SAP V4, unidade de refrigeração, gás de proteção e sistema de deslocamento Tartílope V2F.

O sincronismo entre os equipamentos utilizados se deu por comunicação via I/O, onde o Tartílope V2F envia o sinal de disparo da fonte de soldagem e habilita a movimentação do carrinho de deslocamento. Adicionalmente, é possível definir a relação de troca de parâmetros enviada à fonte de soldagem a partir do Tartílope V2F. Utilizando como exemplo a soldagem com tecimento triangular, as regiões com diferentes atuações dos programas de soldagem são apresentadas pela Figura 23. Onde LP e LN correspondem ao programa P1 e P2 da fonte de soldagem, respectivamente.

Figura 23 – Regiões de atuação dos programas de soldagem P1 e P2 no tecimento triangular

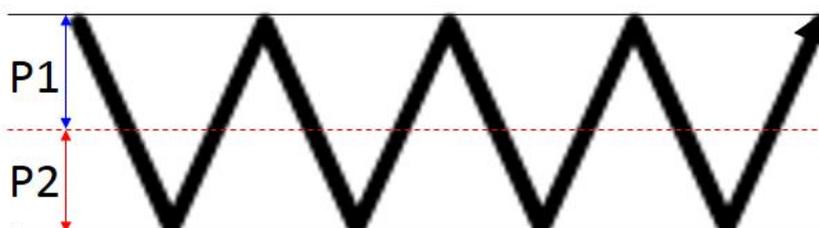


Fonte: Autora (2019).

Para que o propósito deste trabalho fosse alcançado, a porcentagem de cada programa foi configurada de maneira que metade do movimento do tecimento possa ser realizado com o Programa 1 e a outra metade com o Programa 2, como mostra a

Figura 24. Sendo que o Programa 1 estará relacionado com a chapa Fina e o Programa 2 com a chapa Grossa.

Figura 24 – Regiões de atuação dos programas definidas para o trabalho.



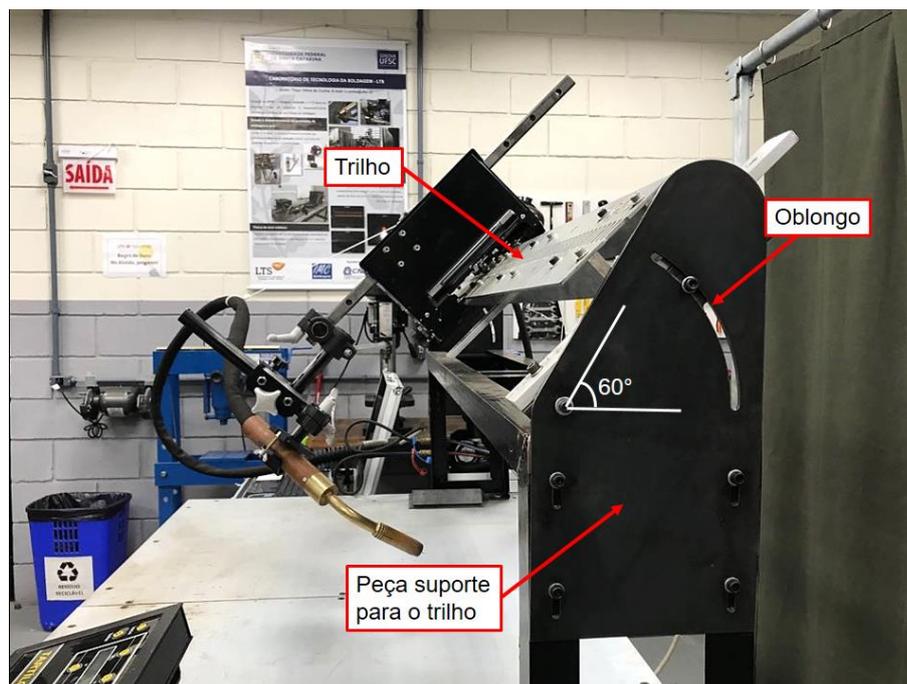
Fonte: Autora (2019).

De acordo com as orientações do Welding Handbook (2001), a soldagem de filete em junta em T deve ser realizada com um ângulo de  $45^\circ$  entre a peça de base e a tocha de soldagem. Desta forma, teve-se a necessidade de estruturar uma bancada que permitisse a angulação da tocha de soldagem pudesse ser obtida.

Para atingir o posicionamento desejado, o trilho do sistema de deslocamento necessitou ser inclinado. Para isso, uma peça suporte foi desenvolvida para que o trilho pudesse ser apoiado. Com a finalidade de tornar este suporte mais versátil para futuras aplicações, o ajuste de ângulo é realizado por um oblongo, permitindo que a inclinação do trilho do sistema de deslocamento de tocha fique entre os ângulos  $0^\circ$  e  $60^\circ$ .

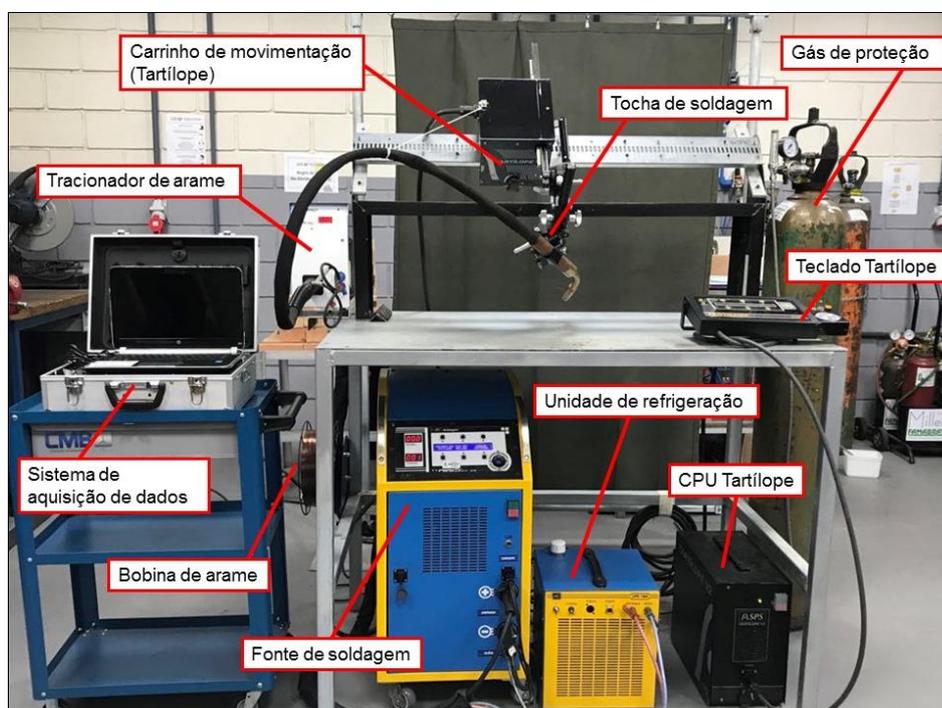
Nas Figura 25 e Figura 26, mostra-se respectivamente o mecanismo para inclinação do trilho já montado na bancada de ensaios e uma vista frontal da bancada com todos os equipamentos necessários para a realização dos ensaios da próxima etapa do trabalho.

Figura 25 – Suporte basculante montado.



Fonte: Autora (2019).

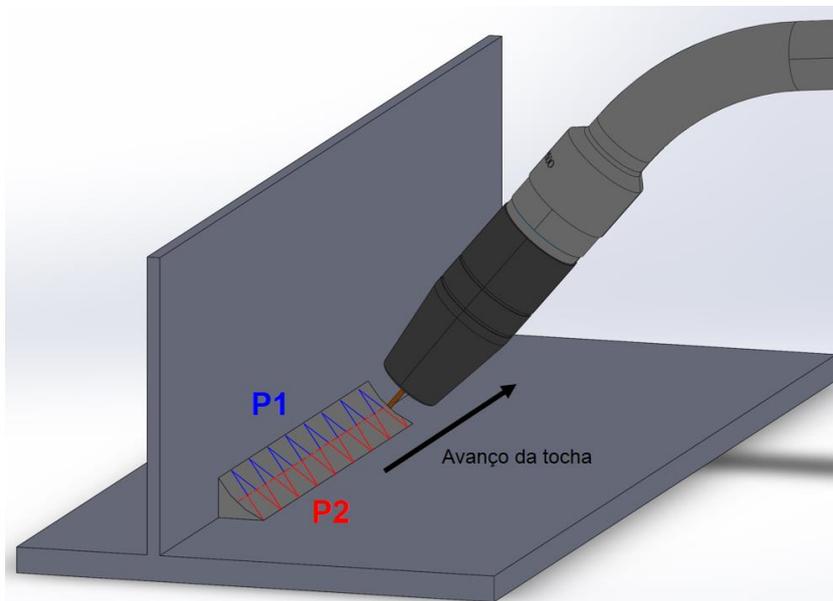
Figura 26 – Estruturação da bancada de ensaios.



Fonte: Autora (2019).

Para um melhor entendimento, a Figura 27 representa a troca de parâmetros em uma vista tridimensional.

Figura 27 – Desenho esquemático de programas para o tecimento sincronizado.



Fonte: Autora (2019).

### 3.2 DETERMINAÇÃO DOS CRITÉRIOS DE ACEITABILIDADE DOS CORDÕES DE SOLDA.

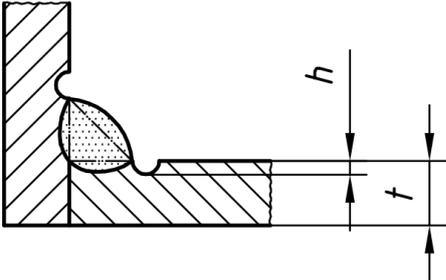
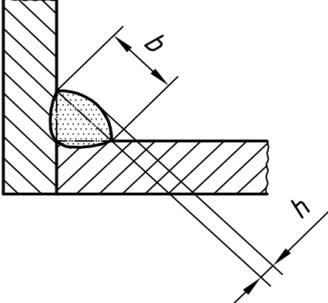
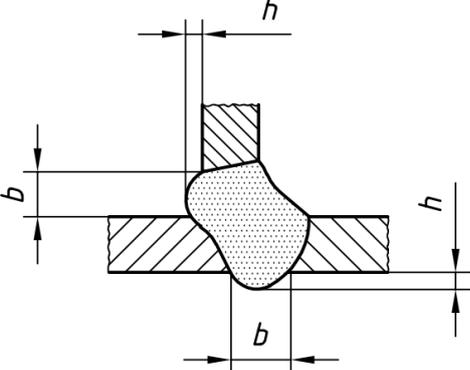
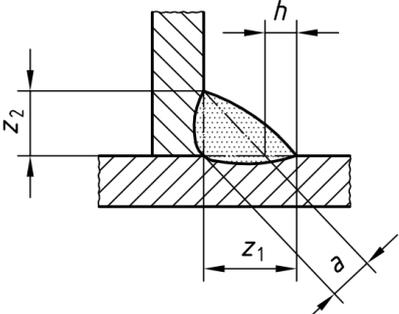
Como já citado na Seção 1 deste trabalho, a soldagem de filete para juntas de espessuras dissimilares não é tratada com muita abrangência pelas normas. Dado este fato, buscou-se adaptar a aplicação das mesmas ao escopo do trabalho. Em função disso, a seguir é apresentada uma síntese daquilo que se encontra nas principais normas aplicada à soldagem em juntas em T.

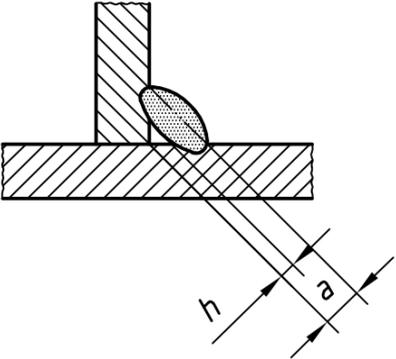
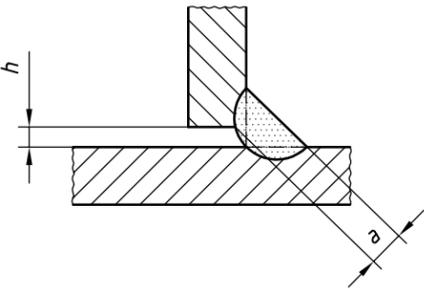
#### 3.2.1 Norma ISO

As normas ISO de soldagem apresentam níveis de qualidade de aceitação para as imperfeições apresentadas. Estes limites variam entre B, C e D. Onde B apresenta a melhor e mais rigorosa qualidade. A normas ISO 5817 traz medidas recomendadas para juntas em T, como folga entre os materiais de bases, ângulo entre as chapas, penetração excessiva, assimetria entre pernas, falta de penetração e convexidade máxima. Entretanto, nenhuma destas especificações é dada para juntas de

espessuras dissimilares. A Tabela 4 apresenta os valores recomendados para diferentes parâmetros dos cordões.

Tabela 4 – Parâmetros recomendados pela Norma ISSO 5817.

No.	Designação da imperfeição	Ilustração	Espessura [mm]	Limites de imperfeição para nível de qualidade B
1.7	Mordedura intermitente		0,5 – 3mm  >3	$h \leq 0,1 t$  $h \leq 0,1 t$ , mas no máximo 5mm
1.10	Convexidade excessiva		$\geq 0,5$	$h \leq 1 \text{ mm} + 0,1t$ , mas no máximo 3 mm
1.11	Excesso de penetração		0,5 – 3  >3	$h \leq 1\text{mm} + 0,1b$  $h \leq 1\text{mm} + 0,2b$ , mas no máximo 3mm
1.16	Assimetria entre pernas		$\geq 0,5$	$h \leq 1,5\text{mm} + 0,15 a$

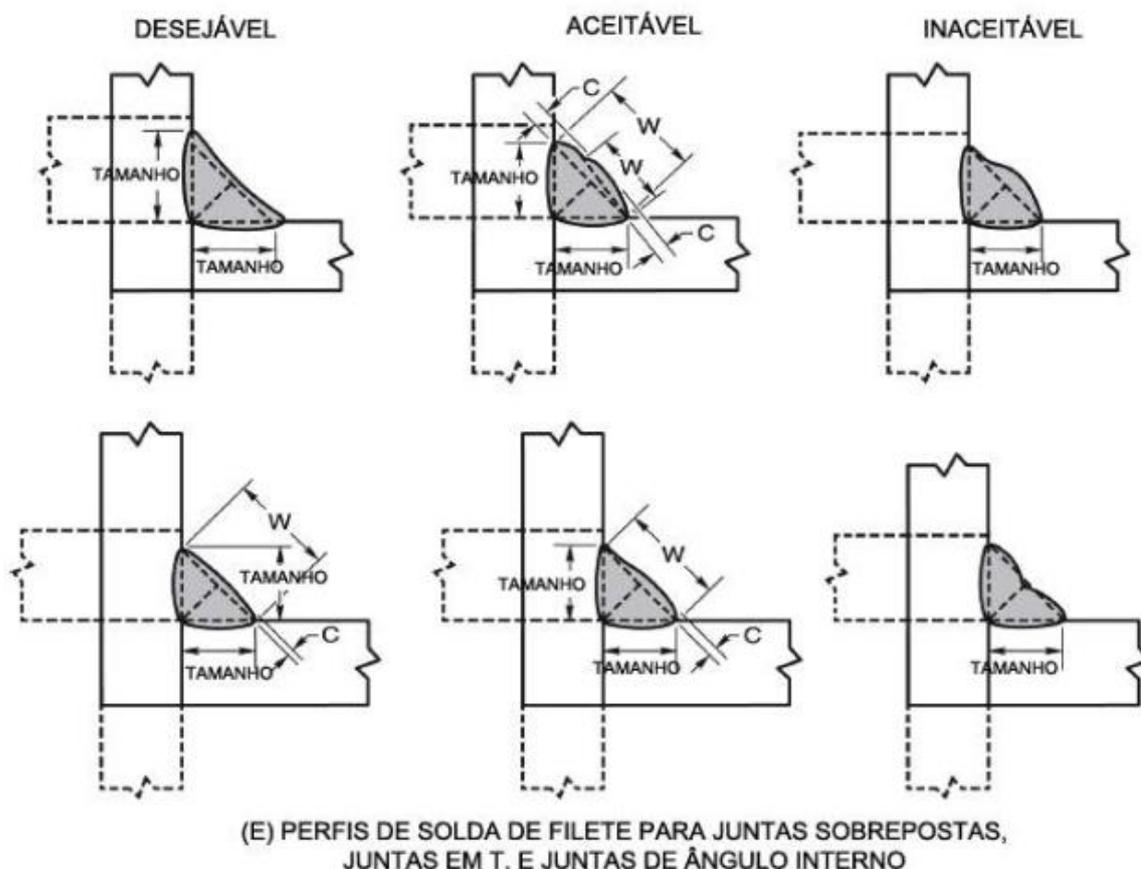
2.13	Falta de penetração		$\geq 0,5$	Não permitido
3.3	Gap incorreto		$0,5 - 3$  $>3$	$h \leq 2 \text{ mm} + 0,1 a$  $h \leq 0,5 \text{ mm} + 0,1 a$ , mas no máximo 2 mm

Fonte: Adaptado de ISO 5817.

### 3.2.2 Norma AWS

A norma AWS D1.1, trata de forma escassa valores limites para solda de filete. Ao se tratar de tamanho de perna, ângulo entre chapas e penetração, AWS D1.1 aborda que estes valores devem estar especificados em documentos de contrato em desenhos de oficina, não trazendo valores pontuais. Os limites apresentados pela norma são referentes à largura da face e convexidade permissível. Estas estão apresentadas na Tabela 5 com base na Figura 28.

Figura 28 – Perfis para solda de filete segundo AWS D1.1 (2010).



Fonte: AWS D1.1 (2010)

Tabela 5 – Valores de perfil de solda com base na Figura 28.

	Programa C		
	Largura (W)	Convexidade mínima (C.)	Convexidade máxima (C.)
Desejável	$\leq 8\text{ mm}$	0	2 mm
Aceitável	$8\text{ mm} > W < 25\text{ mm}$	0	3 mm
Inaceitável	$\geq 25\text{ mm}$	0	5 mm

Fonte: AWS D1.1 (2010)

### 3.2.3 Norma NBR

A norma NBR 8800 (2008) é uma norma brasileira para projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios e traz uma seção especial para tamanho de perna de soldas de filete em função da chapa soldada de menor espessura, apresentada na Tabela 6. Adicionalmente a norma traz também valores

mínimos para garganta efetiva onde a medição é dada pela profundidade do chanfro para soldagem MIG/MAG plana com ângulo de 45° (Tabela 7).

Tabela 6 – Tamanho mínimo de perna para cordões de solda de filete de acordo com a NBR8800 (2008).

<b>Menor espessura do metal de base</b> mm	<b>Tamanho mínimo da perna solda de filete</b> mm
Abaixo de 6,35	3
Acima de 6,35 até 12,5	5
Acima de 12,5 até 19	6
Acima de 19 até 37,5	8

\*Exceutadas somente com um passe

Fonte: NBR 8800 (2008).

Tabela 7 – Tamanho mínimo para garganta efetiva para solda de filete de acordo com a NBR8800 (2008).

<b>Menor espessura do metal de base</b> mm	<b>Tamanho mínimo da garganta efetiva</b>
Abaixo de 6,35	3
Acima de 6,35 até 12,5	5
Acima de 12,5 até 19	6
Acima de 19 até 37,5	8

Fonte: NBR 8800 (2008).

### 3.2.4 Norma CSA

A norma CSA (Canadian Standards Association) é uma norma canadense que trata sobre construções metálicas com soldagem a arco. Para cordões com penetração parcial, esta norma corrobora com a NBR 8800 para medição de garganta mínima, onde deve ser de 3 mm para soldas de filete com 45°. Já o tamanho de perna mínimo exigido pela norma é apresentado pela Tabela 8, novamente corroborando com NBR 8800.

Tabela 8 – Tamanho mínimo da perna para solda de filete CSA.

<b>Espessura do material [mm]</b>	<b>Tamanho mínimo da perna [mm]</b>
$t \leq 6$	3
$6 < t \leq 12$	5
$12 < t \leq 20$	6
$20 < t$	8

Fonte: Adaptado de CSA W59-03 (2003).

### 3.2.5 Critério Adicional

No que tange aos valores adequados para penetração, as normas não trazem valores ou relações pertinentes, não obstante a isto, para buscar uma adequação do perfil de penetração para soldagem de filete de espessuras dissimilares, se fez necessário incorporar critérios relacionados à penetração, além de todos os demais critérios recomendados pelas normas ISO, AWS, NBR e CSA.

Para tanto, determinou-se penetrações máximas e mínimas baseadas na espessura da chapa. Adicionalmente, buscando obter um perfil transversal mais adequado, definiu-se uma assimetria máxima entre as penetrações das chapas de espessura diferente, baseado no valor de menor penetração. Os critérios adicionais estão condensados na Tabela 9.

Tabela 9 – Critérios Adicional.

<b>Critério</b>	<b>Medida</b>
Penetração mínima	$t/10$
Penetração máxima	$t/2$
Assimetria máxima entre penetrações	$1/3$ da menor penetração medida
*onde t é a espessura da chapa	

Fonte: Autora (2019).

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Com a finalidade de tornar possível a avaliação da aplicação da técnica de tecimento sincronizado na soldagem em juntas em T com chapas de espessuras dissimilares, estruturou-se uma bancada, no Laboratório de Tecnologia da Soldagem (LTS), da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Centro Tecnológico de Joinville, capaz de realizar tal sincronismo.

### 4.1 MATERIAS

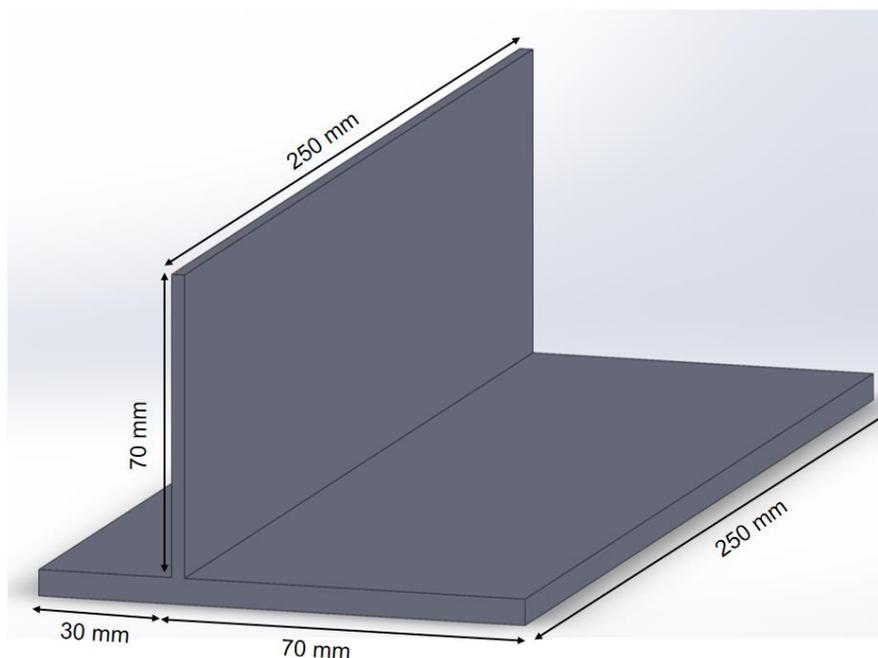
Para a realização dos ensaios foram utilizados, chapas de aço ASTM A36 com espessuras e dimensões diferentes. A chapa Fina possui espessura de 2,7 mm e dimensões (250 mm x 70 mm), já a Grossa, 6,5 mm de espessura com dimensões (250 mm x 100 mm). A escolha das espessuras se deu pela disponibilidade de material no LTS, buscando obedecer a premissa de uma diferença mínima de 50% entre espessuras das chapas.

O material de adição empregado foi o arame maciço de aço carbono AWS ER70S-6, com 1,2 mm de diâmetro, já o gás de proteção utilizado foi a mistura de gás Ar + 15% de CO<sub>2</sub> com vazão constante de 13 L/min.

### 4.2 POSICIONAMENTO DAS CHAPAS EM JUNTA EM T

Para que as chapas se mantivessem ortogonais durante o processo de soldagem, as mesmas foram ponteadas ortogonalmente com MIG/MAG manual. A chapa Fina foi posicionada à 30 mm do início da chapa Grossa, como mostra a Figura 29.

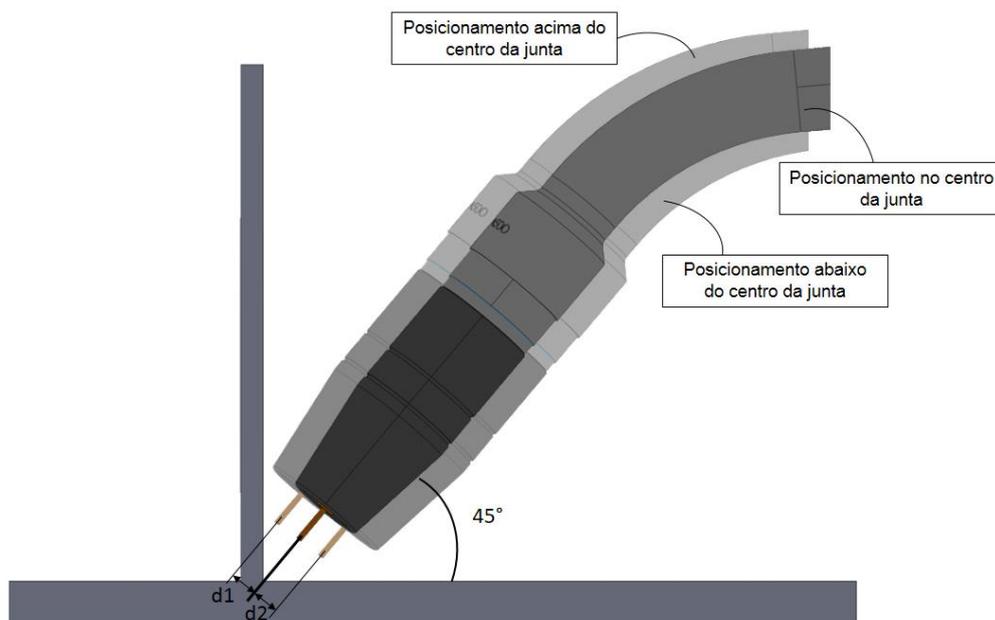
Figura 29 – Posicionamento das chapas para soldagem.



Fonte: Autora (2019).

No que se relaciona à soldagem de união das chapas, o trabalho foi dividido em três grandes etapas, sendo estas soldagem linear, com tecimento e com tecimento sincronizado. A sequência das etapas está exposta na forma de fluxograma na Seção 3. Em todas as etapas, a tocha foi posicionada em um ângulo de  $45^\circ$ , como recomenda o *Welding Handbook* (2001). Ao fim de cada etapa, para verificar a robustez do processo ao desalinhamento, a tocha foi movida nas distâncias  $d_1$  e  $d_2$ . Onde  $d_1$  e  $d_2$  ora são 1 mm e ora 2mm, como mostra a Figura 30.

Figura 30 – Posicionamentos da tocha de soldagem empregada na realização dos ensaios.



Fonte: Autora (2019).

#### 4.3 PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM

Com a bancada estruturada, buscou-se padronizar o procedimento de cada ensaio de soldagem. Para obter o posicionamento de 45° da tocha em relação à peça de soldagem, o trilho foi colocado na posição plana e a tocha alinhada com o plano da mesa, e então, com auxílio de um transferidor e um nível de 45°, inclinou-se o trilho. Devido ao movimento relativo entre a tocha de soldagem e o trilho, a tocha também ficou ajustada em 45°.

Antes da realização de cada ensaio de soldagem, foi verificado se a tocha de soldagem encontrava-se posicionada na raiz da junta em todo o comprimento, garantindo o alinhamento.

Com os parâmetros já configurados na fonte de soldagem e no sistema de deslocamento, iniciava-se a soldagem. Cordões de aproximadamente 80mm foram realizados com a velocidade de soldagem de 30 cm/min e com DBCP de 17 mm.

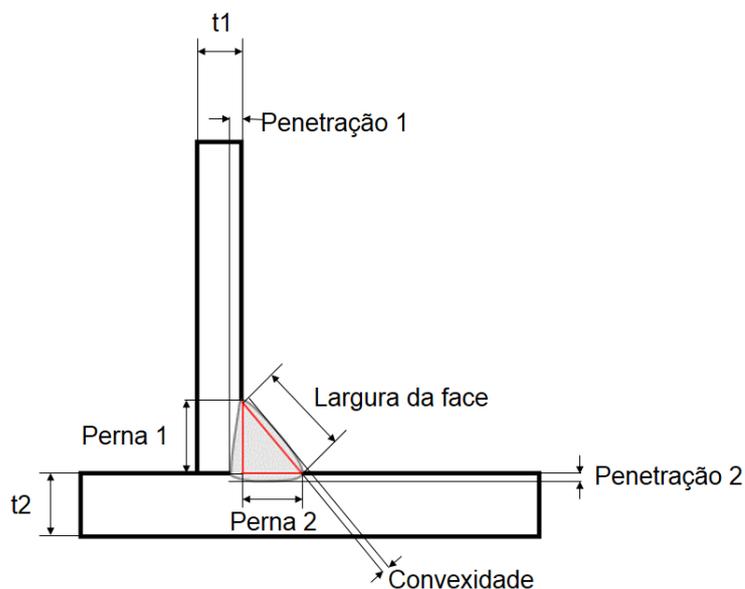
#### 4.4 ANÁLISE METALOGRÁFICA

Com o intuito de analisar aspectos geométricos da seção transversal do cordão de solda, fez-se necessário retirar uma amostra de cada cordão de solda. Em todas as etapas, buscou-se retirar a amostra próximo do centro de cordão, onde o processo de soldagem já teria ganho estabilidade. Para tal, uma Serra Fita horizontal Starrett refrigerada modelo S-3720 foi utilizada para a realização do corte.

Após o corte, cada amostra passou por um processo de lixamento começando com a lixa de granulometria 80, em seguida, as lixas 180, 240, 400 e 600 foram utilizadas. Posteriormente, as amostras foram atacadas quimicamente por imersão, com Nital 4%. Ao realizar este procedimento, foi possível revelar a geometria transversal do cordão de solda.

Para quantificar a geometria de interesse, o programa “open source” ImageJ (2015) foi utilizado para obter as medidas lineares como perna, largura da face, convexidade, GAP e penetrações dos cordões obtidos. A Figura 31 apresenta as medidas que foram obtidas. No decorrer do texto apresentado, o índice 1 sempre será relacionado à chapa Fina, e o 2, com a chapa Grossa.

Figura 31 – Medidas analisadas.



Fonte: Autora (2019).

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

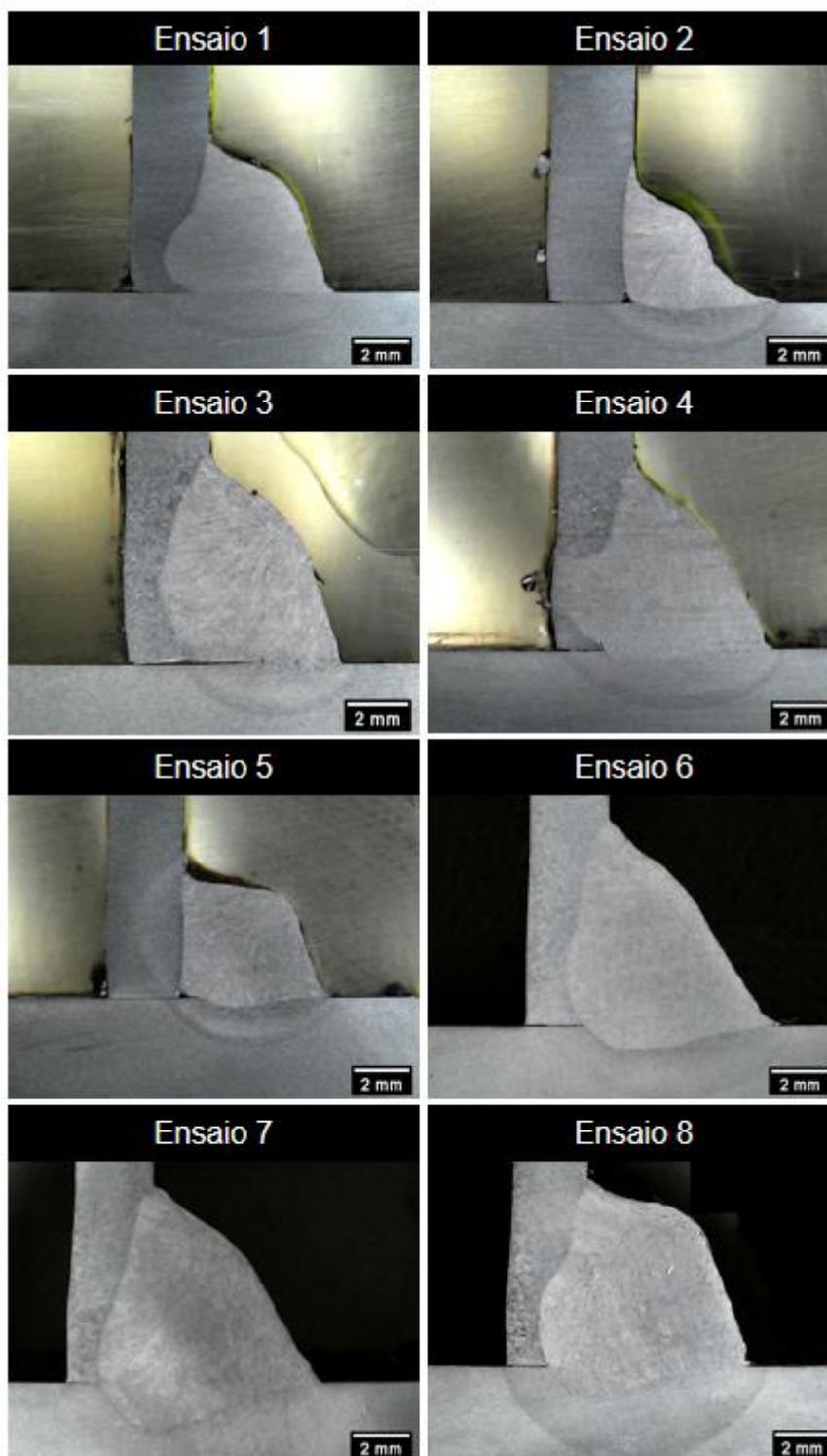
### 5.1 DETERMINAÇÃO DO CONJUNTO DE PARÂMETROS PARA SOLDAGEM CONVENCIONAL EM ÂNGULO COM AVANÇO LINEAR DA TOCHA DE SOLDAGEM

Nesta etapa do trabalho, buscou-se a combinação de parâmetros (velocidade de alimentação do arame e tensão) que apresentasse uma geometria de penetração adequada para ambas as chapas que compõe a junta em T, realizando soldagem linear sem sincronismo. Como critério de avaliação, utilizou-se diferentes normas, como ISO, AWS, NBR, CSA e também o Critério Adicional. A razão de utilizar diferentes normas decorre devido à falta de parâmetros de aceitabilidade para juntas de espessura dissimilar.

Ensaios de soldagem foram realizados com diferentes parâmetros, apresentados na Tabela 10, juntamente com as medições e análises normativas. Na coluna das normas, o preenchimento vermelho corresponde que houve algum dos critérios da norma que não foram atendidos, já em verde, significa que todos os critérios da respectiva norma foram atendidos

As macrografias dos respectivos ensaios estão apresentadas na Figura 32.

Figura 32 – Macrografias dos cordões de soldagem obtidos com soldagem linear.



Fonte: Autora (2019).

Tabela 10 – Parâmetros, medições e avaliações dos cordões obtidos com soldagem linear.

Onde as medidas estão apresentadas em milímetros.

Ensaio	Parâmetros	Convexidade	Largura da face	Perna ch. fina	Perna ch. grossa	Penetração ch. fina	Penetração ch. grossa	Norma	
1	Vs 30 cm/min Va 4 m/min V 19V Linear	1,07	6,9	5,23	4,32	1,62	0,045	ISO	-
								AWS	-
								NBR	Perna insuficiente
								CSA	Perna insuficiente
Adicional	Penetração insuficiente								
2	Vs 30 cm/min Va 4 m/min V 20V Linear	0,43	5,4	4,73	4,79	0,332	0,221	ISO	Falta de penetração
								AWS	-
								NBR	Perna insuficiente
								CSA	Perna insuficiente
Adicional	Penetração insuficiente								
3	Vs 30 cm/min Va 5 m/min V 20V Linear	1	8,13	7,09	4,22	1,668	0,078	ISO	Assimetria entre pernas
								AWS	-
								NBR	Perna insuficiente
								CSA	Perna insuficiente
Adicional	Penetração insuficiente								
4	Vs 30 cm/min Va 5 m/min V 21V Linear	0,62	8,1	6,82	4,62	2,7	0,219	ISO	Assimetria entre pernas
								AWS	-
								NBR	Perna insuficiente
								CSA	Perna insuficiente
Adicional	Penetração excessiva								
5	Vs 30 cm/min Va 4 m/min V 18V Linear	1,7	6,88	4,16	5,02	0,079	0,324	ISO	Falta de penetração
								AWS	-
								NBR	-
								CSA	-
Adicional	Penetração insuficiente								
6	Vs 30 cm/min Va 5 m/min V 22V Linear	0,53	9,15	7,11	5,86	1,342	0,765	ISO	-
								AWS	-
								NBR	-
								CSA	-
Adicional	Assimetria entre penetrações								
7	Vs 30 cm/min Va 6 m/min V 22V Linear	0,85	9,04	6,89	5,79	1,892	1,662	ISO	-
								AWS	-
								NBR	-
								CSA	-
Adicional	Penetração excessiva								
8	Vs 30 cm/min Va 7 m/min V 22V Linear	2,88	9,18	8,79	6,11	1,775	0,975	ISO	Assimetria entre pernas
								AWS	-
								NBR	-
								CSA	Convexidade
Adicional	Penetração excessiva								

Fonte: Autora (2019).

Nota-se que os cordões adequados em todas as normas são os da seção transversal de números 6 e 7. Ambos não se mostraram adequados para Critério Adicional por diferentes critérios. Para dar sequência no trabalho, os parâmetros do cordão 6 foram adotados como os de referência, com a finalidade de obter uma seção transversal mais adequada de forma que seja aprovado pelo Critério Adicional.

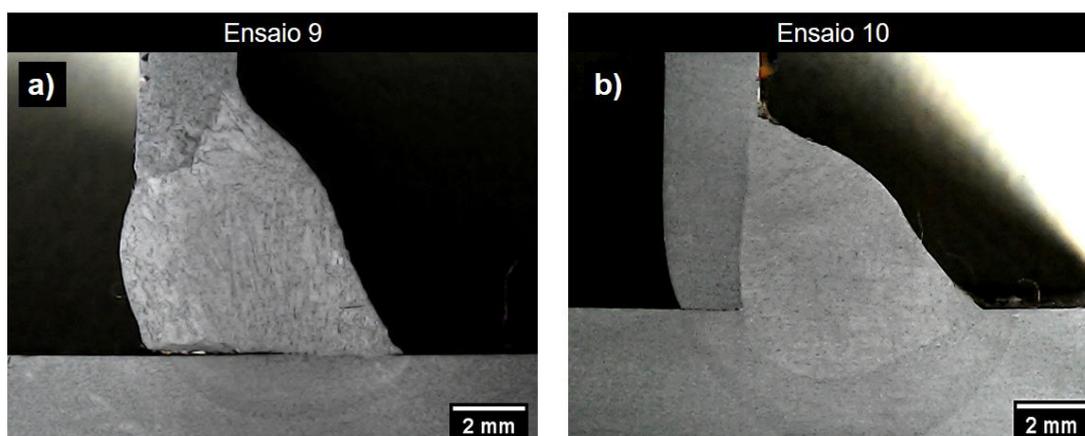
## 5.2 EFEITO DO DESALINHAMENTO NA SOLDAGEM LINEAR DE JUNTA EM T

Visto que o posicionamento da chapa em relação à tocha de soldagem em soldagens mecanizadas é um fator de extrema influência, e, dada a dificuldade da garantia do mesmo posicionamento para todas as chapas à serem soldadas, avaliou-se o efeito causado pelo desalinhamento da tocha de soldagem em relação à junta. Para tal, foram realizados dois ensaios de soldagem. Estes dois ensaios consistiram na utilização dos mesmos parâmetros de soldagem apresentados pela Tabela 10 para o cordão 6 da Seção 5.1, porém com deslocamento da tocha de 1 mm, como demonstra a Figura 30 da Seção 4.2. Os procedimentos utilizados para análise descritos na Seção 4.2 e 4.3 foram replicados.

A Figura 33 apresenta as macrografias obtidas com a soldagem desalinhada do centro da junta. Sua avaliação normativa está apresentada na Tabela 11. Nota-se que para a condição de desalinhamento mais próximo da chapa Fina houve penetração completa, extrapolando o limite de penetração imposto pelo critério Adicional. Já na chapa Grossa, a penetração foi inadequada. No que se trata do desalinhamento abaixo do centro da junta, não houveram resultados críticos.

Figura 33 - Macrografia dos cordões obtidos com soldagem linear com desalinhamento.

Onde a) d1 corresponde a 1 mm e b) d2 corresponde a 1 mm.



Fonte: Autora (2019).

Tabela 11 - Parâmetros, medições e avaliações dos cordões obtidos com soldagem linear para desalinhamento de 1 mm.

Ensaio	Convexidade	Largura da face	Perna ch. fina	Perna ch. grossa	Penetração ch. fina	Penetração ch. grossa	Norma	
9	0,529	9,00	7,68	4,56	0,00	2,75	ISO	Falta de penetração
							AWS	-
							NBR	Perna insuficiente
							CSA	Perna insuficiente
							Adicional	Penetração insuficiente
10	0,804	5,40	4,73	4,79	0,58	1,80	ISO	-
							AWS	-
							NBR	-
							CSA	-
							Adicional	Assimetria de penetração

Fonte: Autora (2019).

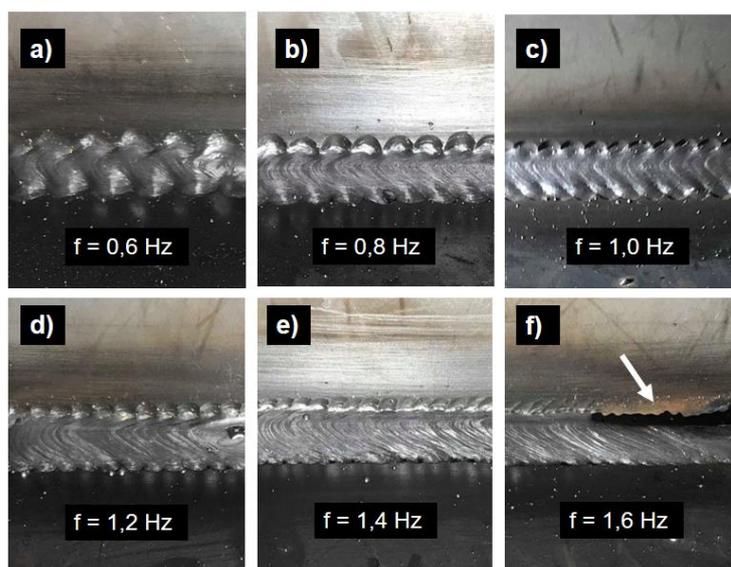
Tendo em vista a sensibilidade da soldagem linear para juntas em T de espessuras dissimilares, onde um desalinhamento de apenas 1 mm pode ocasionar a falta de penetração em uma das chapas que compõem a junta, a análise do efeito do desalinhamento justifica mais uma vez a importância da técnica proposta pelo presente trabalho.

### 5.3 APLICAÇÃO DO TECIMENTO PARA DETERMINAÇÃO DA AMPLITUDE E FREQUÊNCIA.

Nas etapas onde é necessária a aplicação de tecimento, se fez necessária a definição da amplitude e frequência do mesmo. Para estabelecer a amplitude, em um primeiro momento, estipulou-se um valor de forma a representar um desalinhamento para cada lado de 5 vezes maior que o estudado na Seção 5.2. Desta forma, aplicou-se 10 mm de amplitude total de tecimento.

Para determinar a frequência de tecimento, foram realizados cordões de solda com os mesmos parâmetros de soldagem da Tabela 10 para o cordão de número 6, variando a frequência de entre 0,6 e 1,6 Hz. Como pode-se notar na Figura 34 este intervalo de valores representa os limites inferior e superior para aplicação de tecimento. Onde para 0,6 Hz o cordão não ficou regular e para 1,6 Hz houve perfuração da chapa Fina, como indicado na Figura 34 (a) e (f), respectivamente.

Figura 34 - Frequências analisadas para a implementação do tecimento.

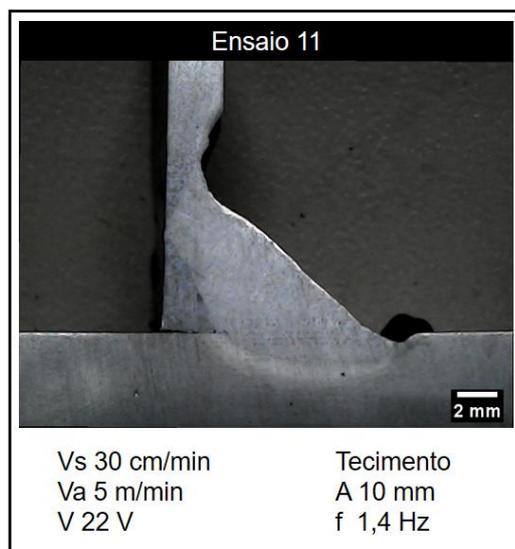


Fonte: Autora (2019).

Com base nestes resultados, a frequência de tecimento escolhida para ser empregada na próxima etapa do trabalho foi a de 1,4 Hz, com base na continuidade e aspecto superficial do cordão.

Com o objetivo de visualizar o efeito causado pela aplicação de tecimento na junta soldada, a macrografia da seção transversal foi realizada seguindo os mesmos procedimentos apresentados na Seção 4.4. A Figura 35 mostra a seção transversal do cordão de solda. Nota-se nitidamente que a aplicação do tecimento resultou em mordeduras que não atendem aos critérios definidos pela norma ISO 5817.

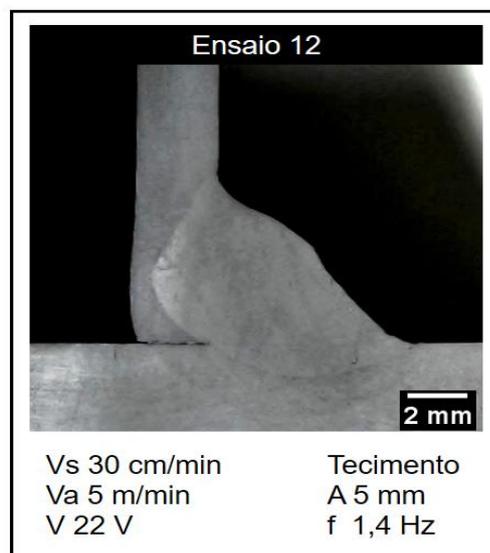
Figura 35 – Macrografia da seção transversal do cordão de solda realizado com amplitude de 10 mm.



Fonte: Autora (2019).

Partindo da premissa que parte da causa das mordeduras tenha sido a grande amplitude de tecimento empregada, reduziu-se a amplitude de oscilação da tocha pela metade, ou seja 5 mm. A macrografia apresentando o cordão com os mesmos parâmetros da Figura 35, porém, com 5 mm de amplitude é apresentada na Figura 36.

Figura 36 – Macrografia da seção transversal do cordão de solda para amplitude de 5 mm.



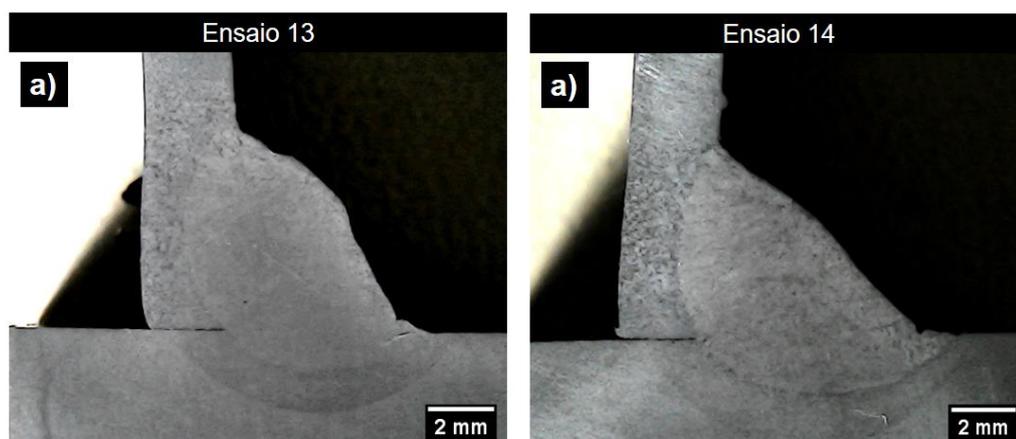
Fonte: Autora (2019).

Desta forma, definiu-se a frequência de 1,4 Hz e amplitude de 5 mm como parâmetros fixos de tecimento.

#### 5.4 EFEITO DO DESALINHAMENTO NA SOLDAGEM DE FILETE COM TECIMENTO NA JUNTA EM T.

Com o objetivo de analisar o efeito causado na geometria do cordão com o desalinhamento no tecimento, novos ensaios de soldagem foram realizados. Seguiu-se os parâmetros escolhidos na Seção 5.3, porém com desalinhamentos em relação ao centro da junta. A Figura 37 apresenta o perfil do cordão para um desalinhamento de 1 mm.

Figura 37 - Macrografia dos cordões de solda com tecimento desalinhado 1mm da raiz da junta. Onde a) para cima e b) para baixo.

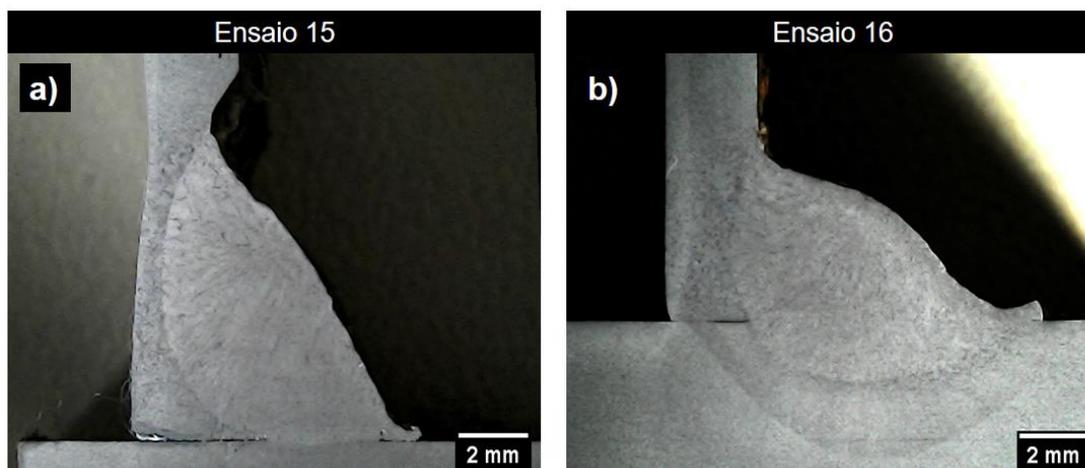


Fonte: Autora (2019).

Nota-se que somente a presença do tecimento já traz uma maior robustez ao processo quando comparado com a soldagem linear. A avaliação normativa referente aos cordões apresentados pode ser encontrada no APÊNDICE A – , onde, ambos os cordões se apresentam adequados para as normas ISO, AWS, NBR e CSA. No entanto, para o Critério Adicional, a penetração do Ensaio 13 (Figura 37 (a)) foi julgado inadequado, ultrapassando 50% da espessura da chapa Fina.

Dado que o desalinhamento de 1 mm se mostrou adequado para as normas, avaliou-se o efeito do desalinhamento com 2 mm da raiz da junta, apresentado na Figura 38.

Figura 38 - Macrografia dos cordões de solda com tecimento desalinhado 2mm da raiz da junta. Onde a) para cima e b) para baixo.



Ao aplicar o desalinhamento de 2 mm da raiz da junta, nota-se que a técnica de tecimento não apresentou uma robustez satisfatória, ocasionando mordeduras e penetrações inadequadas. Em função destes resultados, justifica-se a busca de uma maior robustez para o processo, a implementação de tecimento sincronizado.

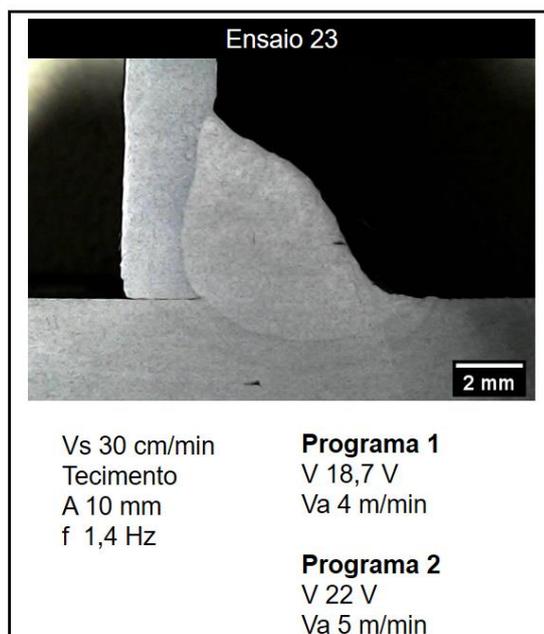
## 5.5 APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE TECIMENTO SINCRONIZADO PARA JUNTAS EM T COM ESPESSURAS DISSIMILARES

Almejando validar a técnica proposta por este trabalho, fez-se necessário encontrar a combinação de parâmetros de soldagem que proporcionassem adequação para a geometria do perfil transversal e para todos os critérios de aceitabilidade. Para tal, cordões de solda foram realizados com diferentes programas de soldagem.

Num primeiro momento, fixou-se o Programa 2 (Figura 24) de soldagem com os parâmetros do cordão de referência (22 V e 5 m/min) e buscou-se encontrar parâmetros para o Programa 1. Os valores de amplitude e frequência de tecimento utilizados foram os especificados na Seção 5.3, em 5 mm e 1,4 Hz, respectivamente.

Após a realização dos ensaios, os quais estão devidamente apresentados no Apêndice A, analisou-se a macrografia da seção transversal dos cordões obtidos e se aplicou as recomendações normativas especificadas na Seção 3.2. Após a avaliação das seções transversais, encontrou-se um conjunto de parâmetros que foram capazes de promover um perfil da seção transversal do cordão de solda mais adequado para ambas as chapas, sendo adequando para todos os critérios, validando a técnica proposta. Este conjunto possui Programa 1 com parâmetros de tensão e velocidade de alimentação de arame 18,7 V e 4 m/min e Programa 2, 22 V e 5 m/min, respectivamente. Sua seção transversal está apresentada na Figura 39, assim como o resumo dos parâmetros utilizados. A avaliação normativa está exibida na Tabela 12.

Figura 39 – Macrografia do cordão de solda utilizando tecimento sincronizado.



Fonte: Autora (2019).

Tabela 12 - Avaliação normativa referente à amostra 23.

Ensaio	Convexidade	Largura da face	Perna ch. fina	Perna ch. grossa	Penetração ch. fina	Penetração ch. grossa	Norma
23	0,583	7,908	5,629	6,325	1,05	1,25	ISO AWS NBR CSA Adicional

Fonte: Autora (2019)

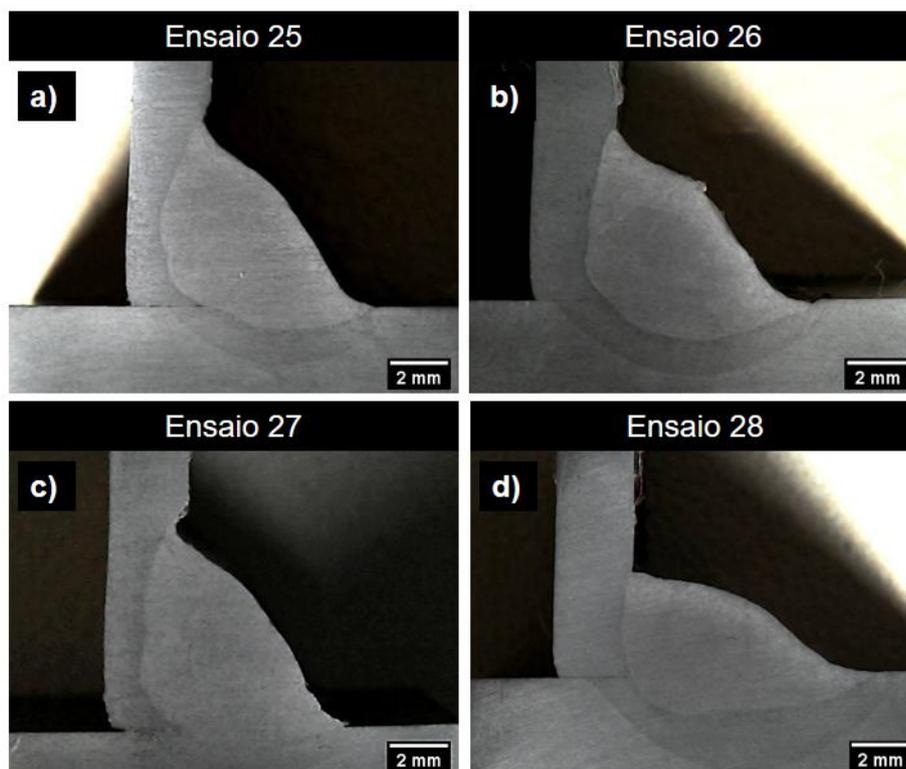
## 5.6 EFEITO DO DESALINHAMENTO NA SOLDAGEM COM TECIMENTO SINCRONIZADO NA JUNTA EM T

Afim de verificar a robustez do processo com tecimento sincronizado, realizaram-se cordões de solda com desalinhamento relativo à linha de união das chapas, com deslocamento da tocha de 1 mm e 2 mm para cima e para baixo, respectivamente, como demonstra a Figura 30 da Seção 4.2. Os procedimentos utilizados para análise descritos na Seção 4.2 e 4.3 foram replicados.

As macrografias juntamente com os parâmetros utilizados estão apresentados na Figura 40. Já suas respectivas medições aplicações normativas estão na

Tabela 13. O processo se mostrou muito robusto para o desalinhamento de 1 mm, tanto para cima como para baixo da junta. Já o desalinhamento de 2 mm, não se mostrou adequado para a ISO, mas ainda assim não se mostrou uma soldagem crítica, validando a robustez da aplicação de tecimento sincronizado para chapas de espessuras dissimilares com junta em T.

Figura 40 – Macrografias dos cordões de solda realizados com tecimento sincronizado desalinhado do centro da junta. Onde a) 1mm para cima, b) 1 mm para baixo, c) 2mm para cima e d) 2 mm para baixo.



Fonte: Autora (2019).

Tabela 13 – Avaliação normativa das amostras 25, 26, 27 e 28.

Ensaio	Convexidade	Largura da face	Perna ch. fina	Perna ch. grossa	Penetração ch. fina	Penetração ch. grossa		Norma
25	0,304	8,625	6,242	5,829	1,338	0,817	ISO	-
							AWS	-
							NBR	-
							CSA	-
							LTS	-
26	0,597	8,184	5,467	5,93	1,045	1,334	ISO	-
							AWS	-
							NBR	-
							CSA	-
							Adicional	-
27	0,531	9,257	7,183	5,872	1,73	0,717	ISO	-
							AWS	-
							NBR	-
							CSA	-
							Adicional	Assimetria entre penetrações
28	0,702	8,926	3,617	8,15	0,404	1,388	ISO	Assimetria entre pernas
							AWS	-
							NBR	-
							CSA	-
							Adicional	Assimetria entre penetrações

Fonte: Autora (2019).

## 6 CONCLUSÕES

Tendo em vista os resultados obtidos ao longo de desenvolvimento do presente trabalho, conclui-se que o objetivo geral de realizar a análise da aplicação da técnica de tecimento sincronizado com a mudança de parâmetros para chapas de espessuras dissimilares em junta em T foi plenamente alcançado. Ademais, pode-se concluir que:

- A bancada concebida para a realização dos ensaios de soldagem MIG/MAG atendeu as necessidades relacionadas à execução dos experimentos do presente trabalho;
- O desalinhamento de 1mm para soldagem MIG/MAG linear se mostrou pouco robusto pois apresentou assimetria inadequada entre penetrações e até mesmo perfuração na chapa Fina;
- A técnica de tecimento sincronizado se mostrou mais robusta aos desalinhamentos quando comparada à soldagem linear e com tecimento sem sincronismo;
- A técnica proposta se mostrou capaz de influenciar a geometria transversal do cordão de solda de acordo com os programas atuantes, conduzindo à uma geometria mais adequada e simétrica.

## 7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com a realização deste trabalho e os resultados obtidos, sugere-se como temas para trabalhos futuros:

- Estudo do efeito das demais velocidades de soldagem e também, frequências e amplitudes aplicadas ao tecimento;
- Estudo da influência da porcentagem dos programas LP e LN na geometria do cordão de solda;
- Avaliação da aplicação da técnica para juntas com GAP;
- Realizar o mapeamento dos parâmetros indicados para outras combinações de espessuras de chapas;
- Aplicar e avaliar a técnica de tecimento sincronizado para juntas em T de espessuras dissimilares fora de posição;
- Aplicar e avaliar a técnica de tecimento sincronizado para chapas de diferentes materiais;
- Aplicar e avaliar a técnica de tecimento sincronizado para juntas sobrepostas;
- Aplicar e avaliar a técnica de tecimento sincronizado para juntas sobrepostas de espessuras dissimilares;
- Realizar estudo aprofundado sobre a influência do tecimento sincronizado na microestrutura da região soldada.

## REFERÊNCIAS

AMERICAN WELDING SOCIETY. **AWS D.1.1/D.1.M:2010** Código de Soldagem Estrutural – Aço. Miami. 2010.

AWS (1991), Welding Processes, Vol. 2 of Welding Handbook, 8th ed., Miami: American Welding Society.

AWS (2001), Welding Handbook - Volume 2, 9th edition; Welding Processes, American Welding Society, USA. ISBN 0-87171-729-8.

BONACORSO, Nelso Gauze et al. Técnica da Oscilação Longitudinal da Tocha para o Incremento da Produção na Soldagem em Ângulo entre Chapas de Espessuras Dissimilares. **Soldagem & Inspeção**, Florianópolis, v. 22, n. 2, p.207-216, jun. 2017. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0104-9224/si2202.09>.

CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION. CSA W59 – Welded Steel Construction (Metal Arc Welding). Mississauga. 2003.

CHEN, Y. HE,Y; CHEN, H; ZHAN H, CHEN, S. Chen Y,He Y, Chen. Effect of weave frequency and amplitude on temperature field in weaving welding process. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. 2014; 75(5):803-813. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-014-6157-0>.

CUNHA, T. V; RIBEIRO, O. H. Avaliação do Uso do Tecimento na Soldagem a Arco Submerso. **Soldagem & Inspeção**, Florianópolis, v23, n 1, p.73-82, abr 2018. <https://doi.org/10.1590/0104-9224/SI2301.08>

GONCALVES, Regis Henrique; DUTRA, Jair Carlos. Oscillation – Polarity Synchronized MIG/MAG Welding Process for Enhanced Performance in Automated Joining and Coating. **Anais do International Offshore And Polar Engineering (ISOPE)**, Anchorage, 5 jul. 2013.

INTERNATIONAL STANDARD. ISO 5817: **Welding – Fusion-welded joints in steel, nickel, titanium, and their alloys (beam welding excluded) – Quality levels for imperfections**. Geneva. 2003.

KOVALENKO, O. MIG/MAG com APSTT (Alternância de Polaridade Sincronizada com Tecimento Transversal) Visando Automação da Soldagem do Passe de Raiz em Tubulações. 2014. 148 f. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Uberlândia.

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. Soldagem: fundamentos e tecnologia. Belo Horizonte: Ed. da UFMG, 2005.

MODENESI, P. J. **Introdução à Física do Arco Elétrico Soldagem I**. Departamento de Engenharia Metalúrgica, UFMG, Belo Horizonte, 2012.

NORMA BRASILEIRA. **ABNT NBR 8800: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios**. Rio de Janeiro. 2008.

SCOTTI, A.; PONOMAREV, V. **Soldagem MIG/MAG**. Artliber Ed, 2008. 284p.

SILVA, E. F; MACEDO, J.R; SCOTTI, A. e de OLIVEIRA, J. C. Power quality analysis of Gas Metal Arc Welding process operating under different drop transfer modes. **Renewable Energies and Power Quality Journal**, Spain, v 1, n 9, may 2011. <http://doi.org/10,24084/repqj09.338>.

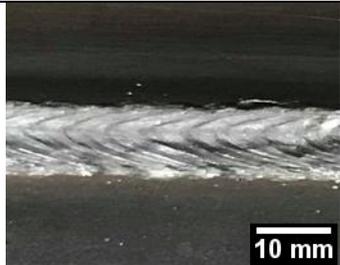
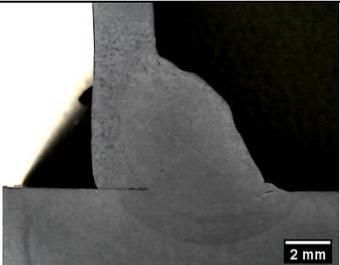
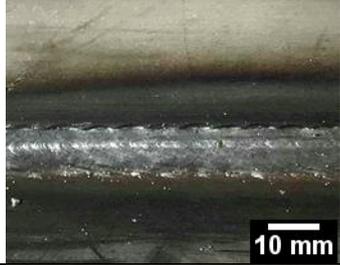
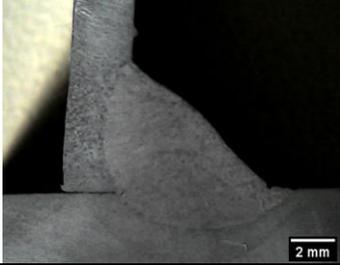
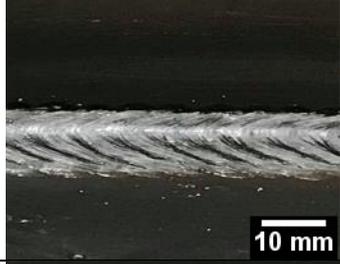
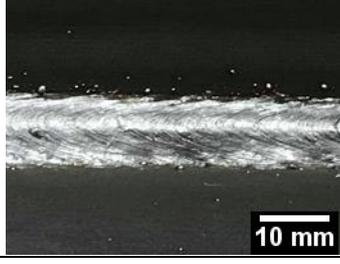
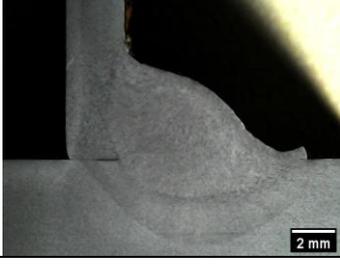
SKHABOVSKYI, I. **MIG/MAG RSSP (com Reversão Sincronizada do Sentido da Tocha e da Polaridade) Visando Automação de Soldagem do Passe de Raiz em Tubulações**. 2014. 154 f. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

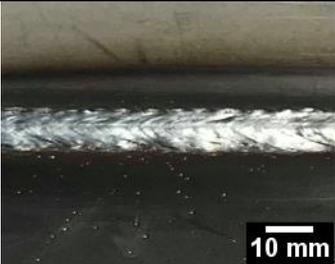
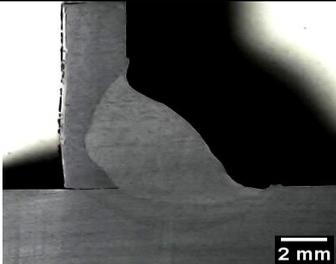
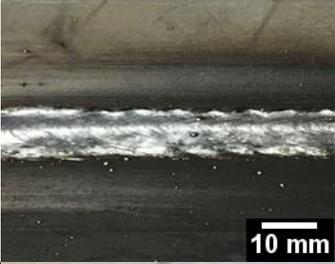
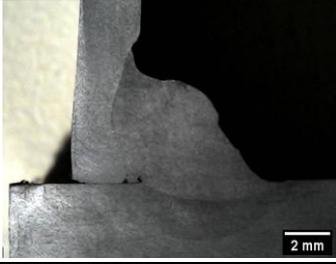
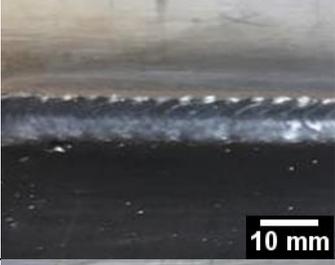
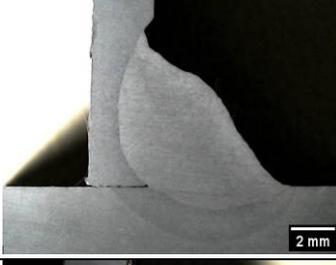
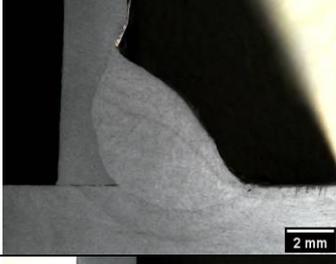
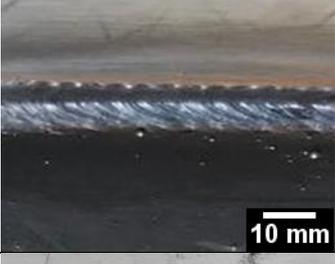
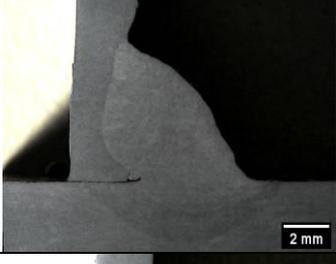
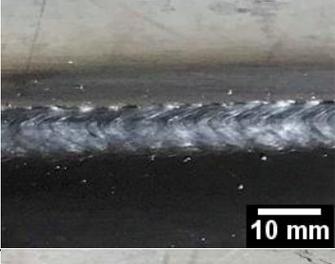
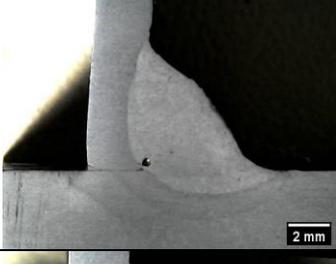
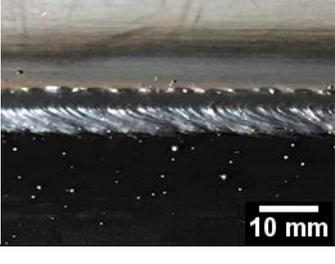
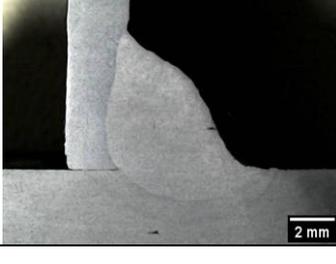
TASSALOTI, H; KAH, H; MARTIKAINEN, J. Effects of welding wire and torch weaving on GMAW of S355MC and AISI 304L dissimilar welds. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. 2014; 71:197 <https://doi.org/10.1007/s00170-013-5484-x>

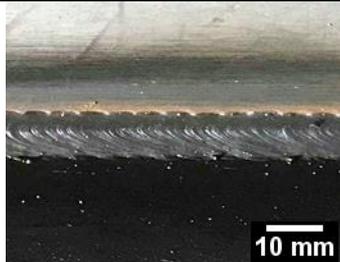
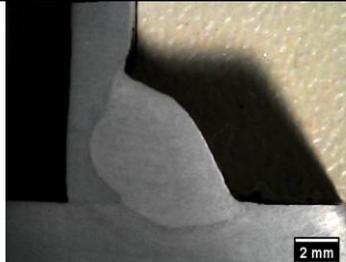
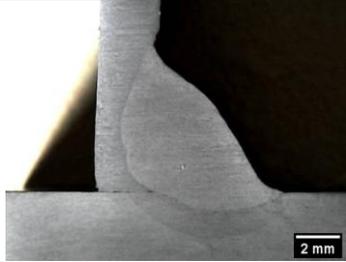
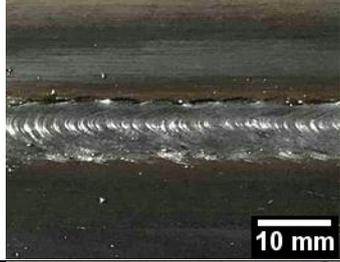
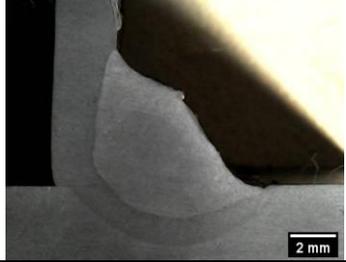
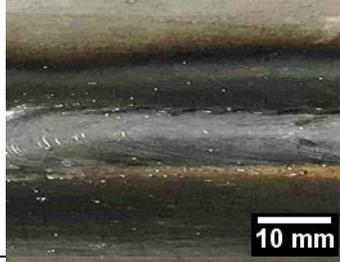
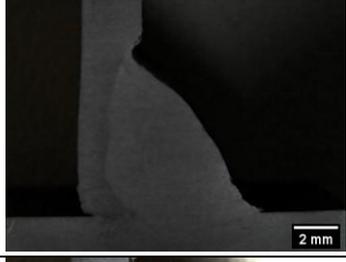
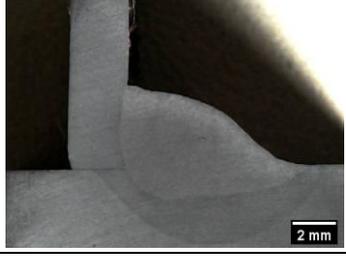
## APÊNDICE A – Imagens dos ensaios de soldagem realizados

De forma a mostrar plenamente os ensaios realizados neste trabalho, as imagens da Tabela 14 trazem os ensaios realizados nas fases onde realizou-se tecimento e tecimento sincronizado. Adicionalmente, as avaliações normativas estão expostas na Tabela 15.

Tabela 14 – Exposição plena dos ensaios de soldagem com tecimento e tecimento sincronizado.

Ensaio	Parâmetros	Programas	Imagem da face do cordão	Seção transversal do cordão
13	Vs 30 cm/min A 10 mm f 1,4 Hz Tecimento	V 22 V Va 5 m/min		
14	Vs 30 cm/min A 10 mm f 1,4 Hz Tecimento desalinhado	V 22 V Va 5 m/min		
15	Vs 30 cm/min A 10 mm f 1,4 Hz Tecimento desalinhado	V 22 V Va 5 m/min		
16	Vs 30 cm/min A 10 mm f 1,4 Hz Tecimento desalinhado	V 22 V Va 5 m/min		

17	Vs 30 cm/min A 10 mm f 1,4 Hz Tecimento sincronizado	<b>P1</b> V 19 V Va 4 m/min <b>P2</b> V 22 V Va 5 m/min		
18	Vs 30 cm/min A 10 mm f 1,4 Hz Tecimento sincronizado	<b>P1</b> V 18 V Va 3 m/min <b>P2</b> V 22 V Va 5 m/min		
19	Vs 30 cm/min A 10 mm f 1,4 Hz Tecimento sincronizado	<b>P1</b> V 18 V Va 3,5 m/min <b>P2</b> V 22 V Va 5 m/min		
20	Vs 30 cm/min A 10 mm f 1,4 Hz Tecimento sincronizado	<b>P1</b> V 18 V Va 4 m/min <b>P2</b> V 22 V Va 5 m/min		
21	Vs 30 cm/min A 10 mm f 1,4 Hz Tecimento sincronizado	<b>P1</b> V 19 V Va 3,5 m/min <b>P2</b> V 22 V Va 5 m/min		
22	Vs 30 cm/min A 10 mm f 1,4 Hz Tecimento sincronizado	<b>P1</b> V 18,5 V Va 4 m/min <b>P2</b> V 22 V Va 5 m/min		
23	Vs 30 cm/min A 10 mm f 1,4 Hz Tecimento sincronizado	<b>P1</b> V 18,7 V Va 4 m/min <b>P2</b> V 22 V Va 5 m/min		

24	Vs 30 cm/min A 10 mm f 1,4 Hz Tecimento sincronizado	<b>P1</b> V 18,9 V Va 4 m/min <b>P2</b> V 22 V Va 5 m/min		
25	Vs 30 cm/min A 10 mm f 1,4 Hz Tecimento sincronizado desalinhado	<b>P1</b> V 18,7 V Va 4 m/min <b>P2</b> V 22 V Va 5 m/min		
26	Vs 30 cm/min A 10 mm f 1,4 Hz Tecimento sincronizado desalinhado	<b>P1</b> V 18,7 V Va 4 m/min <b>P2</b> V 22 V Va 5 m/min		
27	Vs 30 cm/min A 10 mm f 1,4 Hz Tecimento sincronizado desalinhado	<b>P1</b> V 18,7 V Va 4 m/min <b>P2</b> V 22 V Va 5 m/min		
28	Vs 30 cm/min A 10 mm f 1,4 Hz Tecimento sincronizado desalinhado	<b>P1</b> V 18,7 V Va 4 m/min <b>P2</b> V 22 V Va 5 m/min		

Fonte: Autora (2019).

Tabela 15 – Avaliação normativa dos ensaios de soldagem com tecimento e tecimento sincronizado.

Ensaio	Convexidade	Largura da face	Perna ch. fina	Perna ch. grossa	Penetração ch. fina	Penetração ch. grossa	Norma	
9	0,529	9,00	7,68	4,56	0,00	2,75	ISO	Falta de penetração
							AWS	-
							NBR	Perna insuficiente
							CSA	Perna insuficiente
Adicional	Penetração insuficiente							
10	0,804	5,40	4,73	4,79	0,58	1,80	ISO	-
							AWS	-
							NBR	-
							CSA	-
Adicional	Assimetria de penetração							
11	0,376	9,87	6,24	7,42	2,70	1,71	ISO	Mordedura excessiva
							AWS	-
							NBR	-
							CSA	-
Adicional	Assimetria de penetração							
12	0,39	9,30	6,53	6,59	2,23	1,26	ISO	-
							AWS	-
							NBR	-
							CSA	-
Adicional	Assimetria de penetração							
13	0,824	8,47	6,35	5,93	1,55	1,09	ISO	Falta de penetração
							AWS	-
							NBR	-
							CSA	-
Adicional	Penetração excessiva							
14	0,274	9,22	5,73	7,30	1,30	1,58	ISO	-
							AWS	-
							NBR	-
							CSA	-
Adicional	-							
15	0,311	10,23	7,44	4,66	1,44	0,07	ISO	Assimetria entre pernas
							AWS	-
							NBR	-
							CSA	-
Adicional	-							
16	0,372	9,89	5,07	8,84	0,82	1,37	ISO	Assimetria entre pernas
							AWS	-
							NBR	Perna insuficiente
							CSA	Perna insuficiente
Adicional	Penetração excessiva							

Ensaio	Convexidade	Largura da face	Perna ch. fina	Perna ch. grossa	Penetração ch. fina	Penetração ch. grossa		Norma
17	0,255	7,933	5,688	5,544	1,806	0,876	ISO	-
							AWS	-
							NBR	-
							CSA	-
							Adicional	Penetração excessiva
18	0,703	8,561	5,139	6,122	0,876	0,742	ISO	Falta de penetração
							AWS	-
							NBR	-
							CSA	-
						Adicional	-	
19	0,459	8,743	6,063	6,158	1,563	1,018	ISO	Mordedura excessiva
							AWS	-
							NBR	-
							CSA	-
						Adicional	Penetração excessiva	
20	0,461	7,844	5,348	5,535	1,56	0,968	ISO	Mordedura excessiva
							AWS	-
							NBR	-
							CSA	-
						Adicional	Penetração insuficiente	
21	0,634	8,616	5,13	5,842	1,608	1,35	ISO	Mordedura excessiva
							AWS	-
							NBR	-
							CSA	-
						Adicional	Penetração excessiva	
22	0,222	7,888	5,895	6,094	1,164	1,065	ISO	Falta de penetração
							AWS	-
							NBR	-
							CSA	-
						Adicional	-	
23	0,583	7,908	5,629	6,325	1,05	1,25	ISO	-
							AWS	-
							NBR	-
							CSA	-
						Adicional	-	

Ensaio	Convexidade	Largura da face	Perna ch. fina	Perna ch. grossa	Penetração ch. fina	Penetração ch. grossa		Norma
24	0,667	8,005	5,623	5,97	1,808	1,04	ISO	-
							AWS	-
							NBR	-
							CSA	-
							Adicional	Penetração excessiva
25	0,304	8,625	6,242	5,829	1,338	0,817	ISO	-
							AWS	-
							NBR	-
							CSA	-
							Adicional	-
26	0,597	8,184	5,467	5,93	1,045	1,334	ISO	-
							AWS	-
							NBR	-
							CSA	-
							Adicional	-
27	0,531	9,257	7,183	5,872	1,73	0,717	ISO	-
							AWS	-
							NBR	-
							CSA	-
							Adicional	Assimetria entre penetrações
28	0,702	8,926	3,617	8,15	0,404	1,388	ISO	Assimetria entre pernas
							AWS	-
							NBR	-
							CSA	-
							Adicional	Assimetria entre penetrações

Fonte: Autora (2019).