

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

LUIZ FELIPE FANTONI

**ESTUDO DA SOLDAGEM SAW COM TECIMENTO TRANSVERSAL
VISANDO APLICAÇÕES DE REVESTIMENTO**

Joinville

2022

LUIZ FELIPE FANTONI

**ESTUDO DA SOLDAGEM SAW COM TECIMENTO TRANSVERSAL
VISANDO APLICAÇÕES DE REVESTIMENTO**

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

2022

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que me deu sabedoria para chegar até aqui e me ajudou a superar as dificuldades ao longo da jornada.

Aos meus pais, Ilson e Regina, e aos meus irmãos, Mateus e Guilherme, por todo o suporte e incentivo diante de minhas decisões até o momento.

A minha namorada, Amanda, por estar sempre presente nos momentos bons e nos difíceis dessa jornada me motivando a seguir em frente.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Tiago Vieira da Cunha, por seus ensinamentos, conselhos, orientações e por acreditar no meu potencial para desenvolver este trabalho.

À Universidade Federal de Santa Catarina e a todos os professores que de alguma forma contribuíram para minha formação com um ensino de qualidade e gratuito.

Ao LTS e toda a sua equipe, por disponibilizarem equipamentos necessários para realização deste trabalho, por proporcionarem um ambiente de desafios e de muito aprendizado e por estarem sempre dispostos a ajudar.

E por fim, agradeço ao CNPq pela oportunidade de trabalhar nesta pesquisa e pelo financiamento da bolsa PIBIC.

“Nossa maior fraqueza é a desistência. O caminho mais certo para o sucesso é sempre tentar apenas uma vez mais.”

Thomas Edison

RESUMO

O processo de soldagem a Arco Submerso ou Submerged Arc Welding (SAW) é muito utilizado na indústria naval por se tratar de um processo com elevadas taxas de deposição. Em pesquisas bibliográficas realizadas na literatura, percebe-se uma carência de estudos sobre o processo SAW aplicado através das técnicas puxando/empurrando e do tecimento transversal, técnicas essas muito difundidas no GMAW e o GTAW. Por este motivo buscou-se no presente trabalho compreender os efeitos das técnicas citadas aplicadas ao processo SAW com o intuito de obter parâmetros e condições adequadas que permitam a realização de soldagem de revestimento através do processo SAW, aproveitando, assim, a elevada taxa de deposição e alta produtividade. Neste contexto, os ensaios de soldagem foram realizados em três etapas, primeiramente avaliando o ângulo de ataque na técnica de soldagem empurrando/puxando para diferentes velocidades de alimentação de arame, na sequência associando a técnica empurrando com a oscilação transversal da tocha em diferentes amplitudes de tecimento e por fim na deposição de cordões adjacentes com o objetivo de realizar o recobrimento de uma dada área a fim de atingir uma aplicação de revestimento. O desenvolvimento deste estudo revelou que a aplicação da técnica de soldagem empurrando apresenta um incremento na largura dos cordões e redução na penetração e reforço, se comparado com a técnica puxando, em concordância com aquilo que se observa em outros processos de soldagem a arco. Ao comparar com a soldagem perpendicular, a técnica empurrando com ângulo de ataque de 70° apresentou uma redução na diluição de 7%. A combinação da técnica empurrando ao tecimento, demonstrou uma redução na penetração de até 14% e de 29% na área penetrada para uma amplitude de 35 mm, enquanto que ao analisar a largura, observou-se uma sobreposição do efeito do tecimento sobre o efeito do ângulo de ataque. Por fim, para as condições experimentais empregadas, a distância entre centros de tocha de soldagem de 30 mm foi a mais adequada para uma eventual aplicação de revestimento pois apresentou um reforço de dimensão homogênea ao longo da seção transversal e menor área penetrada.

Palavras-chave: SAW, Técnicas puxando/empurrando, Tecimento transversal, Morfologia dos cordões, Revestimento.

ABSTRACT

The Submerged Arc Welding (SAW) process is widely used in marine industry because it is a process with high deposition rates, rarely found in other welding processes. During bibliographic research carried out in the literature, it was noticed a lack of studies related to the submerged arc welding process being applied through pulling/pushing and electrode weave techniques, which in other welding processes such as Gas Metal Arc Welding (GMAW) and Gas Tungsten Arc Welding (GTAW), these techniques are very widespread. For this reason, this research seeks to understand the effects of these techniques applied to SAW process in order to achieve adequate parameters and conditions that allow the execution of a coating weld through the SAW process, taking advantage of the high productivity and quality of the process. In this context, welding tests were performed in three stages, first evaluating the angle of attack in the pulling/pushing technique for different wire feed speeds, in sequence associating the pushing technique with the transversal oscillation of the torch in different weaving amplitudes, and finally in the deposition of adjacent weld beads with the objective of covering an area in order to achieve an overlay weld application. The development of this study revealed that the pushing welding technique shows an increase in the width of the beads and a reduction in penetration and reinforcement when compared to the pulling technique, in agreement with what is noted in other arc welding processes. When compared with perpendicular welding, the pushing technique with an angle of 70° presented a reduction of 7% in the dilution. By associating the pushing technique with the electrode weave, it was possible to obtain a reduction in penetration of up to 14% and of 29% in the penetration area for an amplitude of 35 mm, while when analyzing the width, the effect of the electrode weave overlaps the effect of the angle of attack. Finally, for the experimental conditions used, the distance between welding torch centers of 30 mm was the most suitable for the application of the coating as it presented a reinforcement of homogeneous dimension along the cross section and reduced penetration area.

Palavras-chave: Submerged Arc Welding, Pulling/pushing technique, Transverse weave, Weld bead morphology, Overlay weld.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Princípio de funcionamento do arco submerso.....	11
Figura 2 – Técnica de soldagem (a) puxando e (b) empurrando.....	13
Figura 3 - Perfis de temperatura e padrões de fluxo em uma seção longitudinal da soldagem (caso 1).....	14
Figura 4 - Perfis de temperatura e padrões de fluxo em uma seção transversal da soldagem (caso 1).....	14
Figura 5 - Perfis de temperatura e padrões de fluxo em uma seção longitudinal da soldagem (caso 2).....	15
Figura 6 - Perfis de temperatura e padrões de fluxo em uma seção transversal da soldagem (caso 2).....	15
Figura 7 - Seções transversais para soldagem nas condições (a) empurrando, (b) tocha perpendicular e (c) puxando.....	16
Figura 8 - Seções transversais das soldagens empurrando com ângulo de (a) 0°, (b) 15° e (c) 30°.....	17
Figura 9 - Efeito do ângulo de ataque nos parâmetros de qualidade do.....	18
Figura 10 - Superfície e seção transversal dos cordões de solda produzidos com energia de soldagem de 19 kJ/cm e amplitude de tecimento de a) 0 mm - Linear, b) 10 mm, c) 20 mm e d) 30 mm.....	20
Figura 11 - Equacionamento que descreve a relação entre a velocidade de alimentação de arame V_a e amplitude de tecimento.....	21
Figura 12- Largura dos cordões de solda obtidos para amplitudes de tecimento de a) 0 mm, b) 10 mm, c) 20 mm, d) 25 mm, e) 30 mm, f) 35 mm e g) 40 mm.....	22
Figura 13 - Cordões de solda resultantes da variação da frequência de tecimento.....	22
Figura 14 - Perfil de um cordão de solda.....	24
Figura 15 - O revestimento de 5 cordões obtido com o processo SAW-DCEP: (a) Aspecto visual; (b) Macrografia.....	28
Figura 16 - Bancada de ensaios utilizada nos ensaios de soldagem.....	31
Figura 17 - Ressecagem do fluxo em mufla.....	32
Figura 18 - Ângulo de inclinação máximo da tocha de soldagem.....	33
Figura 19 – Ilustração das distâncias entre centros dos cordões utilizadas.....	36
Figura 20 - Posição de onde foram retiradas as amostras.....	37
Figura 21 – Região de interesse da seção transversal do cordão.....	37
Figura 22 - Seções transversais dos cordões de solda resultantes da variação do ângulo de ataque para uma velocidade de alimentação de arame de 1,5 m/min.....	39
Figura 23 - Seções transversais dos cordões de solda resultantes da variação do ângulo de ataque para uma velocidade de alimentação de arame de 3,6 m/min.....	40
Figura 24 - Relação entre a largura dos cordões de solda em função do ângulo de ataque.....	42
Figura 25 - Relação entre a penetração dos cordões de solda em função do ângulo de ataque.....	43
Figura 26 – Relação entre o reforço dos cordões de solda em função do ângulo de ataque.....	44
Figura 27 - Relação entre a diluição dos cordões de solda em função do ângulo de ataque.....	45

Figura 28 - Relação entre a molhabilidade dos cordões de solda em função do ângulo de ataque.	46
Figura 29 - Cordões de solda produzidos com amplitude de tecimento de 10 mm, Va de 1,5 m/min e ângulos de ataque de 90° e 70°.....	47
Figura 30 – Cordões de solda produzidos com amplitude de tecimento de 25 mm, Va de 1,5 m/min e ângulos de ataque de 90° (a) e 70°E (b).	48
Figura 31 - Cordões de solda produzidos com amplitude de tecimento de 25 mm, Va de 3,6 m/min e ângulos de ataque de 90° e 70°.....	49
Figura 32 - Cordões de solda produzidos com amplitude de tecimento de 35 mm, Va de 3,6 m/min e ângulos de ataque de 90° e 70°.....	49
Figura 33 - Largura dos cordões de solda em função do ângulo de ataque para amplitudes de tecimento de 0, 10, 25 e 35mm.	51
Figura 34 – Penetração dos cordões de solda em função do ângulo de ataque para amplitudes de tecimento de 0, 10, 25 e 35mm.	52
Figura 35 – Reforço dos cordões de solda em função do ângulo de ataque para amplitudes de tecimento de 0, 10, 25 e 35mm.	52
Figura 36 – Área penetrada dos cordões de solda em função do ângulo de ataque para amplitudes de tecimento de 0, 10, 25 e 35mm.	53
Figura 37 – Diluição dos cordões de solda em função do ângulo de ataque para amplitudes de tecimento de 0, 10, 25 e 35mm.	54
Figura 38 – Cordões de solda depositados adjacentes resultantes da variação da distância entre os centros dos cordões de a) 35 mm e b) 30 mm.	56
Figura 39 – Seções transversais dos corpos de prova resultantes da variação da distância entre centros dos cordões de a) 35 mm, b) 30 mm.	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Planejamento dos experimentos.	34
Tabela 2 - Matriz de ensaios utilizando a técnica de tecimento associada ao ângulo de ataque.	35
Tabela 3 - Parâmetros fixos utilizados nos ensaios de recobrimento.	35
Tabela 4 - Parâmetros utilizados na realização dos cordões com variação no ângulo de ataque.	41
Tabela 5 - Parâmetros utilizados na realização dos cordões com variação no ângulo de ataque associado ao tecimento.	50

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
2	OBJETIVOS	10
	Objetivos Específicos	10
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	11
3.1	SOLDAGEM A ARCO SUBMERSO	11
3.2	ÂNGULO DE ATAQUE	12
3.3	TECIMENTO NA SOLDAGEM A ARCO SUBMERSO	18
3.4	REVESTIMENTO	23
3.4.1	Revestimento por soldagem a arco	23
3.4.2	Revestimento por soldagem SAW	25
4	METODOLOGIA	30
4.1	BANCADA DE ENSAIOS	30
4.2	ENSAIOS DE SOLDAGEM.....	31
4.2.1	Metodologia dos ensaios de soldagem com variação no ângulo de ataque	32
4.2.2	Metodologia dos ensaios de soldagem utilizando a técnica de tecimento associada ao ângulo de ataque.....	34
4.2.3	Metodologia dos ensaios de soldagem visando a deposição de cordões de solda adjacentes	35
4.3	ANÁLISE MACROESTRUTURAL DOS CORDÕES DE SOLDA.....	36
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	38
5.1	ENSAIOS DE SOLDAGEM COM VARIAÇÃO NO ÂNGULO DE ATAQUE.....	38
5.2	ENSAIOS DE SOLDAGEM COM O TECIMENTO ASSOCIADO AO ÂNGULO DE ATAQUE	46
5.3	ENSAIOS DE SOLDAGEM VISANDO A DEPOSIÇÃO DE CORDÕES DE SOLDA ADJACENTES	55
6	CONCLUSÕES	58
7	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	61
	REFERÊNCIAS	62

1 INTRODUÇÃO

A soldagem é um método de união de chapas metálicas amplamente utilizado em estaleiros navais para a construção de embarcações. Dentre os vários tipos de soldagem se encontra a Soldagem a Arco Submerso, ou Submerged Arc Welding – SAW, que por ser um processo de elevadas correntes e alta penetração permite a união de chapas de grande espessura. Além disso outra característica marcante do processo é a alta taxa de deposição de material resultando numa elevada produtividade. O processo também conta com a presença de um fluxo que envolve o arco elétrico, evitando respingos e retardando o resfriamento do cordão, o que aumenta a eficiência do processo e resulta em um bom acabamento superficial. Devido a essas características o processo de soldagem a arco submerso pode ser adequado para utilização em aplicações de revestimento em chapas de elevadas espessuras, onde se faz necessária elevadas quantidades de calor mesmo para a obtenção de baixos índices de diluição/penetração por causa da elevada dissipação de calor.

Revestimentos por soldagem tem por objetivo a recuperação superficial e ampliação da vida útil de elementos, sejam eles afetados por qualquer tipo de desgaste ou mesmo em peças novas. São comumente utilizados nos setores de geração de energia elétrica, petróleo e gás, metal-mecânica, entre outros. As características geométricas dos revestimentos são fatores essenciais para sua qualidade, e, portanto, devem possuir baixa penetração e diluição, elevada largura, e pequenos ângulos de molhabilidade/pequenos reforços. Contudo, ao utilizar o processo SAW para aplicações de revestimento surge a problemática da alta penetração e consequente alta diluição dificultando seu emprego. Afim de resolver esse problema, busca-se no presente trabalho atuar no ângulo de ataque e associa-lo a técnica de tecimento, que já vem sendo estudada no LTS.

Em processos de soldagem como GMAW as posições do ângulo da tocha de soldagem são alteradas com o objetivo de alterar a penetração e largura do cordão. Estas técnicas são usualmente conhecidas como ‘empurrando/puxando’. Além do ângulo de ataque, diversas técnicas de tecimento também são utilizadas no processo GMAW com intuito de depositar superfícies para revestimento.

Neste contexto, ao fazer o levantamento bibliográfico, foram encontrados poucos estudos da técnica puxando/empurrando aplicada ao processo SAW e nenhum estudo desta técnica associada ao tecimento, o que motivou o desenvolvimento do presente trabalho.

2 OBJETIVOS

O desenvolvimento deste trabalho tem por objetivo geral investigar a aplicação da técnica de tecimento no processo SAW visando aplicações de revestimento.

Objetivos Específicos

Os objetivos específicos que o presente trabalho busca alcançar são:

- Analisar os efeitos de diferentes ângulos de ataque na técnica puxando/empurrando aplicado ao processo SAW com relação aos aspectos morfológicos dos cordões de solda;
- Avaliar os efeitos do tecimento associado ao ângulo de ataque sobre as características morfológicas dos cordões de solda;
- Investigar os efeitos da sobreposição entre cordões de solda depositados de forma adjacentes utilizando a técnica estudada (tecimento + ângulo de ataque) nos aspectos morfológicos dos cordões.

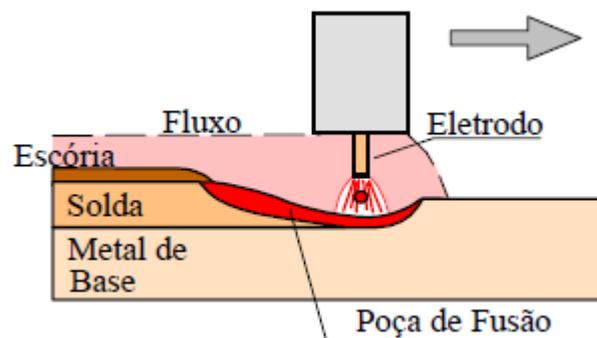
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Esta seção consiste em revisar conceitos teóricos a fim de auxiliar no entendimento desta pesquisa. Serão apresentados conteúdos referentes ao processo de soldagem SAW, ao ângulo de ataque aplicado em processos de soldagem, ao tecimento na soldagem SAW e, por fim, ao revestimento aplicado através da soldagem.

3.1 SOLDAGEM A ARCO SUBMERSO

A soldagem a arco submerso é um processo em que a união por fusão entre metais é obtida através de um arco elétrico estabelecido entre a ponta do eletrodo e o metal base, conforme demonstra a Figura 1. Durante a soldagem, o arco permanece coberto por uma camada de fluxo (material granulado) que tem a função de evitar respingos e proteger o arco e a poça de fusão da contaminação atmosférica (MODENESI; MARQUES; BRACARENSE, 2005). Esse fluxo é fundido formando uma camada sólida de escória que age como um isolante térmico reduzindo a velocidade de resfriamento do cordão e garantindo uma excelente concentração de calor no processo.

Figura 1 - Princípio de funcionamento do arco submerso



Fonte: Modenesi (2005, p. 263).

A adição de metal é obtida através de arame maciço, tubular ou fita que possui sua alimentação por um dispositivo mecânico que pode ser operado de forma mecanizada ou semimecanizada. Isso permite um alto grau de automatização, conferindo a esse tipo de processo rapidez e economia, quando comparado aos demais processos de soldagem com arco

elétrico (WAINER, 1992). Outra característica do processo SAW é o seu elevado rendimento, que por sua vez pode alcançar valores próximos a 100% justificado pela ausência de respingos e baixa perda de calor para o meio. Além disso, este processo é empregado na união de chapas de grandes espessuras, pois utiliza eletrodos de grande diâmetro, normalmente entre 2,4 mm e 6 mm, que permitem a soldagem com correntes de 300 A até 1600 A (MODENESI; MARQUES; BRACARENSE, 2005). Essa alta densidade de corrente promove elevado calor imposto e resulta na elevada taxa de fusão e deposição de material o que justifica sua alta produtividade.

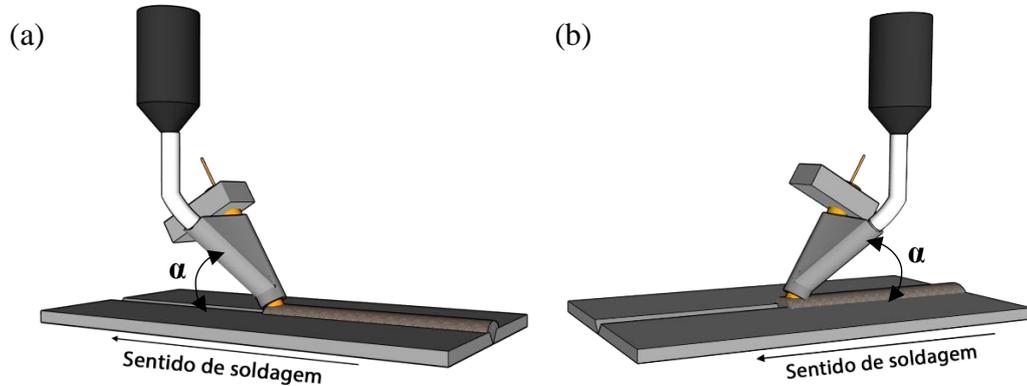
Com o intuito de elevar ainda mais a produtividade do processo várias técnicas e configurações de tocha foram desenvolvidas pela indústria. Dentre as diversas técnicas podemos citar a *twin-wire*, que utiliza dois arames paralelos em uma única fonte de energia, a *tandem*, que são arames paralelos conectados a fontes individuais, *cold wire* e *hot wire*, que correspondem à adição de arame adicional frio e arame adicional quente, respectivamente, direto na poça de fusão. Outra importante técnica é a soldagem com fita, utilizado no processo SAW em aplicações de revestimento, contudo, sua utilização não é trivial já que necessita de um cabeçote especial devido à geometria do material de adição e a alimentação do fluxo não ocorrer da mesma forma que no processo SAW comum.

Neste contexto, seria interessante se através do processo SAW fosse possível realizar a deposição de cordões adjacentes com certa sobreposição entre si, caracterizando uma eventual aplicação de revestimento. Para isso, seria necessário encontrar uma forma de reduzir a área penetrada e, conseqüentemente a diluição, e aumentar a largura a fim de atingir cordões adequados para tal aplicação. Uma possível abordagem seria atuar no ângulo de ataque da tocha de soldagem no processo SAW utilizando a técnica empurrando/puxando e ainda a associar ao tecimento afim de atingir as características necessárias para o revestimento.

3.2 ÂNGULO DE ATAQUE

O ângulo de ataque (α) diz respeito ao ângulo formado pelo arame e o cordão de solda num plano perpendicular à chapa. A tocha pode ser posicionada de três formas em relação a esse ângulo: empurrando ($\alpha < 90^\circ$), perpendicular ($\alpha = 90^\circ$) e puxando ($\alpha > 90^\circ$), a depender do sentido da soldagem. O que determina a seleção da técnica de soldagem puxando ou empurrando, são os resultados que se almejam ser atingidos na geometria do cordão, e o tipo de junta a ser soldada. A Figura 2 ilustra as técnicas de soldagem puxando e empurrando.

Figura 2 – Técnica de soldagem (a) puxando e (b) empurrando

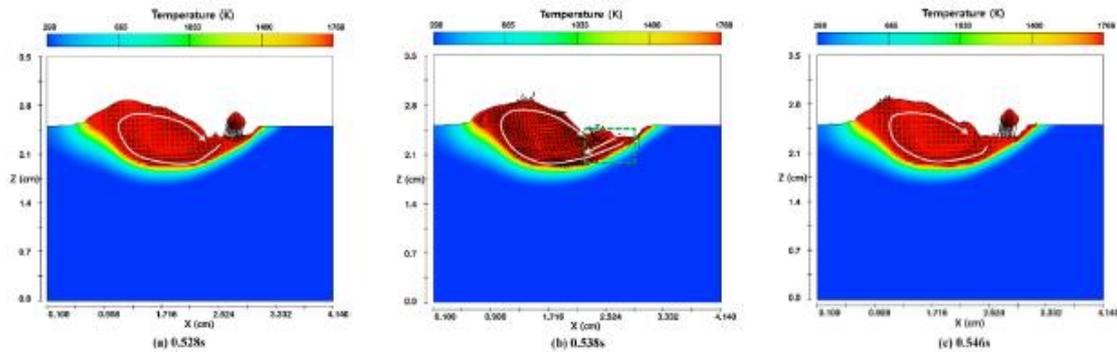


Fonte: Autor (2022).

Em pesquisa realizada na literatura sobre trabalhos que investigam o ângulo de ataque aplicado ao processo SAW, encontrou-se apenas um trabalho que analisa, de forma computacional, os efeitos da aplicação da técnica puxando/empurrando na morfologia do cordão de solda. Neste contexto, Cho et al. (2013) analisaram a influência do ângulo de ataque no processo SAW através da simulação computacional de fluidos dinâmicos 3D. Para aplicar a simulação CFD foi preciso obter as imagens do arco voltaico através de uma câmera com sensor CCD (charged-coupled device) para posteriormente aplicar o método de inversão Abel. Com esse método foi possível obter o fluxo de calor proveniente do arco voltaico, assim como forças eletromagnéticas e pressão do arco. Para avaliar o comportamento da poça fundida a análise consistiu em alterar o ângulo entre a perpendicular e a tocha de soldagem para -20° (caso 1) e $+20^\circ$ (caso 2) operando com os seguintes parâmetros de soldagem, 1000 A de corrente, 32 V de tensão e velocidade de arame de 2,24 m/min.

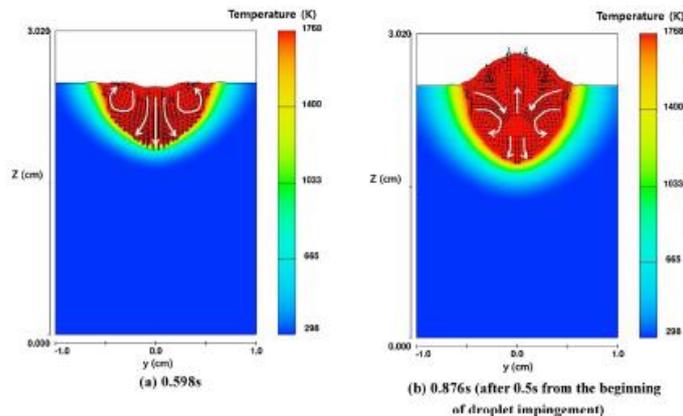
No caso 1, técnica de soldagem puxando, a direção das gotas de metal fundido oriundas do eletrodo incidentes sobre a chapa é análoga à circulação de metal líquido existente na poça de fusão, fazendo com que o momento seja transferido para o cordão. Na Figura 3 é possível observar essa equivalência de sentido do fluxo de metal fundido na poça de fusão e da gota oriunda do eletrodo formando uma grande circulação na seção longitudinal do cordão. Dessa forma verifica-se que esse padrão de fluxo do metal líquido na poça de fusão implica em uma penetração profunda e estreita como mostra a Figura 4. Observa-se ainda, na Figura 4 que o metal fundido continua a penetrar na poça depois de 0,5 segundos da incidência das gotas.

Figura 3 - Perfis de temperatura e padrões de fluxo em uma seção longitudinal da soldagem
(caso 1)



Fonte: CHO et al. (2013).

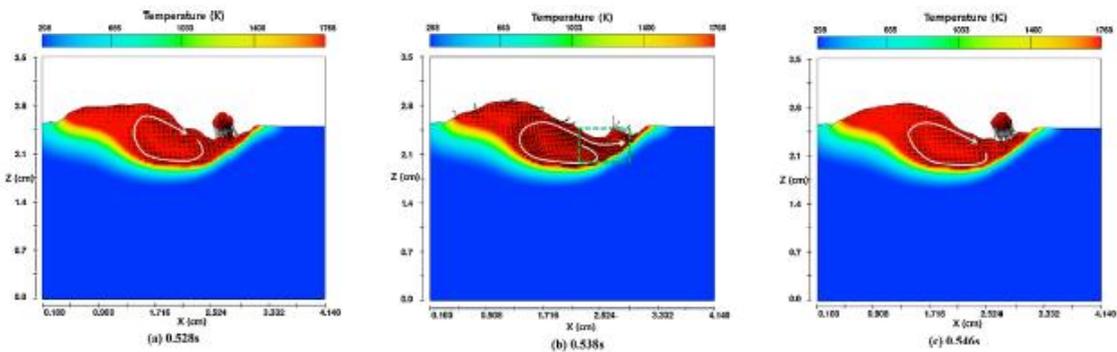
Figura 4 - Perfis de temperatura e padrões de fluxo em uma seção transversal da soldagem
(caso 1)



Fonte: CHO et al. (2013).

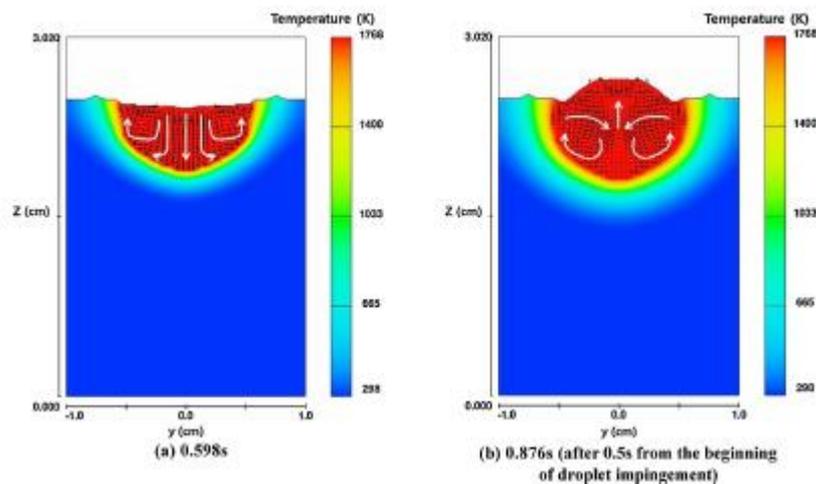
Já no caso 2, técnica de soldagem empurrando, a direção da gota de metal fundido incidente não é análoga à circulação do metal líquido na poça de fusão fazendo com que a poça se desloque para frente como mostra a Figura 5. Com esse padrão de fluxo do metal fundido, existe uma alteração do comportamento da poça de fusão, resultando em um espalhamento da poça na direção longitudinal do cordão. Logo a técnica empurrando leva a uma penetração mais rasa que o caso 1 como mostra a Figura 6.

Figura 5 - Perfis de temperatura e padrões de fluxo em uma seção longitudinal da soldagem
(caso 2)



Fonte: CHO et al. (2013).

Figura 6 - Perfis de temperatura e padrões de fluxo em uma seção transversal da soldagem
(caso 2)



Fonte: CHO et al. (2013).

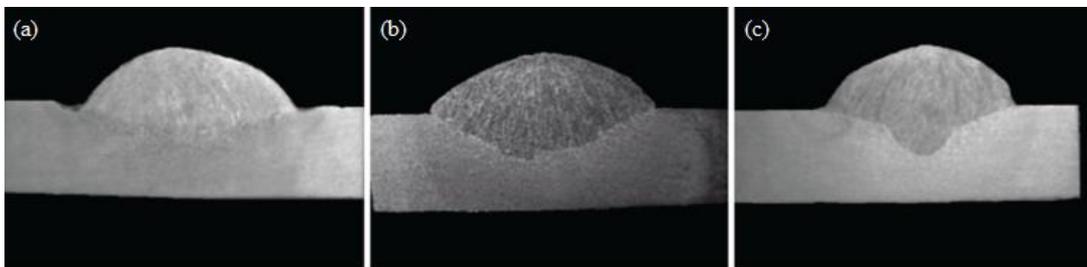
O ângulo de ataque aplicado ao processo SAW é um tema pouco explorado. Entretanto, nos processos GMAW e arame tubular (FCAW) a técnica puxando/empurrando é comumente aplicada. Por serem processos semelhantes ao SAW que utilizam eletrodo consumível e alimentação de eletrodo de forma mecanizada, prossegue-se com a revisão teórica com esses processos a fim de compreender o que se deve esperar de um cordão de solda no processo SAW realizado com as técnicas puxando/empurrando.

Resende e Scotti (2015) avaliaram a influência do ângulo de inclinação da tocha sobre a geometria do cordão de solda usando o processo de “Plasma-MIG” com arcos concêntricos. Foram realizadas soldagens de simples deposição sobre chapa (“*bead-on-plate*”) com o uso de um arame eletrodo de aço ao carbono da classe AWS ER70S-6, de 1,2 mm de diâmetro, e as

inclinações da tocha com o plano vertical foram variadas de 0° , 15° puxando e 15° empurrando. Após a execução das soldagens, estes verificaram que no sentido de soldagem empurrando, foram produzidos cordões com maior largura, invertendo a tendência com a tocha puxando. Considerando que a energia do arco foi a mesma, acredita-se que isto acontece devido ao pré-aquecimento que o arco provoca à frente da poça fundida na técnica empurrando, aumentando a molhabilidade e favorecendo o aumento da largura do cordão. Já o reforço apresenta um comportamento oposto ao verificado na largura uma vez que todos os cordões de solda possuem o mesmo volume e estes dois parâmetros geométricos são regidos pelos mesmos mecanismos. As características geométricas dos cordões comentadas podem ser observadas na Figura 7. (RESENDE; SCOTTI, 2015).

Com relação à penetração os autores observaram um aumento à medida que a tocha passa de empurrando para puxando. Este efeito pode ser justificado pelo fato de o jato de plasma empurrar a poça fundida para trás no modo puxando, de tal forma que o aquecimento da chapa pelo acoplamento do arco com a peça se torna mais eficiente, agindo mais no fundo da poça.

Figura 7 - Seções transversais para soldagem nas condições (a) empurrando, (b) tocha perpendicular e (c) puxando



Fonte: Resende e Scotti (2015).

Outro estudo realizado por Lopes et al. (2017) avaliou o efeito do ângulo da tocha na penetração do cordão com transferência metálica goticular com arame ER70S-6 de diâmetro 0,8 mm no processo de soldagem GMAW. Os parâmetros fixos utilizados foram, tensão de 34 V, corrente de 220 A e velocidade de soldagem de 56 cm/min. Já para o ângulo da tocha com relação a perpendicular foram realizados ensaios de 0° , 15° , 30° utilizando a técnica empurrando. Com a realização dos ensaios Lopes et al. (2017) constataram uma tendência de aumento da largura e diminuição da área de penetração dos cordões com o aumento do ângulo de inclinação da tocha de soldagem como pode ser observado na Figura 8.

Figura 8 - Seções transversais das soldagens empurrando com ângulo de (a) 0°, (b) 15° e (c) 30°.



Fonte: Adaptado de Lopes et al. (2017).

Além de analisar a largura e penetração, Lopes et al. (2017) avaliaram os valores de diluição na seção transversal do cordão de solda e constataram uma tendência de queda no percentual de diluição do cordão com o aumento do ângulo da tocha de soldagem, comportamento esse associado à redução da área de penetração do cordão.

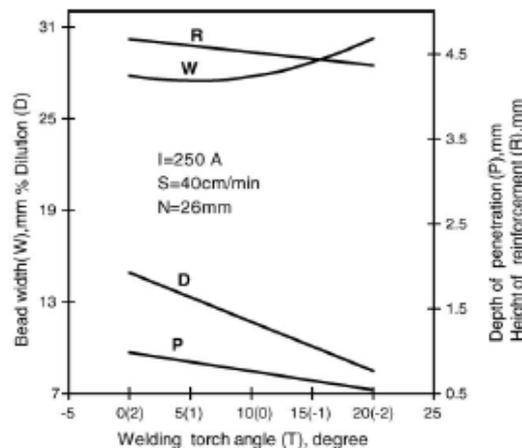
Pal K. e Pal S. (2010) também analisaram os efeitos do ângulo de ataque na soldagem. O estudo foi realizado através da soldagem MIG pulsado em juntas de topo de aço baixo carbono para ângulos de tocha de 0° (perpendicular), 25° (empurrando) e -25° (puxando), focando na geometria e propriedades mecânicas do cordão de solda. Com relação à penetração e a zona termicamente afetada verifica-se uma redução da soldagem puxando para empurrando devido à falta de pré-aquecimento na soldagem empurrando. As dimensões de largura foram menores nos ensaios perpendiculares comparadas com empurrando e puxando, que juntamente com a penetração completa e redução da dureza resultaram numa maior resistência da solda nos cordões soldados na posição perpendicular.

Um estudo realizado por Kannan e Murugan (2006) sobre o efeito dos parâmetros corrente de soldagem, velocidade de soldagem, distância bocal-peça e ângulo de ataque na soldagem com arame tubular (FCAW) em aço inoxidável, concluiu que o aumento no ângulo de ataque na técnica empurrando resulta numa redução na diluição, altura do reforço e penetração e um aumento na largura do cordão como mostra a Figura 9.

Outra explicação para os resultados obtidos da técnica puxando/empurrando foi dada por Hirata (2014) ao explicar que ao se inclinar a tocha no sentido de se fazer uma soldagem puxando, um efeito mecânico atuante tiraria a poça de fusão que se encontra entre o material de base e o arco. Assim, o calor do arco seria transferido com maior efetividade para o material base (maior rendimento bruto de fusão seria esperado). Se a poça de fusão estiver entre o arco e o material de base, haverá mais dificuldade de o calor ser transferido para o metal não fundido

gerando apenas o sobreaquecimento (menor rendimento de fusão). Este seria o caso de se soldar no modo empurrando.

Figura 9 - Efeito do ângulo de ataque nos parâmetros de qualidade do revestimento.



Fonte: Kannan e Murugan (2006).

Como pode-se perceber o conhecimento apresentado pelos autores relacionados à mesma técnica de soldagem (puxando/empurrando) estão em concordância, já que os resultados obtidos foram semelhantes.

3.3 TECIMENTO NA SOLDAGEM A ARCO SUBMERSO

Da mesma forma que a técnica puxando/empurrando, a técnica de oscilação transversal do arco também é muito difundida no processo de soldagem GMAW, no entanto, com relação à aplicação no processo SAW essa técnica é bastante restrita. Encontram-se na literatura recente apenas dois trabalhos (do grupo de pesquisa no qual o presente autor faz parte) que estudam a aplicação dessa técnica no processo SAW.

Por ser uma técnica comumente utilizada na soldagem GMAW, são encontrados vários estudos a respeito dessa aplicação. Resultados importantes obtidos dizem respeito à diluição e zona termicamente afetada (ZTA) da soldagem. Neste contexto, Tassalloti e Martikanem (2013) e Siewert et al (1986) relatam uma diminuição da diluição quando aplicado à técnica de tecimento, podendo favorecer o uso dessa técnica em aplicações de revestimento. Além disso, Tassalloti e Martikanem (2013) expõem uma melhor distribuição de dureza entre metal de base,

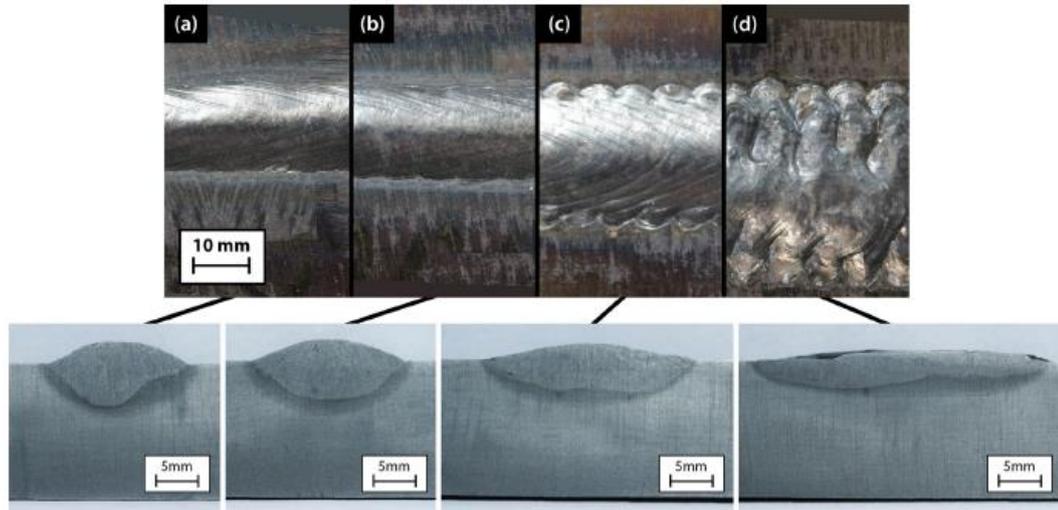
ZTA e metal de solda, indicando dessa forma uma possível homogeneidade do cordão de solda com a aplicação do tecimento.

Ao se aplicar a técnica de tecimento, podem ser aplicados diferentes padrões de trajetória como, por exemplo, triangular, senoidal e circular. Guzman-Flores et al. (2017) utilizaram o processo de soldagem GMAW mecanizado e analisaram os diferentes padrões mencionados selecionando o cordão de solda resultante do movimento triangular como o de melhor qualidade haja vista um menor comprimento da ZTA, melhores valores de reforço, alongamento dos grãos na solda e formação de ferrita de grão grosseiro na ZTA. Logo, os autores recomendam a aplicação da técnica de tecimento com a trajetória triangular.

Uma investigação sobre os efeitos da oscilação transversal do arco no processo GMAW foi realizada por Lara et al. (2020) no qual apresentam como principais resultados a redução do reforço, molhabilidade e penetração, a partir dessa técnica.

Haja vista a escassez de estudos relacionados ao emprego do tecimento no arco submerso, uma pesquisa desenvolvida no Laboratório de Tecnologia da Soldagem (LTS) realizada por Cunha e Ribeiro (2018) analisou a morfologia dos cordões e viabilidade operacional desse tipo de soldagem. Os ensaios de soldagem foram realizados através da simples deposição sobre chapas de aço-carbono ASTM A36 aplicando amplitudes de tecimento 0 (linear), 10, 20 e 30 mm e energias de soldagem de 15, 19 e 25 kJ/cm com frequência de tecimento de 1 Hz. Como podemos perceber a partir da Figura 10 os cordões realizados com amplitude de tecimento de 30 mm apresentaram mordeduras e carência de material de adição devido ao fato de a área fundida aumentar com a amplitude e o aporte de material empregado para cada energia de soldagem ser constante.

Figura 10 - Superfície e secção transversal dos cordões de solda produzidos com energia de soldagem de 19 kJ/cm e amplitude de tecimento de a) 0 mm - Linear, b) 10 mm, c) 20 mm e d) 30 mm



Fonte: Cunha e Ribeiro (2018).

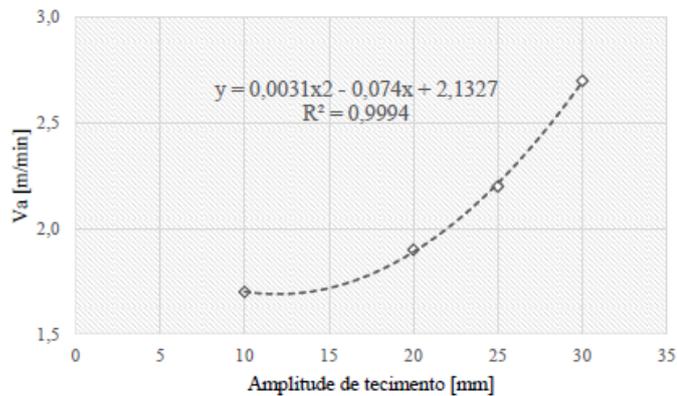
Cunha e Ribeiro (2018) obtiveram um aumento de até 78% na área fundida com amplitude de tecimento de 20 mm em relação àquelas obtidas sem tecimento para uma mesma energia de soldagem. Esse aumento resulta em um maior rendimento de fusão do processo que, por sua vez, implica em maiores valores de diluição. Portanto, houve um aumento na diluição dos cordões conforme a amplitude de tecimento aumentou, contudo em análise mais detalhada verifica-se que este aumento é decorrente da uniformidade do perfil de penetração e à maior largura do cordão e não pelo aumento da penetração. Ainda, para valores de amplitude de tecimento de 20 mm a diluição estabilizou em valores de cerca de 70%, patamar esse que possibilita ganhos de produtividade, mas ainda muito alto para aplicações de revestimento.

Além dos aspectos morfológicos e de produtividade Cunha e Ribeiro (2018) avaliaram que a técnica de tecimento aplicada ao arco submerso é perfeitamente viável já que o movimento oscilatório da tocha não comprometeu a estabilidade do processo e ainda, não foram encontrados problemas relacionados à inclusão e retenção de escória.

Com intuito de aprofundar os conhecimentos nessa técnica de soldagem, Rode (2020) desenvolveu uma pesquisa também no LTS a respeito da aplicação da técnica de tecimento transversal no processo SAW. Os ensaios de soldagem iniciaram com o objetivo de atingir amplitudes de tecimento de até 40 mm, a DBCP foi mantida fixa em 25 mm, velocidade de soldagem em 30 cm/min, frequência de tecimento em 1 Hz e tensão de soldagem em 30 V. Foi

encontrado então, de forma experimental, a velocidade de alimentação do arame mínima para se fazer um cordão com geometria superficial adequada, posteriormente foi realizado o mesmo procedimento para as amplitudes de tecimento de 10, 20, 30 e 40 mm. A partir dos valores de velocidade de alimentação do arame mínimos os ensaios prosseguiram com a variação da frequência de 0,6 a 1,6 Hz e amplitude de tecimento de até 30 mm, isso porque acima desta amplitude a velocidade de alimentação de arame exigida implicaria em uma corrente de soldagem superior à corrente suportada pela fonte de soldagem. De acordo com Rode (2020) a caracterização da relação entre a velocidade de alimentação do arame e a amplitude de tecimento representa um comportamento quadrático como pode ser observado na Figura 11. Logo, tem-se a disponibilidade de definir previamente a velocidade de alimentação do arame necessária (ou a quantidade de material) para diferentes amplitudes de tecimento afim de produzir cordões de solda adequados.

Figura 11 - Equacionamento que descreve a relação entre a velocidade de alimentação de arame V_a e amplitude de tecimento.

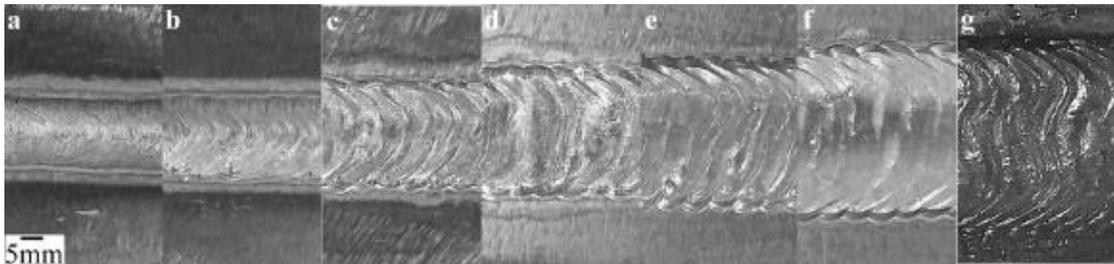


Fonte: Rode (2020).

Em se tratando das características geométricas dos cordões, foi observado um aumento linear da largura dos cordões em função das amplitudes de tecimento (Figura 12), logo para as condições de valores mínimos de taxa de deposição, pode-se estimar a largura real do cordão sendo útil no projeto de juntas. Com relação ao reforço, houve um decréscimo a partir do cordão linear até o de amplitude de 25 mm, aumentando nas amplitudes posteriores. Rode (2020) analisa ainda a razão R/L e obtém valores inferiores a 10% em cerca de 70% dos cordões, o que possibilita uma possível aplicação em soldagem de revestimento, contudo, ao avaliar a diluição

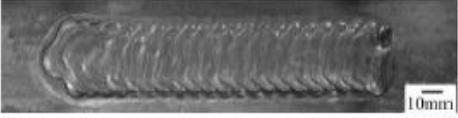
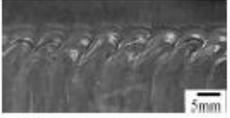
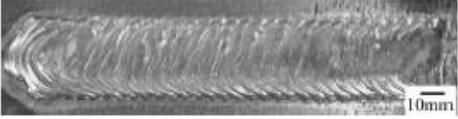
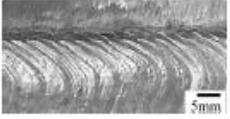
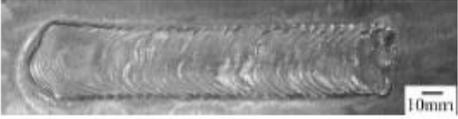
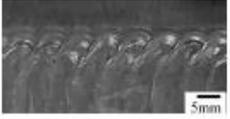
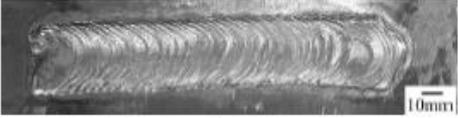
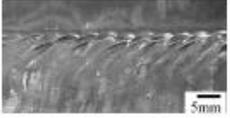
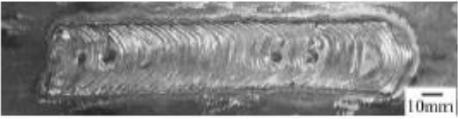
obteve valores relativamente altos de 45% a 65% o que inviabiliza a aplicação em revestimento. Além disso, foi observado um ganho na área fundida de 340% ao comparar um cordão de solda produzido em amplitude de 40 mm e um cordão de solda linear. Vale ressaltar também que não foram encontradas inclusão de escória ou instabilidades de tensão e corrente no processo.

Figura 12- Largura dos cordões de solda obtidos para amplitudes de tecimento de a) 0 mm, b) 10 mm, c) 20 mm, d) 25 mm, e) 30 mm, f) 35 mm e g) 40 mm.



Fonte: Rode (2020).

Figura 13 - Cordões de solda resultantes da variação da frequência de tecimento

Frequência de tecimento [Hz]	Cordões de solda	Margem do cordão de solda
0,6		
0,8		
1,0		
1,2		
1,4		
1,6		

Fonte: Rode (2020).

Com respeito aos ensaios com variação da frequência de tecimento percebe-se, de acordo com a Figura 13, uma alteração na distribuição superficial do material o que diminui o efeito escamado sobre o cordão ao aumentar a frequência de tecimento. Além disso para a frequência de 1,6 Hz nota-se uma falta de deposição de material na região central do cordão indicando, dessa forma, um limite operacional de 1,4 Hz para as condições de soldagem apresentadas pelo autor. Segundo Rode (2020) o aumento da frequência de tecimento implica ainda numa diminuição dos valores de penetração, largura e área fundida do cordão solda.

Apesar dos valores de diluição encontrados por Rode (2020) serem relativamente elevados para o revestimento, ainda há espaço para a redução desses valores, no qual, alinhado com as amplitudes de até 40 mm e a redução da área fundida no aumento da frequência de tecimento, motivam um estudo mais aprofundado da possível aplicação da técnica de tecimento em soldagens de revestimento.

3.4 REVESTIMENTO

Nesta seção serão apresentados alguns trabalhos encontrados na literatura que estudam o revestimento aplicado através de soldagem.

3.4.1 Revestimento por soldagem a arco

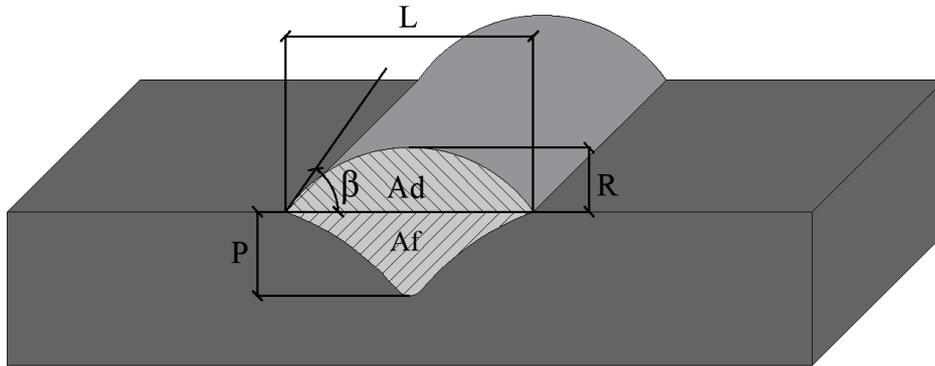
A soldagem de revestimento tem sua definição pela AWS como sendo a deposição de uma camada de metal de adição sobre a superfície de outro metal com o objetivo de obter propriedades ou dimensões desejadas (PHILLIPS, 1965b). Deste modo, é uma técnica muito utilizada para ampliação da vida útil de peças, recuperação de elementos afetados por desgaste ou corrosão e criação de superfícies com características especiais.

Ao se executar uma soldagem de revestimento desejam-se cordões de solda com baixa penetração, elevado reforço e grandes larguras a fim de preencher a maior área possível da superfície em um menor número de passes de soldagem. Outra relação importante a ser analisada é a razão Reforço/Largura. Quanto menor o valor de R/L mais largo e baixo será o cordão de solda, logo o preenchimento da área se tornará mais eficiente. (SCHAEFFER, 2017).

Dentre as características geométricas de um cordão de solda encontra-se também a diluição, que expressa a porcentagem do metal de base que participa da zona fundida regida

pela equação (1). A Figura 14 apresenta de forma visual as dimensões do cordão de solda, utilizadas no cálculo da diluição.

Figura 14 - Perfil de um cordão de solda



Fonte: Autor (2020).

Onde:

L = Largura média (mm);

P = Penetração (mm);

R = Reforço (mm);

β = Ângulo de molhabilidade ($^{\circ}$);

Sendo:

$$D = \left(\frac{A_p}{A_p + A_d} \right) \times 100 \quad (1)$$

Onde:

D = Diluição (%);

A_p = Área penetrada (mm²);

A_d = Área depositada média (mm²);

Segundo a norma ISO 10423, adotada pela Petrobras, valores de diluição entre 5% e 8% são considerados ideais na superfície do revestimento em equipamentos metálicos para proteção corrosiva. Pesquisas realizadas sugerem ainda que uma diluição muito abaixo de 5% promove o arrancamento do revestimento, por outro lado se a diluição passar de valores de aproximadamente 14% acaba comprometendo a resistência à corrosão para determinadas aplicações (ABIOYE; ALTOÉ, 2015).

Outra variável que deve ser analisada em uma soldagem de revestimento é a molhabilidade dos cordões que pode ser avaliada através do ângulo de molhabilidade ou de contato (β) formado entre a superfície sólida e o plano tangencial à superfície do cordão depositado. Se $\beta < 90^\circ$, o líquido tem tendência a molhar a superfície, por outro lado, se $\beta > 90^\circ$ o líquido não tende a molhar a superfície do material podendo ocasionar porosidade e falta de fusão em soldagens multipasse (SANTOS, 2003). Portanto quanto menor o ângulo β melhor a deposição do cordão adjacente e menor a possibilidade de defeitos.

3.4.2 Revestimento por soldagem SAW

Aplicações de revestimento utilizando o processo de soldagem SAW são usualmente encontradas em soldagens com fita. Segundo Kuo et al. (2007) a soldagem com fita promove uma ligação metalúrgica muito forte entre o revestimento e o metal de base. Entretanto, quando esse tipo de soldagem é aplicado a altas temperaturas, as superfícies de revestimento sofrem fissuras e deterioração devido aos ciclos térmicos, resultando em perdas de material. Por esse motivo tratamentos térmicos são aplicados nos metais após a soldagem afim de prolongar sua vida útil.

Um estudo realizado por Kuo et al. (2007) analisou o efeito do tratamento térmico pós-soldagem na resistência à fadiga térmica numa soldagem SAW com fita de aço inoxidável. O tratamento térmico consistiu em aquecer os cordões a temperaturas de 625, 650 e 675 °C por 2 horas e resfriar gradualmente dentro do forno até a temperatura ambiente. As soldagens foram realizadas em chapas de aço carbono em três passes e posteriormente testes de fadiga e dureza foram realizados. Os resultados mostraram que ao aumentar a temperatura de tratamento térmico pós-soldagem a dureza diminuiu enquanto a resistência de fadiga térmica aumentou, comprovando a eficácia da aplicação dos tratamentos térmicos pós soldagem.

Afim de compreender a influência da direção do campo magnético nas características do cordão de solda realizado por soldagem a arco submerso com fita, Mallya e Srinivas (1993) utilizaram eletrodos de aço inoxidável com 60 mm de largura submetidos a condições de campos magnéticos dirigidos na direção longitudinal do cordão permitindo realizar a oscilação do arco voltaico em toda a largura do cordão. A densidade de fluxo do campo magnético utilizado foi de 40, 60, 80 e 100 Gauss em tempos de permanência na densidade máxima 90, 120, 180 e 240 ms. Os resultados mostraram que foi possível aumentar em 40% a densidade de corrente sem que as características do cordão sejam prejudicadas, aumentando dessa forma a

quantidade de material depositado. Além disso, utilizando configuração de eletrodo positivo e com a oscilação do arco voltaico na direção da largura do cordão obtiveram uma redução de 20% na penetração e 23% na diluição, favorecendo as aplicações de revestimento. Já o aumento no tempo de permanência na densidade máxima de fluxo não apresentou mudanças significativas nos cordões de solda.

Pelo fato de a soldagem com fita possuir questões operacionais limitadas devido ao seu cabeçote especial, distribuição do fluxo e problemas na integridade do revestimento, sua aplicação não é trivial. Em vista disso, buscaram-se estudos a respeito de revestimentos realizados por soldagem SAW a fim de compreender os parâmetros utilizados e resultados encontrados.

Batista (2011) investigou a influência dos parâmetros de soldagem sobre as características de revestimentos de liga níquel aplicados pelo processo SAW em tubos de aço de especificação API 5L Gr B com espessura de 18 mm e diâmetro interno de 290 mm. O arame eletrodo utilizado foi a liga de níquel (Ni-Cr-Mo-4) com diâmetro de 1,14 mm. Nos ensaios de soldagem foram realizados primeiramente cordões isolados (individuais) e posteriormente cordões adjacentes em forma de revestimentos planos e circunferenciais com três passes de solda sendo aplicadas as modalidades de corrente pulsada e corrente convencional (contínua). Os depósitos foram realizados na posição plana, com a técnica empurrando, com inclinação de 15° com a vertical.

Ao realizar os ensaios de soldagem Batista (2011) notou que a diluição é inversamente proporcional à razão R/L, dificultando a obtenção de baixos valores de diluição associados a baixos valores de R/L, logo foi buscado o resultado mais satisfatório para uma aplicação de revestimento. Para os cordões isolados na modalidade de corrente pulsada, foram obtidos valores de diluição de 3,6% a 22,26% e valores de R/L de 0,23 a 0,67, sendo o resultado mais favorável de 12,76% para diluição e 0,28 para R/L. Para os cordões isolados realizados em corrente convencional, os valores de diluição variaram entre 9,62% e 23,19%, com R/L variando de 0,21 a 0,60, sendo o resultado mais satisfatório de 11,81% de diluição e 0,28 de R/L.

Com relação aos revestimentos realizados com três passes de soldagem no interior do tubo, foi notado que o revestimento aplicado com corrente pulsada apresentou valores de diluição média em torno de 20% enquanto que o revestimento soldado com corrente convencional apresentou valores de diluição próximos a 13%. Em termos de largura, foi observado que a amostra soldada através da corrente convencional apresentou uma maior largura quando comparada aos cordões soldados com corrente pulsada, resultado este de maior

interesse para a soldagem de revestimento. Já para os valores de altura do revestimento, a corrente convencional apresenta-se como uma opção mais favorável para aplicações de revestimento pois apresentou uma maior altura (BATISTA, 2011).

Um estudo exploratório desenvolvido por Romcy (2017) analisou os efeitos das variáveis de soldagem no processo SAW em depósitos de revestimento duro. As soldagens foram realizadas em corpos de prova ASTM A36 com arame-eletrodo de acordo com AWS SFA-5.17 EL12 de 3,2mm de bitola. Foi utilizado um fluxo ligado de classificação DIN 8555/UP-1-GW-350. As variáveis analisadas na soldagem foram corrente alternada, tensão e parâmetros de intensidade e tempo de corrente em determinada polaridade (offset e balanço).

Nos ensaios foram utilizados valores de tensão de arco de 30 V e 45 V dividindo dessa forma os ensaios em condições de maior e menor energia de soldagem. A fim de identificar o valor de DBCP, ensaios com corrente contínua e polaridade positiva foram realizados e como resultado a DBCP de 40 mm foi a mais adequada já que com alturas superiores o cordão apresentou porosidade, comprometendo a qualidade superficial do cordão. (ROMCY, 2017). Já a velocidade de soldagem empregada foi de 22 cm/min, enquanto que valores de offset e balanço variaram de acordo com método estatístico de fatorial completo. Os resultados mostraram que o offset foi o fator que mais influenciou a porosidade superficial e o balanço causou maior variação no reforço. Para menores valores de *balanço* e *offset* (25% e +/- 25%, respectivamente), o reforço tende a aumentar favorecendo aplicações de revestimento duro, contudo, valores altos de reforços tendem a aumentar o ângulo de molhamento podendo comprometer o desempenho do revestimento. Além disso a variação dos valores de *balanço* e *offset* não alterou a energia de soldagem (ROMCY, 2017).

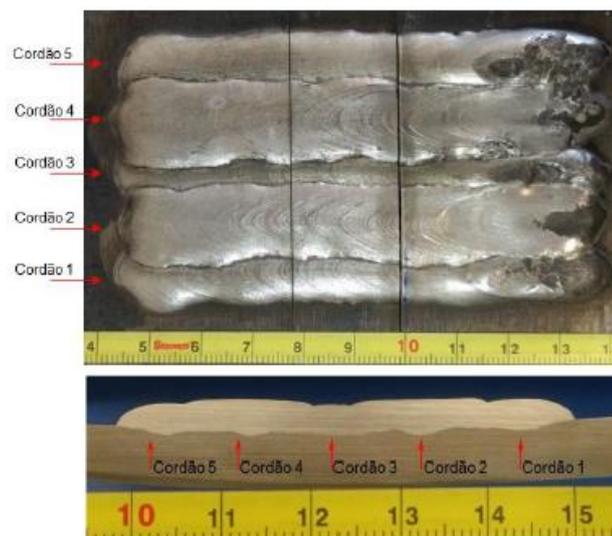
O autor analisa ainda as microestruturas das zonas fundidas. Nas amostras de maior energia de soldagem, ou seja, tensão do arco de 45V, foram encontradas bainita, martensita e ferrita de Widmanstätten. Enquanto que nas amostras de menor energia (tensão do arco de 30V) de soldagem foram identificadas ferrita acicular, ferrita de Widmanstätten, ferrita de contorno de grão e martensita. Com relação a microdureza na zona fundida, o aumento de 50% da tensão, provocou um aumento de 87,5% da microdureza (ROMCY, 2017).

Outra soldagem de revestimento com arco submerso foi estudada por Schaeffer (2017) operando com polaridade positiva no modo tensão constante, os revestimentos foram depositados em superfícies de aço 1010 com arame inconel 625 de diâmetro 1,14 mm e fluxo ESAB 10.93. Num primeiro momento foram produzidos cordões lineares para adequar os parâmetros de soldagem com o objetivo de produzir cordões livres de discontinuidades. Foi observado nessa fase elevados valores de penetração, diluição e razão R/L, portanto como

estratégia de soldagem, a peça foi inclinada afim de reduzir esses valores. Schaeffer (2017) notou que para inclinações da peça acima de 15° o fluxo desliza sobre o metal de base inviabilizando a soldagem e abaixo de 5° não produzem o efeito desejado na poça de fusão. A condição de inclinação que obteve o melhor resultado foi de 10° na posição ascendente empurrando e os parâmetros utilizados para as posteriores aplicações de revestimento foram tensão de 40 V, velocidade de arame de 14 m/min, DBCP de 35 mm e velocidade de soldagem de 36 cm/min. A partir dessa configuração foi encontrada penetração de 0,6 mm, diluição de 5,27% e R/L de 0,26.

Com as características macrográficas dentro dos padrões necessários para uma aplicação de revestimento, Schaeffer (2017) produziu revestimento com três cordões depositados lateralmente e percebeu uma maior penetração no cordão central além de uma variação da altura entre os cordões. Portanto, com o objetivo de padronizar a geometria dos cordões e aumentar a produção, um novo método de revestimento foi proposto, e consiste na execução de três cordões ímpares inicialmente e dois cordões pares consecutivamente conforme mostra a Figura 15. Através dessa estratégia foram obtidos valores de diluição menores que 12%, taxa de fusão do arame de 7,2 kg/h gerando uma produção de 0,25 m²/h, e reforço médio de 3,08 mm.

Figura 15 - O revestimento de 5 cordões obtido com o processo SAW-DCEP: (a) Aspecto visual; (b) Macrografia.



Fonte: Schaeffer (2017).

Com o objetivo de avaliar a influência do modo de corrente sobre o nível de diluição, a geometria e a resistência a corrosão de diferentes revestimentos de superligas de níquel aplicados pelo processo de soldagem SAW, Silva et al. (2018) realizou soldagens em tubo de aço API 5L Gr B com arame eletrodo de liga de níquel Hastelloy C-276 de diâmetro 1,14mm, utilizando com consumível um fluxo aglomerado básico. Os revestimentos foram depositados com três passes de soldagem numa única camada, sendo parte depositada por corrente pulsada e parte por corrente contínua. Os resultados da pesquisa desenvolvida por Silva et al. (2018) mostraram que em termos de diluição os revestimentos aplicados com corrente contínua apresentaram valores de diluição inferiores aos realizados com corrente pulsada. Além de melhores valores de diluição, o revestimento aplicado por corrente convencional apresentou maior largura (34,95 mm) e maior altura mínima do revestimento (3,61 mm). Silva et al. (2018) analisa ainda a microestrutura na região central do segundo passe de soldagem e constatou que na ZTA de grãos grosseiros no metal de base se apresenta com uma estrutura bainítica com ferritas de Widmanstätten. Já na região de ZTA de grãos grosseiros que teve influência da ZTA do passe anterior, foi observado um refino dos grãos proporcionando melhores propriedades mecânicas. Com relação a dureza dos revestimentos, as amostras apresentaram perfis semelhantes, com valores inferiores a 250HV.

Processos de soldagem como GTAW e GMAW, comumente utilizados em aplicações de revestimento, possibilitam atingir valores de diluição baixos com certa facilidade, por outro lado, em soldagens SAW, com arame-eletrodo de maiores bitolas e, portanto, maiores densidades de corrente, os valores de diluição são elevados demais para tais aplicações. Neste contexto, o presente trabalho busca adequar a soldagem SAW para aplicações de revestimento modificando o ângulo de ataque da tocha e associando ao tecimento, aproveitando dessa forma a elevada produtividade e qualidade superficial características do processo.

4 METODOLOGIA

Com o intuito de investigar os efeitos do ângulo de ataque e a aplicação da oscilação transversal da tocha visando aplicações de revestimento através do processo SAW, o procedimento experimental foi dividido em três etapas. Cada etapa corresponde a um objetivo específico do projeto.

4.1 BANCADA DE ENSAIOS

A bancada de ensaios utilizada para a deposição dos cordões de solda foi previamente desenvolvida por Rode (2020) no Laboratório de Tecnologia da Soldagem e é constituída por um dispositivo de deslocamento da tocha (3) apoiado sobre a bancada onde são colocados os corpos de prova (4). O dispositivo permite o ajuste da posição inicial e final do deslocamento e a velocidade de soldagem. Além disso, é capaz de oscilar transversalmente com amplitudes e frequências definidas. Foram conectadas em paralelo uma fonte de soldagem modelo DigiPLUS A7 (1) e outra modelo Digitec 450 (2) permitindo soldagens de até 900 A. As variáveis de entrada requisitadas pela fonte são tensão e velocidade de alimentação de arame.

Além disso, utilizou-se um sistema de aquisição de dados SAP V4 (5) que permite fazer a leitura instantânea dos níveis de tensão, corrente de soldagem e velocidade de alimentação de arame (V_a) presentes no processo. A bancada foi disposta conforme mostra a Figura 16.

Figura 16 - Bancada de ensaios utilizada nos ensaios de soldagem.



Fonte: Rode (2020).

4.2 ENSAIOS DE SOLDAGEM

Com a bancada de ensaios devidamente estruturada foi possível iniciar os ensaios de soldagem a arco submerso. Foram realizadas soldagens de simples deposição sobre chapas (*bead-on-plate*) em material de base constituído por aço ASTM A36. Os corpos de prova foram cortados de forma a possuir dimensões de 250x76x15,8 mm. O conjunto arame-fluxo foi o AWS F7A6 – EM12K.

Para a realização dos ensaios se faz necessário o lixamento dos corpos de prova para remover qualquer oxidação presente na superfície do metal que possa estar acarretando em desconformidades no cordão. Além disso, o fluxo foi previamente aquecido em forno mufla durante 2 horas a uma temperatura de 300°C conforme recomendado por instrução de ressecagem do fabricante (Figura 17).

Figura 17 - Ressecagem do fluxo em mufla.



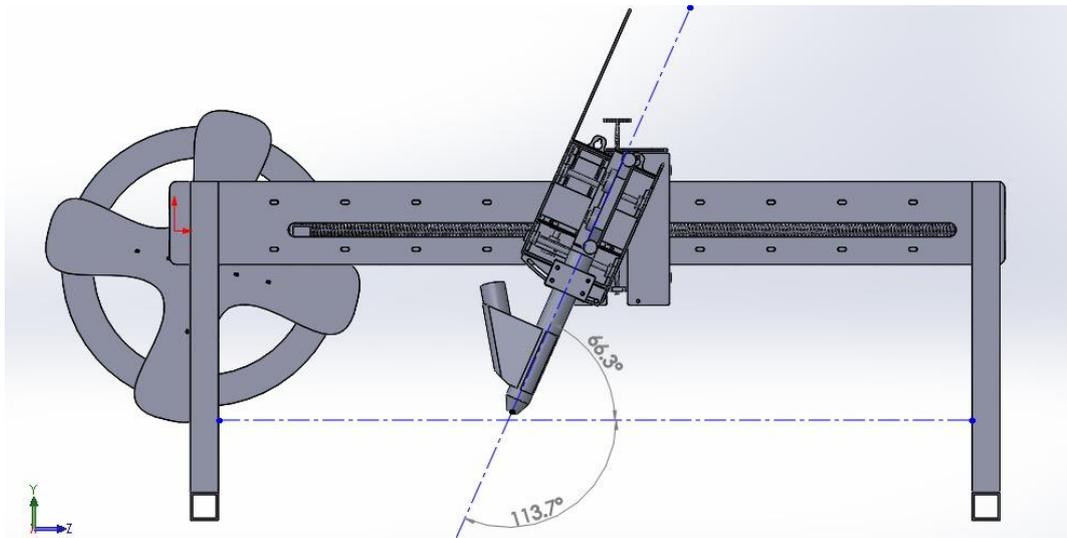
Fonte: Autor (2022).

Em se tratando das condições de soldagem, a bitola do arame-eletrodo utilizado nesse trabalho implica numa operação da fonte em modo tensão constante, logo através das variações na corrente de soldagem o comprimento do arco é auto ajustado. Os parâmetros fixos utilizados são valores já conhecidos, que resultam num cordão de solda de geometria superficial adequada. Para os ensaios de soldagem, utilizou-se tensão constante de 30 V e uma distância bico de contato peça (DBCP) fixa em 25 mm. Além disso a velocidade de soldagem (em x) foi de 30 cm/min e o diâmetro do bocal da tocha de soldagem utilizado foi de 29,5 mm.

4.2.1 Metodologia dos ensaios de soldagem com variação no ângulo de ataque

A primeira etapa do trabalho corresponde à realização de ensaios de soldagem com um ângulo de ataque na tocha, ou seja, aplicando a técnica puxando/empurrando. Conforme observado na literatura, pequenos valores de ângulo de ataque, por volta de 75° e 70° , já são suficientes para produzir alterações consideráveis na geometria do cordão de solda. Com base nisso, optou-se por realizar a análise da técnica puxando/empurrando com ângulo de até 70° , sendo que a bancada de ensaios disponível permite ângulos de até $66,3^\circ$ (Figura 18). Além disso, ensaios na posição vertical também foram realizados para comparação dos resultados.

Figura 18 - Ângulo de inclinação máximo da tocha de soldagem.



Fonte: Autor (2022).

Como o objetivo da segunda etapa é utilizar a técnica empurrando associada ao tecimento para diferentes amplitudes e conseqüentes diferentes velocidades de alimentação de arame, foi incluída nessa primeira etapa a variável velocidade de alimentação de arame. Essa variável foi adicionada à análise devido a possibilidade de o ângulo de ataque alterar o balanço existente entre a velocidade de alimentação do arame e a corrente de soldagem. O balanço ocorre da seguinte forma, ao aumentar V_a temos uma maior deposição de material entre arco e metal de base, dificultando o aumento da penetração. Por outro lado, também se aumenta a corrente de soldagem o que implica em um aumento da penetração. Dessa forma, com a aplicação do ângulo de ataque, pode ocorrer um deslocamento do material depositado entre arco e metal de base, desbalanceando a relação envolvida entre V_a e corrente de soldagem.

Para as soldagens com ângulo de ataque optou-se pela realização dos ensaios de forma intercalada, ou seja, após a realização de uma soldagem empurrando inverteu-se o sentido de soldagem fazendo com que a tocha retorne para sua posição inicial desempenhando uma nova soldagem puxando. Dessa forma, evitou-se a adaptação da tocha para cada técnica de soldagem e o seu deslocamento sem que esteja soldando. Ao todo foram realizados 10 cordões de solda variando o ângulo de ataque, técnica de soldagem e velocidade de alimentação de arame conforme mostrado na Tabela 1.

Na coluna que indica o ângulo de ataque formado entre a tocha e o plano de soldagem, as siglas E e P após o ângulo indicam as técnicas de soldagem empurrando e puxando, respectivamente. O ângulo de ataque de 90° se refere à soldagem na posição perpendicular.

Tabela 1 - Planejamento dos experimentos.

Ensaio	Ângulo de ataque	Va* [m/min]
1	90°	1,5
2	90°	3,6
3	80°E	1,5
4	80°E	3,6
5	80°P	1,5
6	80°P	3,6
7	70°E	1,5
8	70°E	3,6
9	70°P	1,5
10	70°P	3,6

*Valores medidos.

4.2.2 Metodologia dos ensaios de soldagem utilizando a técnica de tecimento associada ao ângulo de ataque

Como o objetivo final deste trabalho é estudar uma aplicação de revestimento, a matriz de ensaios (Tabela 2) foi desenvolvida com o objetivo de compreender a influência do ângulo de ataque associado ao tecimento, de forma a atingir as maiores amplitudes permitidas pelas fontes de soldagem, sem alterar os valores de DBCP de 25 mm e tensão de 30 V. Portanto, foram realizados 8 ensaios de soldagem com amplitudes de tecimento de 10, 25 e 35 mm e ângulo de ataque de 90° e 70°. Com relação à velocidade de alimentação de arame, optou-se por utilizar inicialmente a Va de 1,5 m/min, haja a vista a possibilidade de comparar com os cordões lineares da primeira etapa. Posteriormente conforme a amplitude aumentou, uma Va maior foi exigida e, portanto, foi utilizado também o valor de 3,6 m/min. Para tanto, a fim de facilitar a identificação dos ensaios, foi estabelecida uma nomenclatura composta pela amplitude de tecimento – ângulo de ataque – Va.

Tabela 2 - Matriz de ensaios utilizando a técnica de tecimento associada ao ângulo de ataque.

Nomenclatura do ensaio	Amplitude de tecimento [mm]	Ângulo de ataque	Va [m/min]
10-90-1,5	10	90°	1,5
10-70-1,5	10	70°	1,5
25-90-1,5	25	90°	1,5
25-70-1,5	25	70°	1,5
25-90-3,6	25	90°	3,6
25-70-3,6	25	70°	3,6
35-90-3,6	35	90°	3,6
35-70-3,6	35	70°	3,6

4.2.3 Metodologia dos ensaios de soldagem visando a deposição de cordões de solda adjacentes

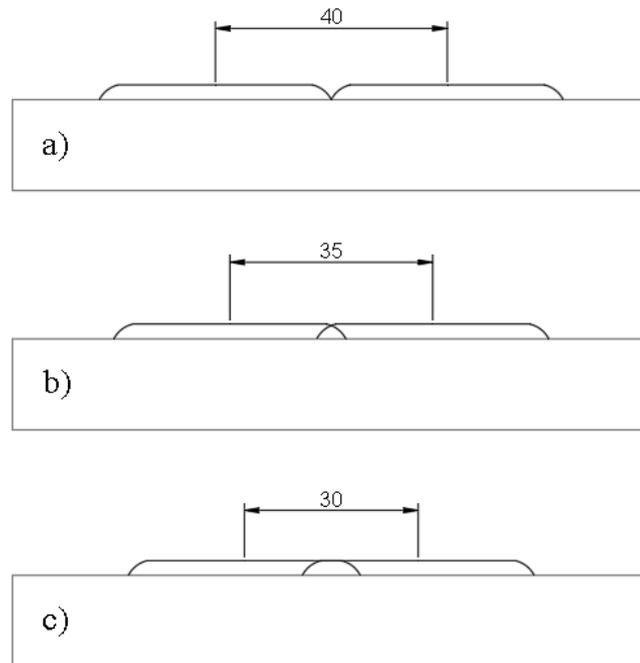
Na terceira etapa do trabalho, foi realizada a deposição de cordões de forma adjacente com o objetivo de caracterizar uma soldagem de revestimento. Ao todo foram realizados 6 cordões de solda sendo 2 em cada corpo de prova. Os parâmetros fixos utilizados nestes ensaios estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Parâmetros fixos utilizados nos ensaios de recobrimento.

Tensão	30 V
Distância bico de contato peça (DBCP)	25 mm
Velocidade de soldagem	30 cm/min
Diâmetro do bocal	29,5 mm
Amplitude	35 mm
Técnica de soldagem	Empurrando
Ângulo de ataque	70°
Velocidade de alimentação do arame [Va]	3,6 m/min

A fim de compreender qual a distância necessária para se obter um revestimento efetivo, foram pré-definidas 3 distâncias entre os centros dos cordões: 40, 35 e 30 mm. A Figura 19 ilustra de forma mais clara essas distâncias.

Figura 19 – Ilustração das distâncias entre centros dos cordões utilizadas.



Fonte: Autor (2022).

Para garantir a correta distância entre os centros dos cordões e o paralelismo dos cordões depositados de forma adjacente, fixou-se o suporte do corpo de prova em 4 pontos gravados na bancada de ensaios. Após a deposição do primeiro cordão, o suporte, juntamente com o corpo de prova foi deslocado na direção transversal até atingir a distância requerida para tal amostra nos 4 pontos citados anteriormente. A soldagem do cordão adjacente respeitou o tempo de resfriamento do cordão anterior, a fim de evitar qualquer influência que isto possa vir a acarretar na interação entre os dois cordões.

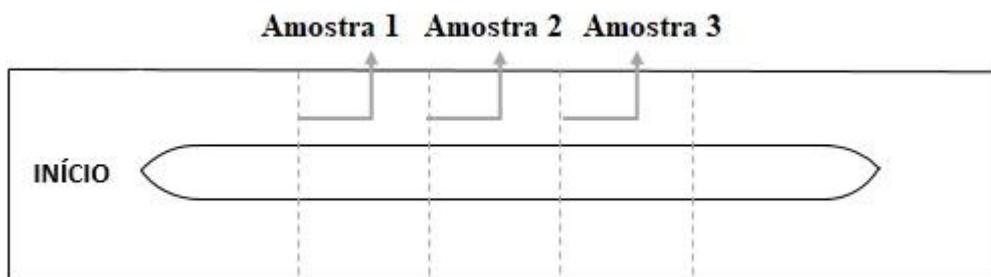
Nesta etapa foram utilizados corpos de prova com largura de 110 mm, haja a vista a deposição de cordões adjacentes com amplitude de tecimento de 35 mm. A espessura das chapas foi a mesma que nas etapas 1 e 2.

4.3 ANÁLISE MACROESTRUTURAL DOS CORDÕES DE SOLDA

Após a realização dos ensaios de soldagem foi possível fazer a preparação metalográfica dos corpos de prova. Primeiramente foram cortadas 3 amostras no sentido transversal de cada cordão de solda conforme demonstrado na Figura 20. Os cortes foram realizados utilizando uma cortadora metalográfica com refrigeração para não afetar a morfologia do cordão. Então, as

amostras foram embutidas em resina e passaram pelo processo de lixamento superficial, onde foram utilizadas lixas com granulometria de 80, 180, 240, 320, 400, 600. Em seguida realizou-se o ataque químico utilizando nital 4% afim de revelar nas amostras as regiões de interesse para análise da geometria resultante dos cordões de solda.

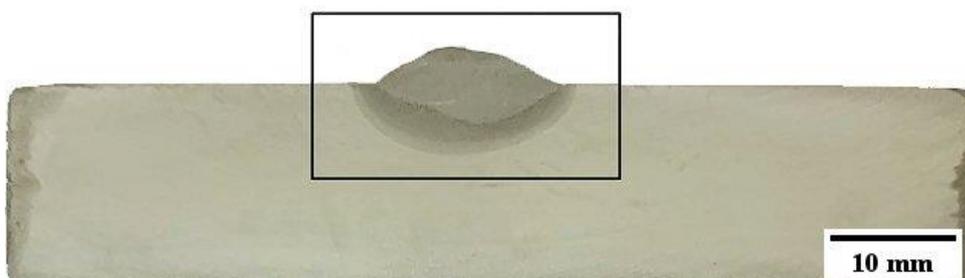
Figura 20 - Posição de onde foram retiradas as amostras.



Fonte: Autor (2022).

Após a preparação metalográfica, foram capturadas as imagens das regiões de interesse nas amostras (Figura 21) e posteriormente analisadas através do software de tratamento de imagem ImageJ. Este software permite realizar as medidas lineares dos cordões obtidos, a partir de uma calibração por meio de uma medida já conhecida. Portanto características como largura, penetração, reforço, diluição e área fundida foram calculadas.

Figura 21 – Região de interesse da seção transversal do cordão.



Fonte: Autor (2022).

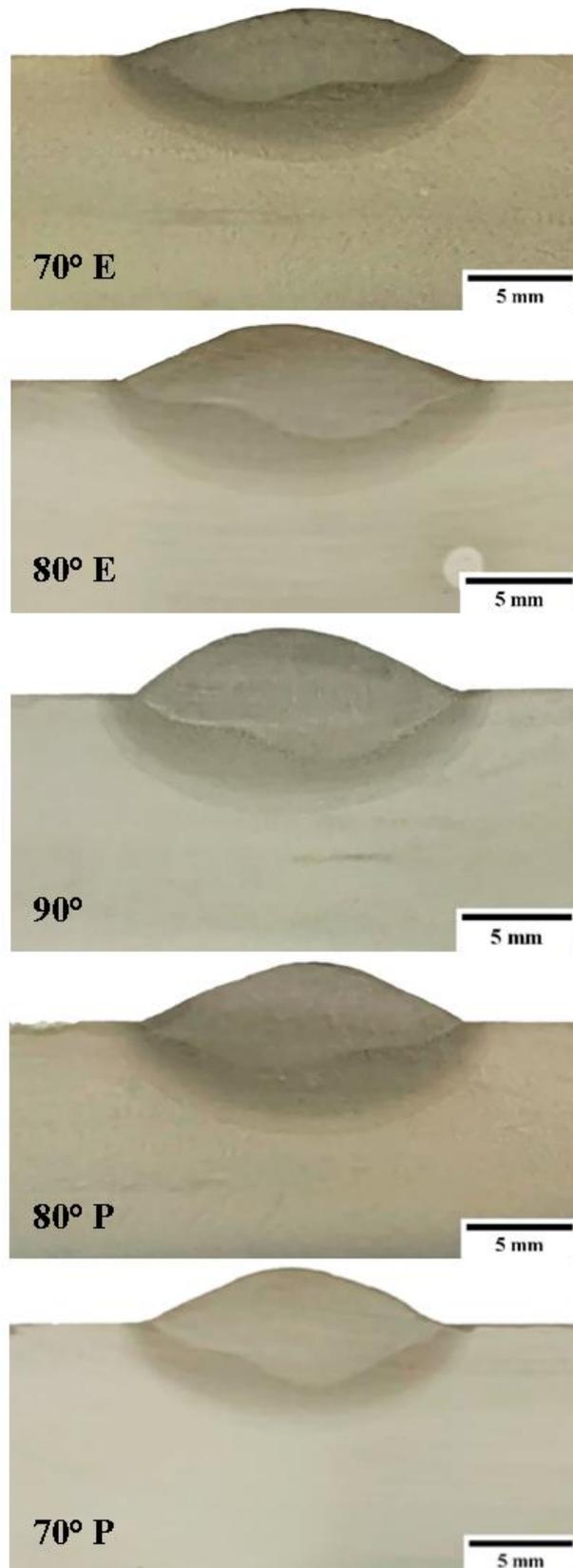
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, são apresentados os resultados dos ensaios de soldagem com variação no ângulo de ataque, ensaios de soldagem utilizando a técnica de tecimento simultaneamente com o ângulo de ataque e ensaios de soldagem visando o recobrimento de uma área.

5.1 ENSAIOS DE SOLDAGEM COM VARIAÇÃO NO ÂNGULO DE ATAQUE

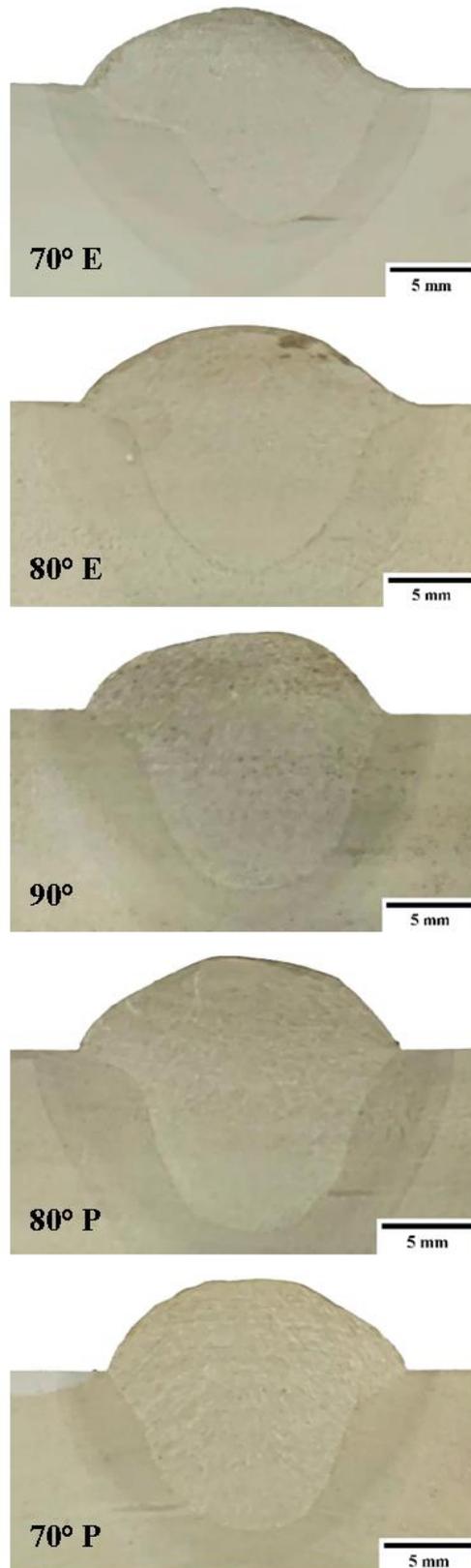
As Figuras 22 e 23 apresentam as imagens das seções transversais dos cordões soldados com velocidades de alimentação de arame de 1,5 e 3,6 m/min em diferentes ângulos de ataque.

Figura 22 - Seções transversais dos cordões de solda resultantes da variação do ângulo de ataque para uma velocidade de alimentação de arame de 1,5 m/min.



Fonte: Autor (2022).

Figura 23 - Seções transversais dos cordões de solda resultantes da variação do ângulo de ataque para uma velocidade de alimentação de arame de 3,6 m/min.



Fonte: Autor (2022)

Os parâmetros ajustados nos equipamentos de soldagem, assim como os valores medidos e calculados durante a realização dos ensaios estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Parâmetros utilizados na realização dos cordões com variação no ângulo de ataque.

Ensaio	Ângulo de ataque	Parâmetros						
		Ajustados			Medidos/Calculados			
		U [V]	Va [m/min]	Vs [cm/min]	*Va [m/min]	Um [V]	Im [A]	Es [kJ/cm]
1	90°	30	1,7	30,0	1,5	30,0	311	18,5
2	90°	30	3,7	30,0	3,6	29,4	585	34,4
3	80°E	30	1,7	30,0	1,5	29,6	307	18,1
4	80°E	30	3,7	30,0	3,6	29,3	585	34,5
5	80°P	30	1,7	30,0	1,5	29,7	307	18,2
6	80°P	30	3,7	30,0	3,6	29,6	594	35,1
7	70°E	30	1,7	30,0	1,5	29,8	317	18,9
8	70°E	30	3,7	30,0	3,6	29,5	557	32,8
9	70°P	30	1,7	30,0	1,5	30,2	304	18,3
10	70°P	30	3,7	30,0	3,6	29,3	574	33,6

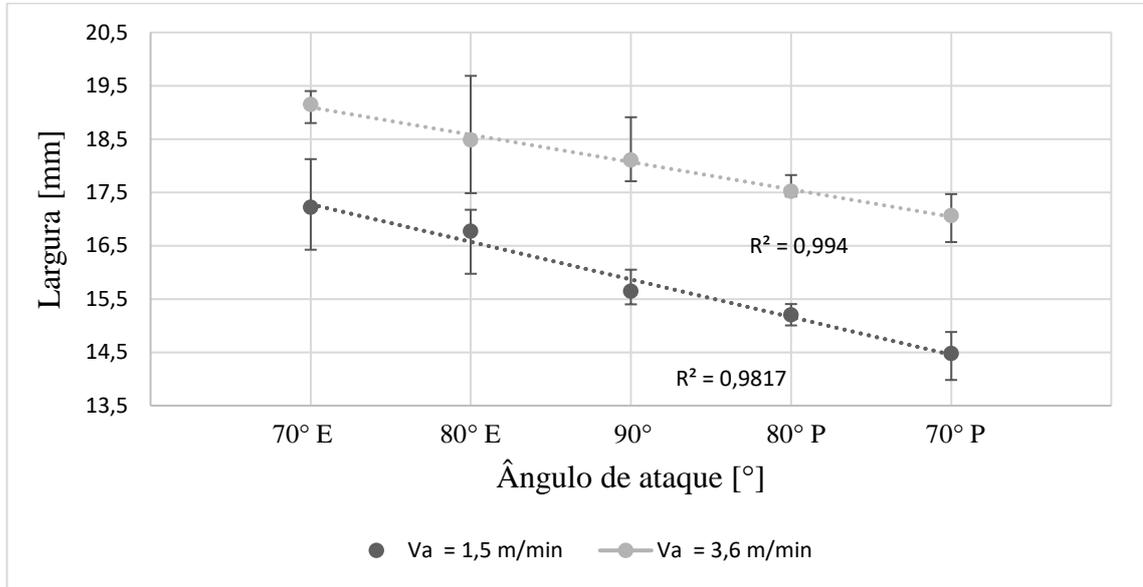
(U) tensão do arco; (Va) velocidade de arame; (Vs) Velocidade linear de soldagem; (*Va) Velocidade de arame medida; (Um) tensão média de arco; (Im) corrente média de soldagem; e (Es) energia de soldagem.

Com base nas medições realizadas e nas imagens apresentadas, percebe-se uma coerência nos resultados com o apresentado pela literatura já que, para ambas as velocidades de alimentação de arame, a largura dos cordões de solda reduz conforme o ângulo de ataque passa de 70°E para 70°P, ou seja, da técnica empurrando passando pela perpendicular até a técnica puxando. Conforme apresenta a Figura 24, para a Va de 1,5 m/min tem-se uma redução na largura de aproximadamente 16% quando comparado o ensaio de 70°E ao 70°P. Já para a Va de 3,6 m/min essa redução na largura fica próxima à 11%.

Segundo Resende e Scotti (2015), a maior largura apresentada na condição empurrando pode ser explicada devido ao pré-aquecimento que o arco provoca à frente da poça fundida aumentando o efeito de espalhamento e favorecendo o aumento da largura do cordão. Além disso percebe-se uma redução mais acentuada da largura nas soldagens utilizando Va de 1,5 m/min do que nas soldagens com Va de 3,6 m/min. Essa diferença pode estar relacionada às diferentes velocidades de alimentação de arame utilizadas nos ensaios já que com 1,5 m/min temos uma menor energia agindo sobre o chapa logo o pré-aquecimento é menos significativo,

fazendo com que a redução de largura seja maior que no caso de uma V_a de 3,6 m/min onde tem-se uma energia maior envolvida.

Figura 24 - Relação entre a largura dos cordões de solda em função do ângulo de ataque.

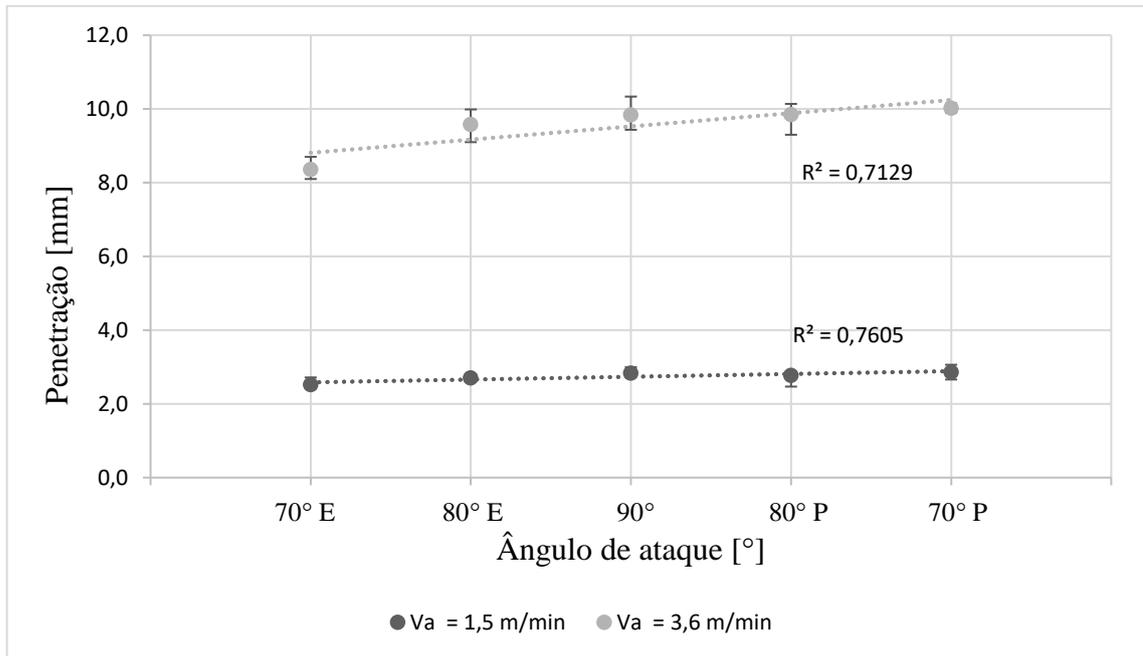


Fonte: Autor (2022).

De forma análoga ao apresentado pela literatura, a técnica empurrando apresentou uma menor penetração em relação a técnica puxando. Ao observar os resultados de penetração apresentados na Figura 25 percebe-se um aumento de 16% entre 70°E e 70°P para V_a de 1,5 m/min, enquanto que na condição com V_a de 3,6 m/min tem-se um acréscimo de 19%. Acredita-se que isso ocorra pois para uma maior energia de soldagem o calor é levado mais ao fundo da peça, já com uma menor energia de soldagem, a inclinação da reta é menor porque, mesmo com a soldagem puxando, o calor é dissipado mais rapidamente haja vista a espessura do corpo de prova ser constante.

De acordo com Hirata (2014), a inclinação da tocha de soldagem na técnica puxando, produz um efeito mecânico atuante na poça de fusão que acaba deslocando o metal fundido que se encontra entre o material de base e o arco, fazendo com que o calor seja transferido com maior efetividade para o material de base. Portanto a técnica atinge maiores valores de penetração e menores larguras o que justifica as geometrias dos cordões de solda apresentados.

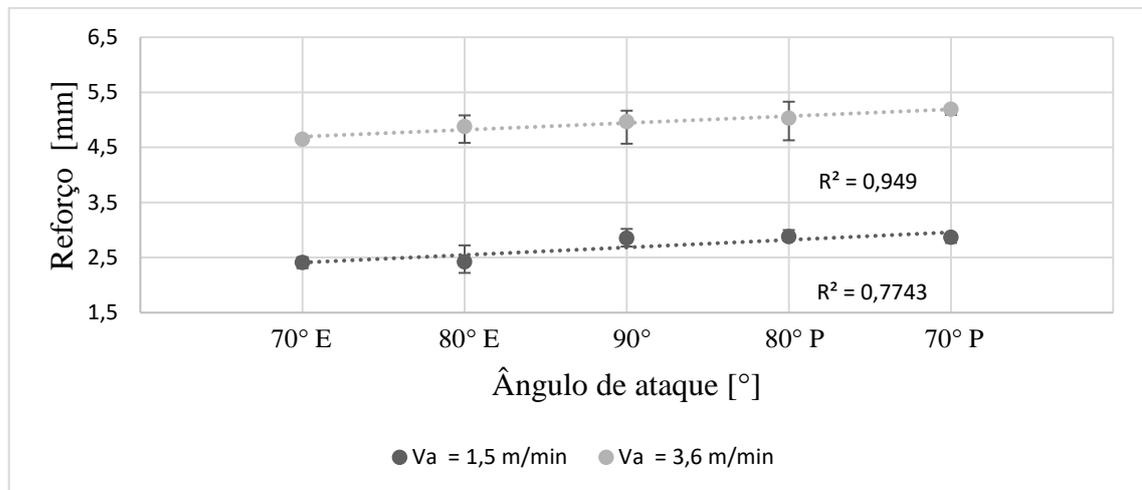
Figura 25 - Relação entre a penetração dos cordões de solda em função do ângulo de ataque.



Fonte: Autor (2022).

Ao analisar o gráfico relacionando o reforço e o ângulo de ataque apresentado na Figura 26, percebe-se uma tendência de aumento do reforço conforme o ângulo de ataque passa de 70° E para 70° P para ambas as velocidades de alimentação de arame. Para Va de 1,5 m/min, observa-se um incremento de 21% no reforço, enquanto que para Va de 3,6 m/min este incremento representa 13%. Esse resultado é oposto ao encontrado na largura e já era esperado uma vez que os cordões de solda, para uma mesma Va, possuem o mesmo volume e, portanto, uma redução na largura implica em um acréscimo no reforço.

Figura 26 – Relação entre o reforço dos cordões de solda em função do ângulo de ataque.



Fonte: Autor (2022).

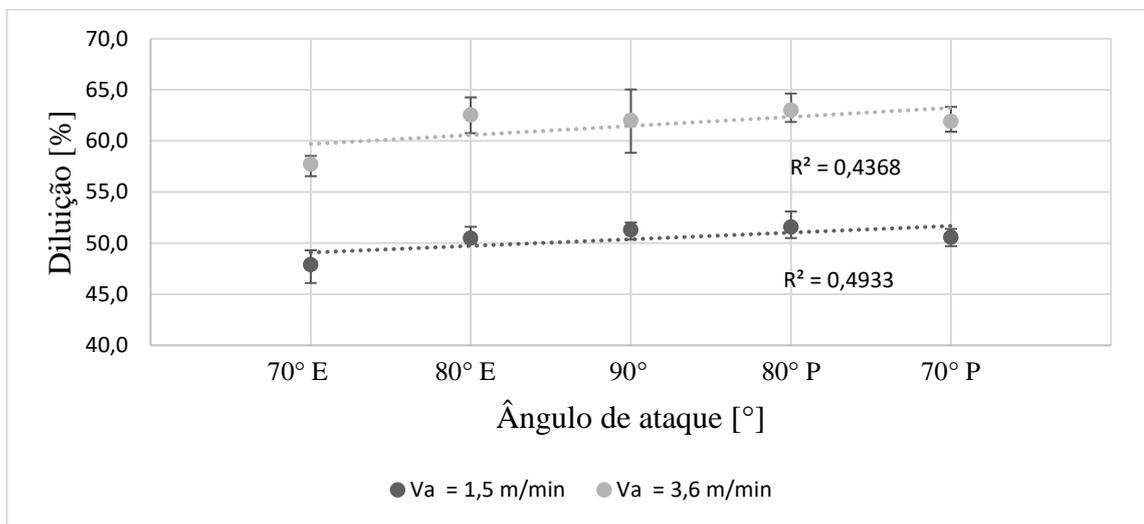
A área depositada média obtida com a velocidade de alimentação de arame de 1,5 m/min para todas as condições foi de aproximadamente 25,9 mm² enquanto que para a velocidade de 3,6 m/min foi de 62 mm². De fato, percebe-se que os resultados estão em concordância já que para um aumento de 240% na velocidade de alimentação de arame, temos um aumento de 239,4% na área depositada.

Com relação à área penetrada, a média dos ensaios para Va de 1,5 m/min foi de 26,4 mm², já para a Va de 3,6 m/min a média foi de 99,5 mm² o que representa um aumento de 376% que é superior ao aumento de 185% presente na energia de soldagem. A média da energia de soldagem para Va de 1,5 m/min foi de 18,4 kJ/cm, já para Va de 3,6 m/min aumentou para 34,1 kJ/cm. Analisando o balanço envolvido entre Va e a corrente de soldagem, notou-se que para a soldagem com ângulo de ataque de 90° o aumento percentual de Va de 1,5 m/min para Va de 3,6 m/min foi de 240%, enquanto que a corrente média foi de 311A para 585A apresentando um aumento percentual de 188%. Já para o ângulo de ataque de 70° empurrando, a corrente média foi de 317A para 557A resultando em um aumento percentual de 175%, o que representa um desbalanceamento de 7,5% na relação envolvida entre Va e a corrente de soldagem. Por outro lado, o ângulo de ataque de 70° puxando apresentou o mesmo incremento na corrente média que o ângulo de ataque de 90°, não apresentando alteração nesta relação.

O comportamento de diluição apresentado na Figura 27 é semelhante ao da penetração, o que já era esperado haja vista que, normalmente, quanto maior a penetração maior a área penetrada, resultando em um incremento também na diluição conforme demonstra a

equação (1). Para a velocidade de alimentação de arame de 1,5 m/min, obteve-se uma redução de diluição de aproximadamente 7% ao passar da soldagem perpendicular para empurrando com ângulo de ataque de 70°. De forma análoga, para a velocidade de 3,6 m/min, essa redução também foi em torno de 7%. Os autores Lopes et al. (2017) também constataram, de forma análoga, um aumento no percentual de diluição quando a soldagem passa do modo empurrando para o modo puxando.

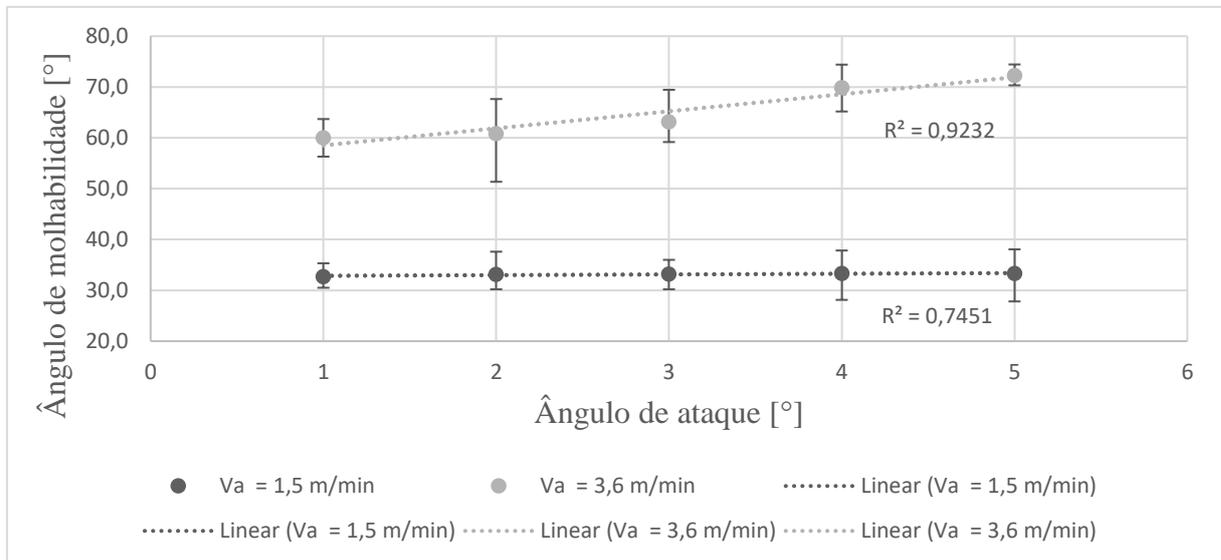
Figura 27 - Relação entre a diluição dos cordões de solda em função do ângulo de ataque.



Fonte: Autor (2022).

Com relação a molhabilidade, pode-se observar na Figura 28 diferenças somente para a velocidade de alimentação de arame de 3,6 mm/min, caracterizando um aumento no ângulo de molhabilidade quando a soldagem é alterada da técnica empurrando para puxando. O comportamento apresentado pode estar associado ao fato de que para ambas as velocidades, as chapas possuem a mesma espessura, logo para Va de 1,5 mm/min a energia de soldagem é relativamente baixa e acaba sendo dissipada mais facilmente pelo corpo de prova.

Figura 28 - Relação entre a molhabilidade dos cordões de solda em função do ângulo de ataque.



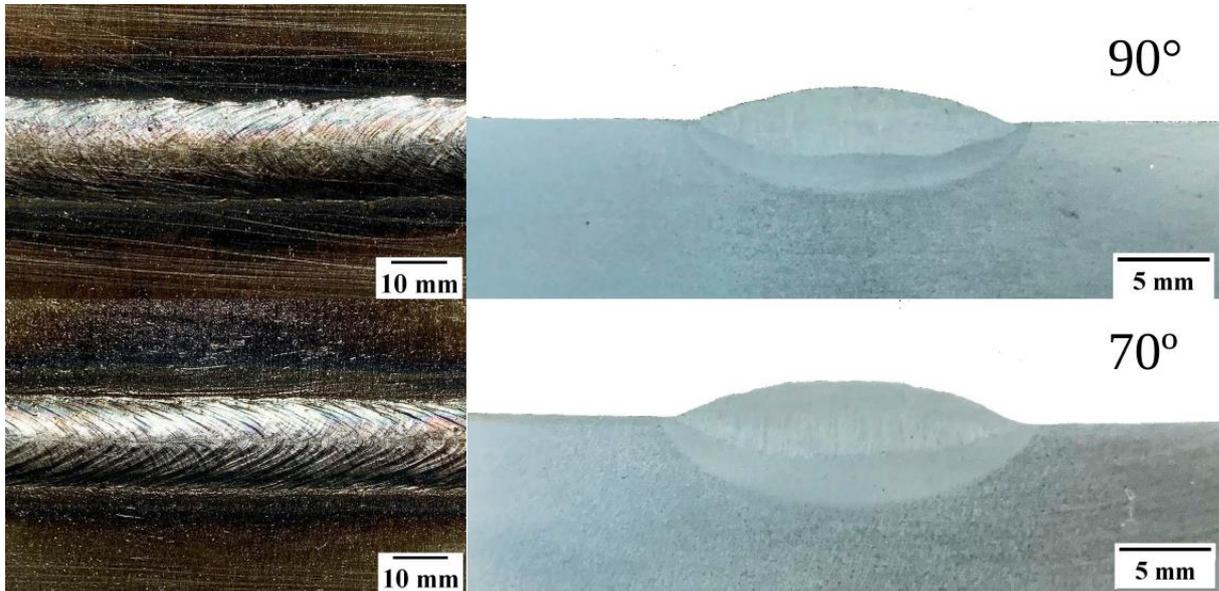
Fonte: Autor (2022).

5.2 ENSAIOS DE SOLDAGEM COM O TECIMENTO ASSOCIADO AO ÂNGULO DE ATAQUE

A partir dos resultados obtidos na primeira parte do presente trabalho, aplicou-se a técnica de tecimento na soldagem com intuito de investigar a influência do ângulo de ataque associado ao tecimento. Nesta etapa, foram realizados apenas ensaios na posição perpendicular e empurrando, haja a vista a aplicação de revestimento almejada.

Nos dois primeiros ensaios (Figura 29), utilizou-se a amplitude de tecimento de 10 mm com velocidade de alimentação de arame de 1,5 m/min. Os ensaios foram realizados tanto com a tocha de soldagem na posição perpendicular, quanto com a técnica empurrando com um ângulo de ataque de 70°. Os cordões apresentaram bom acabamento superficial e nenhuma incrustação de escória.

Figura 29 - Cordões de solda produzidos com amplitude de tecimento de 10 mm, Va de 1,5 m/min e ângulos de ataque de 90° e 70°.



Fonte: Autor (2022).

Posteriormente, como o objetivo era atingir as maiores amplitudes de tecimento suportadas pelos equipamentos, realizaram-se ensaios de soldagem com amplitude de 25 mm para a mesma Va dos primeiros ensaios. As imagens superficiais dos cordões de 25 mm estão apresentadas na Figura 30.

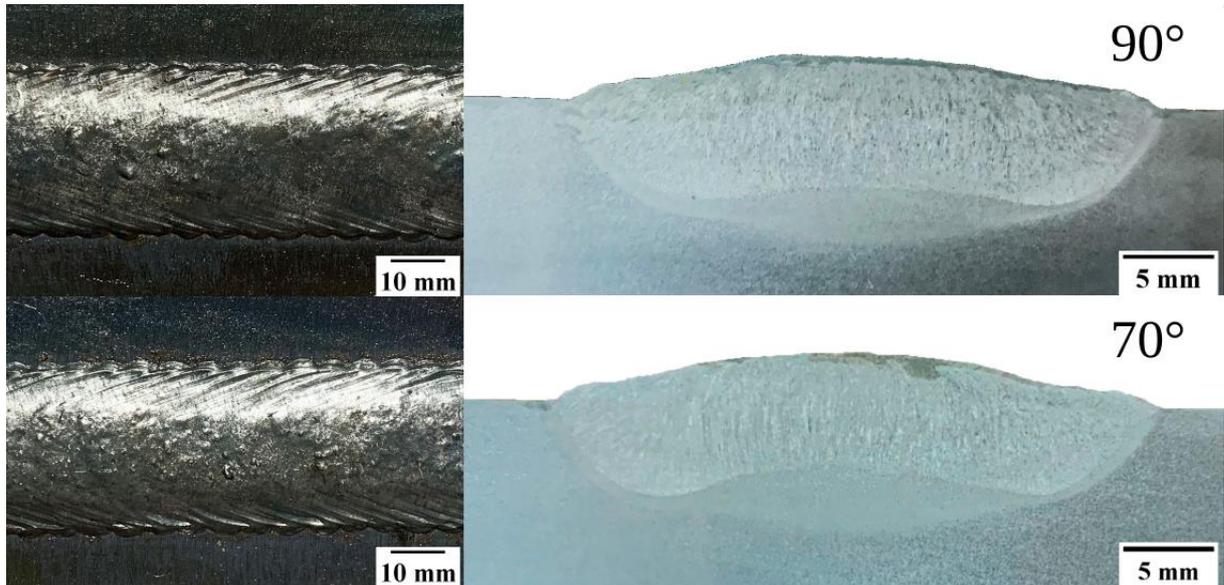
Figura 30 – Cordões de solda produzidos com amplitude de tecimento de 25 mm, Va de 1,5 m/min e ângulos de ataque de 90° (a) e 70°E (b).



Fonte: Autor (2022).

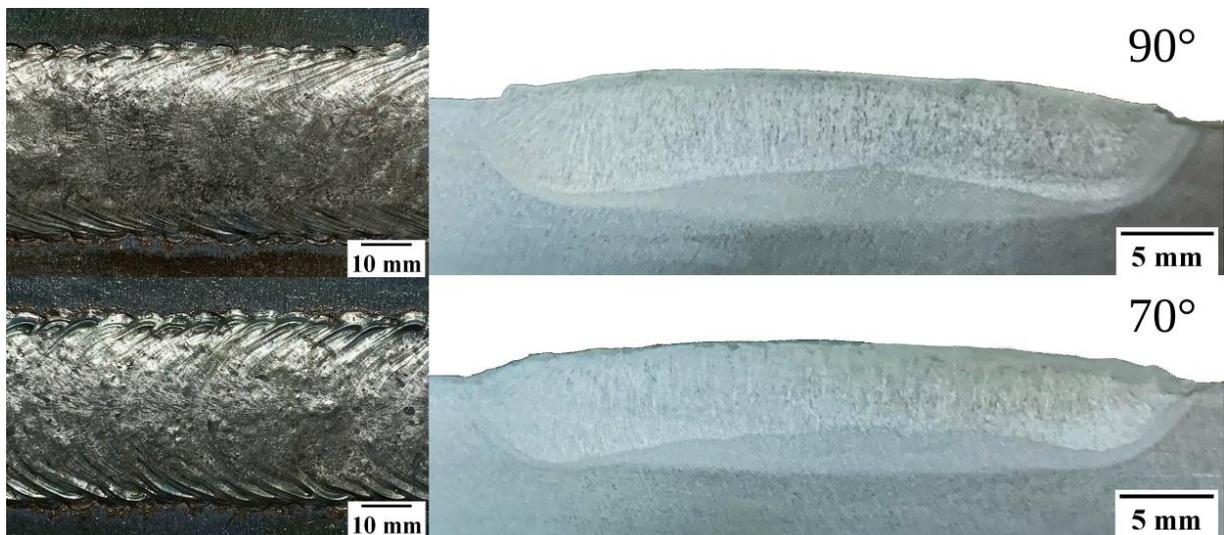
Conforme pode ser observado, para ambos os ângulos de ataque, os cordões de solda produzidos com amplitude de 25 mm e Va de 1,5 m/min apresentam falta de deposição de material ao longo do cordão. Isso pode ser explicado pelo fato de uma mesma quantidade de material ser depositada em uma área superficial maior fazendo com que o arame-eletrodo não consiga preencher por completo a área determinada pela amplitude de tecimento empregada. Dessa forma, com o intuito de suprimir esta falta de deposição de material, a velocidade de alimentação de arame foi incrementada para 3,6 m/min. Os cordões com 25 mm de amplitude não apresentaram defeitos e a amplitude foi aumentada para 35 mm, na qual também foi possível realizar as soldagens sem que ocorresse a falta de deposição de material. Os cordões de solda realizados com amplitude de tecimento de 25 e 35 mm e suas respectivas seções transversais estão representados na Figura 31 e Figura 32.

Figura 31 - Cordões de solda produzidos com amplitude de tecimento de 25 mm, Va de 3,6 m/min e ângulos de ataque de 90° e 70°.



Fonte: Autor (2022).

Figura 32 - Cordões de solda produzidos com amplitude de tecimento de 35 mm, Va de 3,6 m/min e ângulos de ataque de 90° e 70°.



Fonte: Autor (2022).

Os parâmetros ajustados nos equipamentos de soldagem utilizados para a realização dos cordões apresentados, assim como os valores medidos e calculados durante a realização dos ensaios estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Parâmetros utilizados na realização dos cordões com variação no ângulo de ataque associado ao tecimento.

Ensaio	Amplitude de tecimento [mm]	Ângulo de ataque	Parâmetros						
			Ajustados			Medidos/Calculados			
			U [V]	Va [m/min]	Vs [cm/min]	*Va [m/min]	Um [V]	Im [A]	Es [kJ/cm]
1	10	90°	30	1,7	30,0	1,5	29,7	299,8	17,8
2	10	70°E	30	1,7	30,0	1,5	30,3	306,1	18,5
3	25	90°	30	1,7	30,0	1,5	-	-	-
4	25	70°E	30	1,7	30,0	1,5	-	-	-
5	25	90°	30	3,7	30,0	3,6	29,3	588,3	34,4
6	25	70°E	30	3,7	30,0	3,6	29,7	550,0	32,6
7	35	90°	30	3,7	30,0	3,6	29,3	588,9	34,4
8	35	70°E	30	3,7	30,0	3,6	29,2	546,3	31,9

(U) tensão do arco; (Va) velocidade de arame; (Vs) Velocidade linear de soldagem; (*Va) Velocidade de arame medida; (Um) tensão média de arco; (Im) corrente média de soldagem; e (Es) energia de soldagem.

Com base nas seções transversais dos cordões de solda apresentados, para amplitude de tecimento de 25 mm, percebe-se uma maior profundidade da penetração na região central dos cordões quando comparado aos realizados com amplitude de tecimento de 35 mm. Isso ocorre pois ambos os cordões possuem a mesma energia de soldagem, porém com amplitudes diferentes, fazendo com que, por exemplo, no caso da amplitude de 35 mm, devido a uma maior área superficial, a energia dissipa mais pela superfície do cordão reduzindo sua penetração.

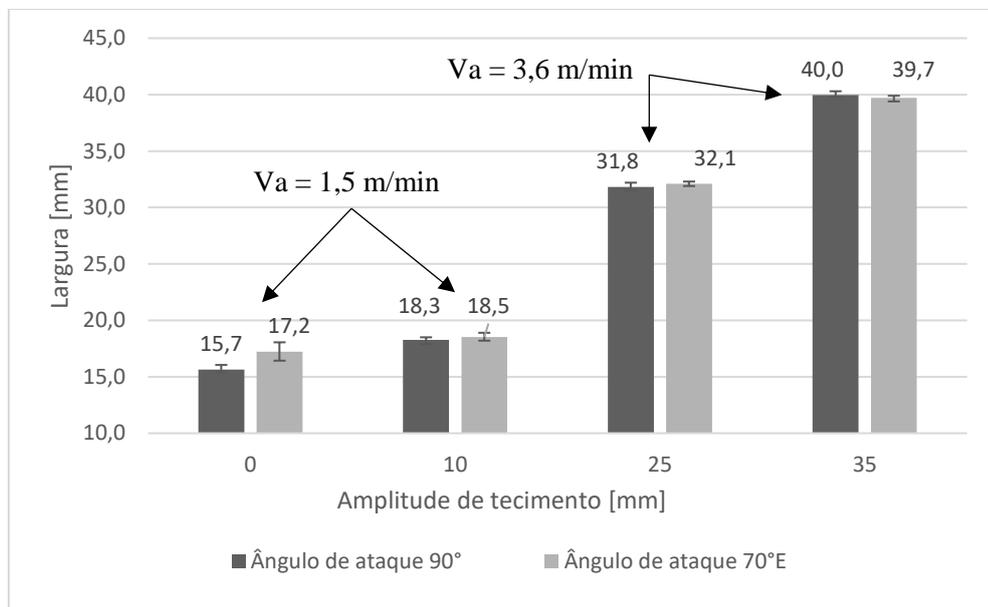
Um fenômeno observado nos cordões com amplitude de tecimento de 25 e 35 mm diz respeito à presença de uma maior penetração nas laterais dos cordões e menor na região central. Este efeito já foi identificando anteriormente por Rode (2020) e acredita-se que isso ocorra devido a tocha de soldagem passar pelo centro do cordão com a maior velocidade de tecimento, enquanto que nas laterais a tocha está com velocidade mínima, pois desacelera para inverter o movimento, concentrando dessa forma uma maior quantidade de energia que implica em uma maior penetração. Uma possível solução para evitar este fenômeno seria trabalhar com velocidades de oscilação transversal diferentes, sendo menor no centro do cordão e maior nas extremidades. Além disso, poderia ser realizado um aumento da corrente na região central do tecimento e redução nas laterais.

A partir das imagens das seções transversais, realizou-se a medição dos parâmetros geométricos dos cordões. Os gráficos em formato de barra foram escolhidos afim de representar o efeito da amplitude na geometria do cordão e comparar com o ângulo de ataque. Importante

ressaltar que para as amplitudes de tecimento de 0 (linear) e 10 mm a velocidade de alimentação de arame é de 1,5 m/min, enquanto que para 25 e 35 mm a V_a é de 3,6 m/min.

Ao analisar a largura dos cordões de solda obtida com diferentes amplitudes de tecimento apresentada na Figura 33, percebe-se que o efeito do ângulo de ataque é mínimo nas amplitudes de tecimento de 10, 25 e 35 mm. Por outro lado, nota-se um aumento considerável de 9% na largura do cordão linear com o aumento do ângulo de ataque. Dessa forma, os resultados mostram que o efeito do tecimento se sobrepõe ao efeito do ângulo de ataque quando analisada a largura do cordão de solda.

Figura 33 - Largura dos cordões de solda em função do ângulo de ataque para amplitudes de tecimento de 0, 10, 25 e 35mm.

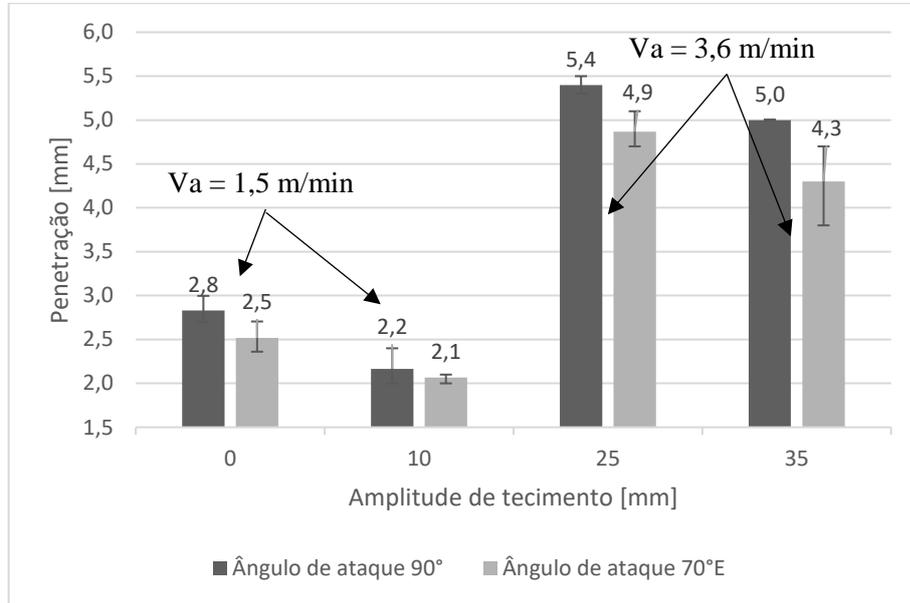


Fonte: Autor (2022).

De forma similar ao resultado encontrado por Rode (2020), para as condições de ensaio propostas, foram encontradas que a largura do cordão de solda é de pelo menos 5 mm maior que a amplitude de tecimento configurada no equipamento de soldagem.

Em se tratando de penetração, os resultados apresentados na Figura 34 demonstram um efeito do ângulo de ataque de 70° empurrando sobre a penetração quando comparado ao ângulo de 90°, principalmente nas amplitudes de tecimento de 25 e 35 mm. Além disso, percebe-se que quanto maior a amplitude de tecimento, maior é o efeito do ângulo de ataque sobre a penetração, chegando a uma redução de 9% para a amplitude de 25 mm e 14% para a amplitude de 35 mm.

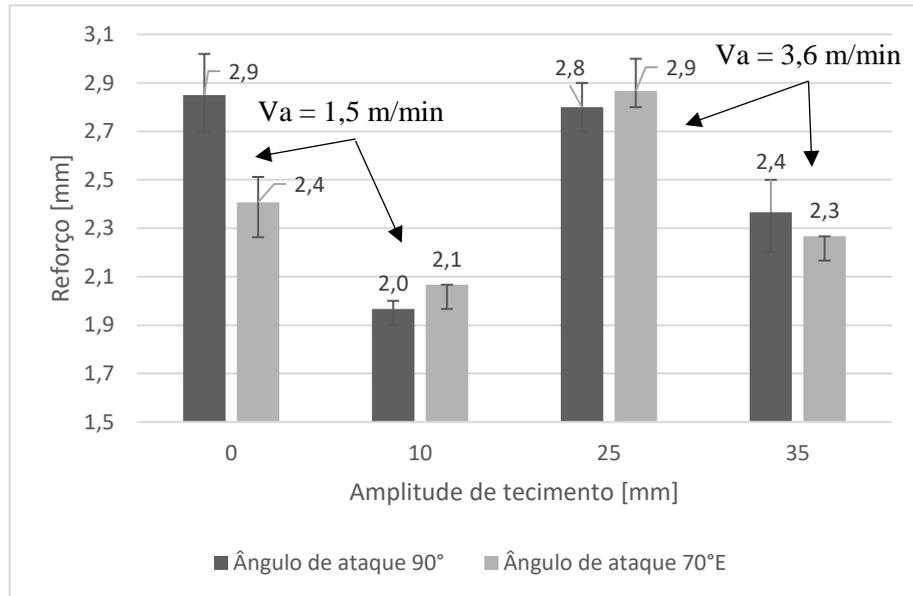
Figura 34 – Penetração dos cordões de solda em função do ângulo de ataque para amplitudes de tecimento de 0, 10, 25 e 35mm.



Fonte: Autor (2022).

Com relação ao reforço (Figura 35), nota-se uma tendência de redução tanto da amplitude de 0 para 10 mm quanto da amplitude de 25 para 35 mm. O que já esperado pois, para uma mesma V_a , um aumento na largura do cordão implica em uma redução no reforço.

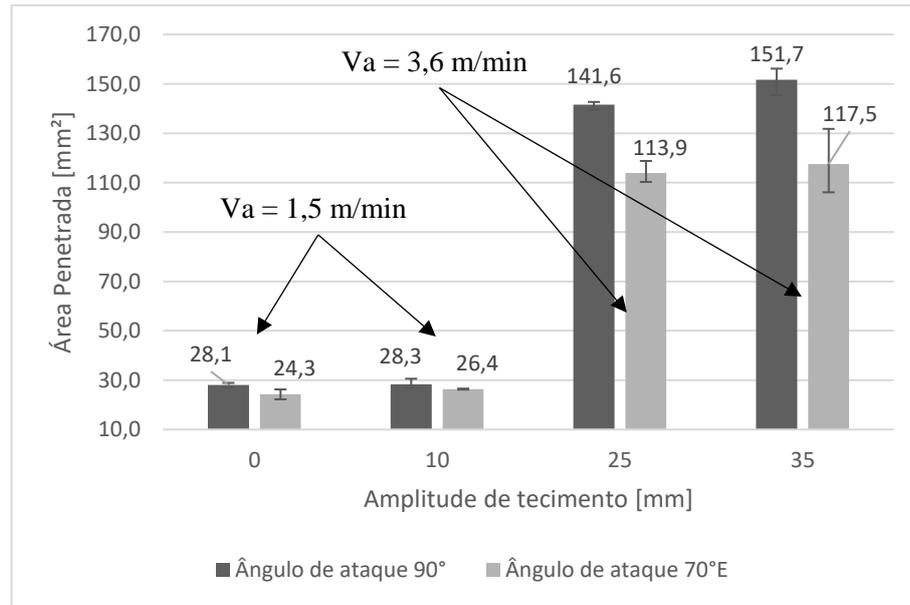
Figura 35 – Reforço dos cordões de solda em função do ângulo de ataque para amplitudes de tecimento de 0, 10, 25 e 35mm.



Fonte: Autor (2022).

Em se tratando da área penetrada (Figura 36), nota-se uma redução ao comparar o ângulo de ataque de 90° com o de 70° empurrando. Conforme a amplitude de tecimento aumenta para a velocidade de alimentação de arame de 3,6 m/min, essa redução é incrementada chegando a 29% para uma amplitude de 35 mm. Essa redução era esperada haja vista o comportamento observado pela largura, no qual o ângulo de ataque não apresentou efeito considerável, deste modo, como a penetração reduziu, a área penetrada também tende a reduzir, resultado este que impacta diretamente na diluição.

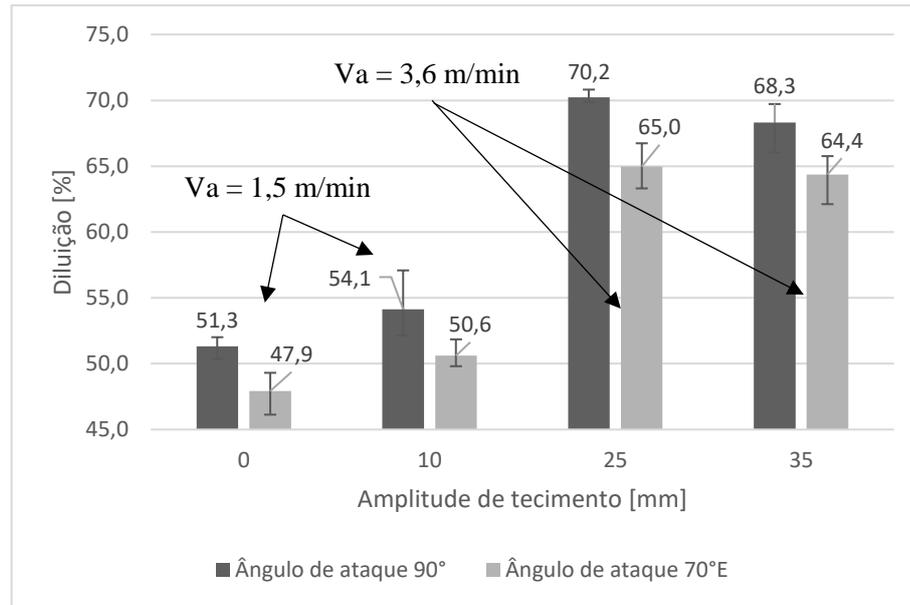
Figura 36 – Área penetrada dos cordões de solda em função do ângulo de ataque para amplitudes de tecimento de 0, 10, 25 e 35mm.



Fonte: Autor (2022).

Portanto, conforme esperado, os resultados de diluição apresentam redução ao aplicar a técnica empurrando associado ao tecimento, com valores próximos a 8% e 6% para as amplitudes de 25 e 35 mm, respectivamente. De modo geral, os valores de diluição encontrados ainda são muito elevados para uma aplicação de revestimento ficando próximos a 60% (Figura 37). Isso se deve ao fato de os cordões com maiores amplitudes possuírem uma elevada penetração nas laterais em função da desaceleração da tocha de soldagem. Dessa forma, uma hipótese para reduzir esses valores de diluição é aumentar a velocidade com que a tocha passa pelas laterais do cordão e reduzir no centro, implicando em um cordão com perfil de penetração mais constante.

Figura 37 – Diluição dos cordões de solda em função do ângulo de ataque para amplitudes de tecimento de 0, 10, 25 e 35mm.



Fonte: Autor (2022).

5.3 ENSAIOS DE SOLDAGEM VISANDO A DEPOSIÇÃO DE CORDÕES DE SOLDA ADJACENTES

Embora os valores de diluição obtidos sejam consideravelmente elevados, os ensaios de soldagem visando a deposição de cordões depositados de forma adjacente foram realizados com o intuito de estudar a interação presente na região de sobreposição dos cordões de solda, investigando, desta forma, a distância necessária para realizar um revestimento efetivo em uma área.

Após a realização dos ensaios de soldagem, notou-se que os cordões com distância de 40 mm entre si não apresentaram qualquer sobreposição entre cordões, logo, estes não foram analisados.

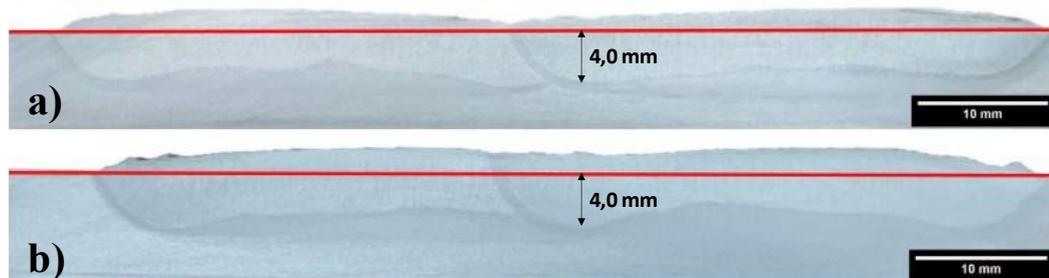
Figura 38 – Cordões de solda depositados adjacentes resultantes da variação da distância entre os centros dos cordões de a) 35 mm e b) 30 mm.



Fonte: Autor (2022).

Ao observar a Figura 38 nota-se claramente a redução das distâncias entre os centros dos cordões de 35 mm (a) e 30 mm (b). A partir da preparação metalográfica destes corpos de prova, as imagens presentes na Figura 39 foram registradas e analisadas.

Figura 39 – Seções transversais dos corpos de prova resultantes da variação da distância entre centros dos cordões de a) 35 mm, b) 30 mm.



Fonte: Autor (2022).

Ao analisar as seções transversais dos corpos de prova (a) e (b), percebe-se a sobreposição dos cordões adjacentes, indicando uma das características de uma soldagem de revestimento. Além disso, nota-se que os cordões foram realizados de forma efetiva, sem quaisquer inclusões de escória ou falta de deposição de material.

Na Figura 39 desenhou-se uma linha de referência indicando a superfície da chapa com o objetivo de auxiliar na identificação do reforço (região superior à linha) e penetração (região inferior à linha). Ao analisarmos a penetração dos corpos de prova (a) e (b), na região de

sobreposição dos cordões, percebem-se mesmos valores de profundidade. Ao realizar uma análise comparativa com o ensaio 35-70-3,6 apresentado na Figura 32 do item 5.2 deste trabalho, observou-se que a penetração de 4 mm apresentada na região de sobreposição dos cordões (a) e (b) é inferior a penetração de 4,3 mm registrada nas laterais do cordão 35-70-3,6, o que representa uma redução de 7%. A área penetrada dos cordões realizados com distância entre centros de 35 mm (a) foi de 240 mm², enquanto que para a distância entre centros dos cordões de 30 mm (b) a área foi de 203 mm², o que corresponde a uma redução de 18%. Portanto, do ponto de vista de diluição, o corpo de prova (b) seria o mais adequado por possuir menor área penetrada.

Com relação ao reforço, percebe-se que o corpo de prova (a) apresenta altura máxima de 1,6 mm, enquanto que o corpo de prova (b) possui 2,2 mm, isso representa um incremento de 37% no reforço. Percebe-se também que o reforço no caso (b) apresenta uma altura média mais homogênea que o caso (a), favorecendo uma aplicação de revestimento. Adicionalmente, nota-se que na região central do reforço no caso (a), existe uma quantidade mínima de material depositado em relação a superfície da chapa (linha vermelha), o que pode gerar problemas de desgaste excessivo neste local por ser o ponto mais frágil do revestimento. Portanto, nas condições de realização dos ensaios a distância de 30 mm se mostra a mais adequada por possuir menor área penetrada e garantir um reforço de dimensão homogênea ao longo da seção transversal e ao mesmo tempo ter um impacto pouco significativo na penetração nessa região de sobreposição quando comparado com a penetração obtida nas laterais dos cordões. Além disso, para condição de 35 mm, percebe-se uma criticidade pois qualquer pequeno desvio no processo de soldagem no paralelismo dos cordões pode fazer com que não seja atingida a sobreposição. Adicionalmente, o processo de tecimento implica na presença de um efeito escamado nos cordões de solda, logo, ainda podem existir pontos onde os “vales” dos cordões se encontrem, aumentando a chance de ocorrência de regiões com deposição insuficiente.

6 CONCLUSÕES

A partir dos resultados apresentados e discutidos ao longo do trabalho, conclui-se que o objetivo geral de investigar a aplicação da técnica de tecimento no processo de soldagem a arco submerso visando uma eventual aplicação de revestimento foi atendido. Adicionalmente, estabelecem-se, para o presente trabalho, as seguintes conclusões:

- Quanto à investigação do efeito do ângulo de ataque na técnica puxando/empurrando aplicada ao processo SAW, pode-se concluir que os ensaios foram satisfatórios pois não apresentaram problemas relacionados à inclusão ou retenção de escória;
- Como esperado, a largura dos cordões de solda reduziu para ambas as velocidades de alimentação de arame conforme o ângulo de ataque passa de 70° E para 70° P. Essa redução foi de 16% para V_a de 1,5 m/min e 11% para V_a de 3,6 m/min;
- De forma análoga ao apresentado pela literatura, observou-se um aumento na penetração de 16% e 19% para V_a de 1,5 e 3,6 m/min, respectivamente, quando o ângulo de ataque varia de 70°E até 70°P. Do mesmo modo, o reforço também apresentou um aumento para a mesma variação do ângulo de ataque, apresentando acréscimos de 21% e 13% para V_a de 1,5 e 3,6 m/min, respectivamente;
- Para ambas as velocidades de alimentação de arame na soldagem linear, a diluição apresentou uma redução de 7% conforme o ângulo de ataque foi alterado de 90° para 70° empurrando.
- Com relação às soldagens realizadas com a utilização da técnica empurrando associada ao tecimento, pode-se concluir que sua aplicação é viável haja vista um bom acabamento superficial e a ausência de problemas relacionados à inclusão ou retenção de escória;

- Ao analisar a largura dos cordões de solda realizados com amplitude de tecimento de 10, 25 e 35 mm, observou-se uma sobreposição do efeito do tecimento sobre o efeito do ângulo de ataque;
- Quanto maior a amplitude de tecimento, maior é o efeito do ângulo de ataque de 70°E em reduzir a penetração, quando comparado ao ângulo de ataque de 90°, chegando a uma redução de 9% para a amplitude de tecimento de 25 mm e 14% para a amplitude de 25 mm.
- Em se tratando da área penetrada, nota-se uma redução ao passar do ângulo de ataque de 90° para o ângulo de 70°E. Conforme a amplitude de tecimento aumenta, essa redução foi incrementada chegando a valores de 29% para uma amplitude de 35 mm.
- Ao aplicar a técnica empurrando, juntamente com a técnica de tecimento, obteve-se uma redução na diluição de 6% com amplitude de tecimento de 35 mm, os valores de diluição encontrados foram próximos a 60%, o que ainda é considerado elevado para aplicações de revestimento;
- Quanto à avaliação dos efeitos da sobreposição entre cordões de solda depositados de forma adjacentes, pode-se concluir que os ensaios foram satisfatórios pois não apresentaram problemas relacionados à inclusão ou retenção de escória;
- Os cordões de solda depositados com distância entre centros dos cordões de 30 mm apresentaram um reforço maior e de dimensão mais homogênea ao longo da seção transversal, enquanto que para a distância de 35 mm o valor do reforço obtido foi inferior e não homogêneo;

- Em termos de área penetrada, o corpo de prova (b) apresenta menor valor que o corpo de prova (a), e conseqüentemente, menor diluição. Portanto, para as condições experimentais empregadas, das distâncias entre centros de cordões analisadas, a mais indicada para uma aplicação de revestimento foi a de 30 mm.

7 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

- Aumentar a velocidade de oscilação transversal da tocha nas extremidades do cordão e reduzir no centro a fim de obter um perfil de penetração mais constante, reduzindo dessa forma a diluição;
- Estudar as propriedades mecânicas das zonas que apresentaram sobreposição dos cordões durante a deposição de cordões adjacentes;
- Executar ensaios de soldagem com a técnica de tecimento transversal em chanfros;
- Avaliar a distribuição de calor promovida com a técnica de tecimento no processo SAW.

REFERÊNCIAS

ABIOYE, T.E., MCCARTNEY, D.G., CLARE, A.T. **Laser Cladding of Inconel 625 wire for corrosion protection.** *Journal of Materials Processing Technology.* 217(2015) 232-240.

ALTOÉ, J. A. F., SILVA, J. P. C., MAZIERO, R. **Avaliação do Aço Inoxidável Superaustenítico de norma BS EN N° 14587 na Resistência à Corrosão por Pite.** 70º Congresso Anual da ABM – Internacional. Agosto/2015, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

BATISTA, Valmir Rodrigues et al. **Influência dos parâmetros de soldagem sobre as características de revestimentos de liga de níquel aplicados em aços API 5L Gr B pelo processo arco submerso.** 2011.

CHO, Dae-Won et al. Analysis of submerged arc welding process by three-dimensional computational fluid dynamics simulations. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 213, n. 12, p. 2278-2291, 2013.

CUNHA, T. V. da; RIBEIRO, H. O. Avaliação do Uso do Tecimento na Soldagem a Arco Submerso. **Soldagem & Inspeção**, [s.l.], v. 23, n. 1, p.73-82, mar. 2018. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0104-9224/si2301.08>.

DA SILVA, Marcos Mesquita et al. **Estudo de revestimentos de liga de níquel aplicados por soldagem em aço API 5L Gr B.** 2018.

ENE, N.; SCUTELNICU, E. COMPARATIVE STUDY ON CLADDING TECHNIQUES. **The Annals of " Dunarea de Jos" University of Galati. Fascicle XII: Welding Equipment and Technology**, v. 23, p. 34, 2012.

FUNDERBURK, S. SpinArc™ welding system explained. **Welding Journal.**2015 94(6): 34-37.

GALLAZI, G.; RIGOAL, S.; KUBENKA, M. Practical applications of ESAB strip cladding technology. **Steel Times International**, v. 31, n. 7, p. 40, 2007.

GUZMAN-FLORES, Isidro et al. Effect of torch weaving on the microstructure, tensile and impact resistances, and fracture of the HAZ and weld bead by robotic GMAW process on ASTM A36 steel. **Soldagem & Inspeção**, v. 22, n. 1, p. 72-86, 2017.

GOMES, J. H. F. de; **Análise e otimização da soldagem de revestimento de chapas de aço ABNT 1020 com utilização de arame tubular inoxidável austenítico.** 2010.

HIRATA, E. K. et al. Influência da corrente sobre o rendimento bruto de fusão em soldagem MIG/MAG. **Soldagem & Inspeção**, v. 19, n. 2, p. 159-167, 2014.

KANNAN, T.; MURUGAN, N. Effect of flux cored arc welding process parameters on duplex stainless steel clad quality. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 176, n. 1-3, p. 230-239, 2006.

KUO, I. C. et al. Submerged Arc Stainless Steel Strip Cladding—Effect of Post-Weld Heat Treatment on Thermal Fatigue Resistance. **Journal of materials engineering and performance**, v. 18, n. 2, p. 154-161, 2009.

LARA, Mauricio et al. Effect of transverse arc oscillation on morphology, dilution and microstructural aspects of weld beads produced with short-circuiting transfer in GMAW. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 42, n. 9, p. 1-13, 2020.

LOPES, P. E. K.; MACHADO, A. A.; COLAÇO, F. H. G.. **Efeito do Ângulo da Tocha na Penetração do Cordão com Transferência Metálica por Spray**. 2017.

MODENESI, P. J., MARQUES, P. V., & BRACARENSE, A. Q. **Soldagem Fundamentos e Tecnologia (Vol. 3ª)**. Belo Horizonte: UFMG, 2005.

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem: fundamentos e tecnologia. 3. ed.** Belo Horizonte: UFMG, 2011. 363 p.

MALLYA, U. D.; SRINIVAS, H. S. Magnetic steering of arc and bead characteristics in submerged arc strip cladding. **Welding journal**, v. 72, n. 11, 1993.

PAL, K.; PAL, S. K. Study of weld joint strength using sensor signals for various torch angles in pulsed MIG welding. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, v. 3, n. 1, p. 55-65, 2010.

PHILLIPS, A. L. **Welding Handbook: Special Welding Processes and Cutting**. London: American Welding Society, 1965b. 4. Vol. 3.

PESSOA, A. R. P. et. al. **Seleção de Parâmetros Através do Método Taguchi para Soldagem de Revestimento com ligas de Níquel pelo Processo MIG/MAG**. **Soldagem & Inspeção**, v.15, n.4, p.317 - 324, Out./Dez., 2010.

RESENDE, A. A. de; SCOTTI, A. Influência dos Níveis das Correntes, Ângulo de Inclinação da Tocha e Distância entre a Tocha e a Peça sobre a Geometria do Cordão de Solda Usando “Plasma-MIG” com Arcos Concêntricos. **Soldag. insp.**, São Paulo, v. 20, n. 4, p. 501-514, Dec. 2015.

RODE, A. C. **Desenvolvimento e Avaliação da Soldagem a Arco Submerso com Tecimento Transversal**. 2020.

ROMCY, F. A. M. **Estudo exploratório dos efeitos das variáveis de soldagem por arco submerso sobre depósitos de revestimento duro utilizando fluxo ligado**. 2017.

Santos RLC. **Deposição por plasma de arco transferido com corrente contínua pulsada** [dissertação de mestrado]. Curitiba: Universidade Federal do Paraná; 2003.

SCHAEFFER, Claudio Marques. **Adequação do procedimento de soldagem por arco submerso para o revestimento com arame inconel 625**. 2017. Tese de Doutorado.

SIEWERT, T. A., TREVISAN R. E., PURTSCHER P. T. The Effect of Electrode Weave Procedure on HY-80 GMA Welds Although the weld interface area displays a lower toughness than the base material or weld center, the fractures exhibit acceptable ductility - Fracture and Deformation Division, National Bureau of Standards, **Welding research supplement** Nova York p. 203 -209-s, 1987.

TASALLOTI, H.; KAH, P.; MARTIKAINEN, J.. Effects of welding wire and torch weaving on GMAW of S355MC and AISI 304L dissimilar welds. **The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology**, [s.l.], v. 71, n. 1-4, p.197-205, 22 nov. 2013. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-013-5484-x>.

THAKARE NIRAJ, S.; YADAV, Ram. Electro Slag Strip Cladding Process. **Int'l J. of Modern Engineering Research**, v. 4, p. 60-64, 2014.