

CLAUDIO MARQUES SCHAEFFER

ADEQUAÇÃO DO PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM POR ARCO SUBMERSO  
PARA O REVESTIMENTO COM O ARAME INCONEL 625

Florianópolis 2017

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA  
CATARINA  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE METAL MECÂNICA PROGRAMA DE PÓS-  
GRADUAÇÃO *STRICTO SENSU* EM MECATRÔNICA

CLAUDIO MARQUES SCHAEFFER

ADEQUAÇÃO DO PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM POR ARCO SUBMERSO  
PARA O REVESTIMENTO COM ARAME O INCONEL 625

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Mecatrônica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Mecatrônica.

Professor orientador: Nelso Gauze Bonacorso

Professor coorientador: Erwin Werner Teichmann

Florianópolis-SC  
Dezembro/2017

S294a

Schaeffer, Claudio Marques

Adequação do procedimento de soldagem por arco submerso para o revestimento com arame iconel 625 / Claudio Marques Schaeffer. – Florianópolis, SC, 2017. 54 f.

Orientador: Nelso Gauze Bonacorso.

Coorientador: Erwin Werner Teichmann.

Dissertação (mestrado) – Instituto Federal de Santa Catarina, Departamento Acadêmico de Metal Mecânica, Programa de Pós-Graduação em Mecatrônica, 2017.

1. Estratégia de revestimento. 2. Métodos de revestimento. 3. Soldagem robotizada. 4. SAW. 5. Superliga. I. Bonacorso, Nelso Gauze, orient. II. Teichmann, Erwin Werner, coorient. III. Título.

CDD 671.52

ADEQUAÇÃO DO PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM POR ARCO SUBMERSO  
PARA O REVESTIMENTO COM O ARAME INCONEL 625

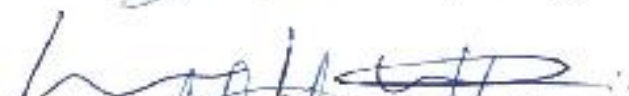
CLAUDIO MARQUES SCHAEFFER

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em  
Mecatrônica e aprovada na sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em  
Mecatrônica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa  
Catarina

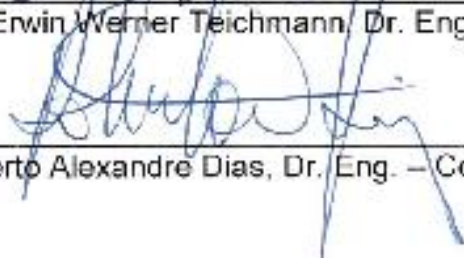
Florianópolis, 19 de Dezembro de 2017



Prof. Nelso Gauze Bonacorso, Dr. Eng. – Orientador



Prof. Erwin Werner Teichmann, Dr. Eng. – Coorientador

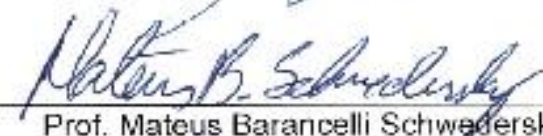


Prof. Roberto Alexandre Dias, Dr. Eng. – Coordenador do Curso

Banca Examinadora:



Prof. Nelso Gauze Bonacorso, Dr. Eng. – Presidente



Prof. Mateus Barancelli Schwedersky, Dr. Eng. – Titular



Sr. Raul Gohr Junior, Dr. Eng. - Titular

Dedico este trabalho aos professores brasileiros de engenharia pelo comprometimento com seus alunos diante de tantas adversidades.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus por me permitir viver mais este dia.

A meus pais por tudo o que eles são e representam.

À minha esposa Cheila por estar sempre ao meu lado me incentivando e confiando em minhas decisões.

À empresa IMC na pessoa do Sr. Dr. Eng<sup>o</sup> Raul Gohr Junior Pela sua disponibilidade em nos auxiliar ao longo deste trabalho.

À empresa PRECICAST Ltda pelas análises realizadas.

À empresa ESAB pela doação feita a este trabalho.

Ao meu orientador Prof. Dr. Nelso G. Bonacorso pela confiança, sua experiência, seus conhecimentos, sua paciência e por estar sempre presente durante a realização deste trabalho. Exemplo como profissional e pessoa, graças a ele hoje eu posso enxergar mais longe.

Ao meu coorientador Prof. Dr. Erwin W. Teichmann por pavimentar meu caminho na pós-graduação e pela amizade construída ao longo deste trabalho.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecatrônica do Instituto Federal de Santa Catarina.

À Sra. Malu Pereira pelos conselhos e pela amizade.

Aos bolsistas do Programa de Ensino Tutorial, em especial ao graduando em Engenharia Mecatrônica Luan Medeiros pela amizade.

À Área de Processos Industriais do Instituto Federal de Santa Catarina Câmpus Lages, em especial:

Ao Prof. Me. Alisson Agusti pelas aulas de CLP.

Ao Prof. Me. Anderson Borges pelas aulas de DAS3.

Ao Prof. Esp. Ariton Araldi pelo incentivo em entrar no programa.

Ao Prof. Me. Gabriel Madruga pelas aulas de elétrica e pelo Código Bro.

Ao Prof. Me. Gianpaulo Medeiros por me ajudar com as minhas aulas.

Ao Prof. Me. Jeferson Fraytag pelas aulas de eletrônica.

Ao Prof. Me. Rafael Grebogi pelas aulas de robótica e pelos cafés.

*A todos os professores que iluminaram meu caminho até aqui.*

*Vocês fizeram a diferença em minha vida, obrigado.*

“Se pude enxergar mais longe foi porque me apoiei sobre ombros de gigantes.”

Isaac Newton

## RESUMO

A soldagem por arco submerso (SAW) é amplamente utilizada como processo de união em uma grande variedade de indústrias. Geralmente, o material de adição é do tipo arame com diâmetro superior a 1,6 mm. Para aplicações de revestimento de superfícies metálicas, o processo SAW utiliza normalmente fitas como material de adição e equipamentos de soldagem específicos com maior capacidade de corrente elétrica. Com o objetivo de reduzir os custos, tanto do material de adição, quanto os de aquisição de equipamentos, a presente dissertação trata da adequação do processo SAW, operando com polaridade positiva no modo tensão constante para realizar revestimentos em superfícies de aço 1010 com o arame Inconel 625 de diâmetro 1,143 mm e o fluxo ESAB 10.93. Os parâmetros do procedimento de soldagem dos cordões foram obtidos de forma experimental via análise dimensional das respectivas seções transversais. Foram obtidos cordões de solda com diluição abaixo de 6% e relação R/L inferior a 0,3 com superfície do corpo de prova inclinada em 10° e sentido de soldagem descendente puxando com ângulo de ataque de 10°. Um novo método de revestimento, baseado na execução dos cordões de solda ímpares para depois realiza os pares, é proposto com o objetivo de incrementar a produção do procedimento. Os resultados obtidos com esta estratégia de revestimento foram: diluição menor que 12%, teor de ferro na superfície inferior a 8%, 7,2 kg/h de taxa de fusão do arame, 0,25m<sup>2</sup>/h de produção e reforço médio de 3,08mm com uma variação de  $\pm 0,56$  mm.

**Palavras-chave:** Estratégia de revestimento, Método de revestimento, Soldagem robotizada, SAW, Superliga.



## ABSTRACT

The Submerge Arc Welding (SAW) is widely used in the industry for union, this process uses 1,6 mm diameter or greater wire. For applications of metallic surface cladding, the SAW process commonly uses stripes as addition material, whereas specific welding equipments are necessary, because of the electric current demand. Aiming lowering the costs, either reducing the addition material, or reducing the cost of buying equipment, this work lies on the tuning of the SAW process. It proposes the process may be operated on the positive polarity voltage mode for the application of 1,143 mm diameter Inconel 625 wire and ESAB10.93 flux, for the cladding in 1010 steel surfaces. The cladding procedure and parameters was defined based on the macro graphic and visual analysis of the transversal section of the welding bead. The task was to weld a 10° inclined surface part, applying descending welding way and keeping an attack angle of 10° with respect to the surface for the “pulling wire”. The result was a welding bead dilution value below 6% and R/L relation below 0,3 using a fusion rate of 7,2 kg/hour. A novel method for the cladding based on two steps is proposed in this work. First the odd welding beads are done, then the even welding beads. This process is proposed to cut out the time without electric arc between each welding bead, traditionally used for slag removing after each welding bead. To verify the new method, a cladding using three welding beads was done. The results obtained were a dilution value below 12%, less than 8% of iron content, average reinforcement around  $3,18 \pm 0,56$  mm and a production rate of 0,25 m<sup>2</sup>/hour.

**Key-words:** Cladding strategy; Cladding method; Robotized Welding; SAW; Superalloy.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Perfil de um cordão de solda.....	18
Figura 2 – Aplicação de fita no processo de revestimento. ....	21
Figura 3 – Representação esquemática do processo SAW. ....	25
Figura 4 – Evolução do registro de imagens do processo SAW: (A) 1964, Pokhodnya, arame de 6 mm, 470 A, 29 V, raio X; (B) 1965, Franz, arame de 3 mm, 470 A, 31 V, óptico; (C) 1981, Akahide, arame de 4,8 mm, 500 A, 40 V, raio X; (D) 2014, Mendez, arame de 3,2 mm, 500 A, 30 V, óptico; (E) 2015, Reisgen, arame de 2 mm, 435 A, 28 V, óptico; (F) 2017, Sengupta, 500 A, 30 V, óptico.....	26
Figura 5 – Modelo físico do cateter: (a) Transferência globular repulsiva, (b) Guiada pela parede do fluxo sem curto-circuito, (c) Guiada pela parede do fluxo com curto-circuito.....	27
Figura 6 – Experimentos realizados com 30 V e 500 A com diferentes fluxos: (A) Lincolnweld 760 M, (B) Lincoln ES200 e (C) Lincolnweld 980.....	28
Figura 7 – Influência da camada de fluxo na qualidade do cordão, (a) altura correta, (b) pouco fluxo.....	29
Figura 8 – Influência da corrente na geometria do cordão de solda para o mesmo valor de tensão aplicada. ....	29
Figura 9 – Influência da tensão aplicada na geometria do cordão de solda para o mesmo valor de corrente de soldagem. ....	30
Figura 10 – Influência da velocidade de soldagem na geometria do cordão de solda.....	31
Figura 11 – Relação diâmetro do eletrodo penetração para mesma intensidade de corrente:(a) Diâmetro menor; (b) Diâmetro maior. ....	31
Figura 12 – Influência do diâmetro do arame na geometria do cordão de solda .....	32
Figura 13 – Distância bico de contato peça.....	32

Figura 14 – Influência da DBCP na macro do cordão com velocidade de alimentação constante em 7 m/min, velocidade de soldagem em 22 cm/min e tensão em 40 V. (a) DBCP de 20 mm, (b) DBCP de 30 mm. ....	33
Figura 15 – Influência do sentido de soldagem aliado à posição do material de base na geometria do cordão considerando a tocha sempre paralela ao material de base: (a) Movimento descendente da tocha com material de base inclinado; (b) Movimento da tocha e posição do material de base paralelos ao solo; (c) Movimento ascendente da tocha com o material de base inclinado. ....	34
Figura 16 – Bancada de ensaios do processo SAW. ....	35
Figura 17 – Em (a) a máquina de eletroerosão a fio e em (b) estereoscópio Zeiss. ....	36
Figura 18 – Espectrômetro de emissão ótica Spectromaxx LMX 06 ....	36
Figura 19 – Estratégias de soldagem: (a) ascendente empurrando e em (b) descendente puxando. ....	38
Figura 20 – Etapas do método de revestimento: A - produção dos cordões ímpares, B - remoção da escória dos cordões ímpares, C - produção dos cordões pares e D - remoção da escória dos cordões pares. ....	39
Figura 21 – Método gráfico para a determinação da distância entre dos cordões de solda do revestimento. ....	40
Figura 22 – Esquema de medição do ângulo da borda do cordão. ....	41
Figura 23 – Cordões de solda realizados na Fase 1: (a) Aspectos visuais; (b) Macros. ....	42
Figura 24 – Cordão produzido na posição plana com o Inconel 625 e o fluxo neutro ESAB 429. ....	44
Figura 25 – Cordões de solda realizados na fase 2: (a) Aspectos visuais, (b) Macros. ....	45
Figura 26 – Comportamento da tensão e da corrente do arco no processo SAW-DCEP na produção do cordão de solda 44 ....	47
Figura 27 – Revestimento SAW-DCEP feito no sentido descendente puxando: (a) Aspecto visual; ....	47

(b) Macrografia .....	47
Figura 28 – Pontos do revestimento analisados.....	48
Figura 29 – Produção dos cordões ímpares da primeira etapa do novo método de revestimento. ....	50
Figura 30 – O revestimento de 5 cordões obtido com o processo SAW-DCEP: (a) Aspecto visual; (b) Macrografia.....	50

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Histórico dos principais processos de soldagem .....	17
Tabela 2 – Competitividade entre os principais processos de revestimento. .	20
Tabela 3 – Parâmetros de soldagem com fita. ....	21
Tabela 4 – Variantes do processo SAW. ....	24
Tabela 5 – Composição do aço SAE 1010 .....	34
Tabela 6 – Composição do arame de Inconel 625. ....	35
Tabela 7 – Composição química do arame ER70S-6 em valores percentuais... .....	37
Tabela 8 – Parâmetros utilizados na realização dos cordões de soldada fase 1 .....	42
Tabela 9 – Resultados das macrografias fase 1 .....	43
Tabela 10 – Parâmetros utilizados na realização do cordão de solda com o aramé Inconel 625.....	43
Tabela 11 – Resultados da macrografia do C.P. 10 .....	44
Tabela 12 – Parâmetros utilizados na realização dos cordões de soldada fase 2. ....	45
Tabela 13 – Resultado das macrografias da fase 2. ....	46
Tabela 14 – Parâmetros medidos e calculados da macrografia da Figura 27. ....	48
Tabela 15 – Análise química do revestimento da Figura 29 em percentual de massa. ....	49
Tabela 16 – Parâmetros medidos e calculados da macrografia da Figura 30b. ....	50

## SIMBOLOGIA

AC – Antes de Cristo

Ad – Área depositada

Af – Área fundida

Al – Alumínio

AWS – *American Welding Society*

C – Carbono

C.P. – Corpo de prova

Cb – Cobalto

cm – centímetro

CMT – *Cold metal transfer*

Cr – Cromo

D% – Diluição

DBCP – Distância bico de contato peça

ESW – *Electroslag welding*

FCAW – *Flux-cored arc welding*

Fe – Ferro

FSW – *Friction stir welding*

GMAW – *Gas metal arc welding*

GTAW – *Gas tungsten arc welding*

h – hora

IB – Corrente de base

ICE – *Integrated cold electrode*

IP – Corrente de pico

Kd – Indutância de descida

kg – quilo grama

kJ – quilo Jaule

Ks – Indutância de subida

L – Largura da solda

La – Comprimento do arco

LBW – *Laser beam welding*

Lel – Extensão do eletrodo

MAG – *Metal active gas welding*

MIG – *Metal inert gas welding*

min – minuto

mm – milímetro

MMA – *Manual metal arc welding*

Mn – Manganês

Mo – Molibdênio

Nb – Nióbio

Ni – Níquel

OAW – Oxy Acetylene Welding

P – Fósforo

P – Penetração da solda

PAW – *Plasma arc welding*

R – Reforço da solda

S – Enxofre

SAW – *Submerged arc transfer*

SMAW – *Shielded metal arc welding*

Tb – Tensão de base

TD – Taxa de depósito

Ti – Titânio

TIG – *Tungsten inert gas welding*

TP – Tensão de pico

TW – *Thermit welding*

V – Volts

Vs – Velocidade de soldagem

$\alpha$  – Alpha, ângulo do corpo de prova em relação ao solo

$\phi$  – Phi, ângulo entre a normal e o eixo da tocha

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>17</b>
1.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA.....	21
1.2 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA .....	22
1.3 OBJETIVOS .....	22
1.3.1 OBJETIVO GERAL.....	22
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	23
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	23
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>24</b>
2.1 A SOLDAGEM SAW .....	24
2.2 CARACTERÍSTICAS DO PROCESSO SAW DE REVESTIMENTO.....	25
2.2.1 CORRENTE DE SOLDAGEM .....	29
2.2.2 TENSÃO .....	30
2.2.3 VELOCIDADE DE SOLDAGEM .....	30
2.2.4 DIÂMETRO DO ELETRODO.....	31
2.2.5 EXTENSÃO DO ELETRODO .....	32
2.2.6 INCLINAÇÃO DO MATERIAL DE BASE .....	33
<b>3 MATERIAIS, EQUIPAMENTOS E MÉTODOS</b> .....	<b>34</b>
3.1 MATERIAIS.....	34
3.2 EQUIPAMENTOS .....	35
3.3 METODOLOGIA .....	37
3.3.1 PRODUÇÃO DE CORDÕES DE SOLDA EXPLORATÓRIOS .....	37
3.3.2 DETERMINAÇÃO DA ESTRATÉGIA DE SOLDAGEM.....	37
3.3.3 DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO DE REVESTIMENTO.....	38
3.4 CRITÉRIOS PARA VALIDAÇÃO DE REVESTIMENTOS .....	40
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>41</b>
4.1FASE 1: PRODUÇÃO DE CORDÕES DE SOLDA EXPLORATÓRIOS .....	41
4.2FASE 2: ESTRATÉGIA DE SOLDAGEM.....	44
4.3 FASE 3: MÉTODO DE REVESTIMENTO.....	47
<b>5 CONCLUSÕES</b> .....	<b>51</b>
<b>6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS</b> .....	<b>52</b>



## 1 INTRODUÇÃO

Peças de ouro datadas da idade do bronze a aproximadamente 5.000 AC, mostravam indícios de terem sido produzidas com o processo de soldagem por pressão. Peças de aço datadas da idade do ferro, aproximadamente 3.500 AC, encontradas no antigo Egito mostravam indícios de soldagem por pressão e brasagem. Na Idade Média, ferreiros já utilizavam a forja para realizar soldagem por caldeamento. Mas foi no século XIX, conforme apresenta a Tabela1, que a soldagem deu um salto com a invenção dos processos por resistência e oxidocombustível, passando pelo séc. XX com os processos GTAW, GMAW e SAW entre outros, chegando no séc. XXI com processos como o CMT que é uma variante do processo GMAW.

Tabela 1 – Histórico dos principais processos de soldagem.

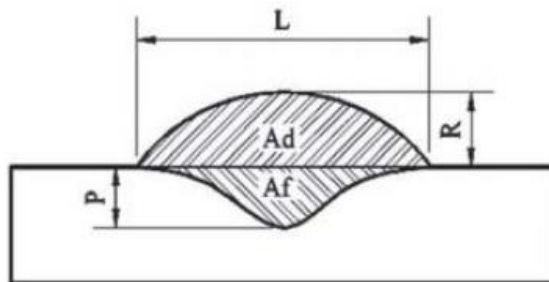
Ano	Processo de soldagem	Abrev.	Inventores	Instituto	País
1886-1900	Por resistência		Elihu Thomson	Thomson Electric Welding	EUA
1900	Oxidocombustível	OAW	Edmund Fouche, Charles Picard		França
1900	Aluminotermia	TW	Goldschmidt	Goldschmidt AG	Alemanha
1907	A arco manual	MMA, SMAW	Oscar Kjelberg	ESAB	Suécia
1908	Por eletroescória	ESW	N. Bernardos		Rússia
1909	Plasma	PAW	Schonner, R.M. Gage	Basf	Alemanha
1920	TIG	TIG, GTAW	C.L. Coffin		EUA
1926	Com arame tubular	FCAW	Stoody		EUA
1930	MIG	MIG, GMAW	H.M. Hobart e P.K. Devers	Airco Battelle	EUA
1930	Arco submerso	SAW	Robinoff	National Cube Co.	EUA
1953	MAG	MAG, GMAW	Lyubavskii e Novoshilov		USSR
1966	Corte laser		Peter Houldcroft	BWRA (TWI)	Inglaterra
1970	União laser	LBW	Martin Adams		Inglaterra
1991	Por fricção	FSW	Wayne Thomas e outros	TWI	Inglaterra
2009	<i>Cold metal transfer</i>	CMT	Manfred Schorghuber	Fronius	Austria

FONTE: ESAB 2005 Adaptada

A soldagem iniciou como um processo para a união de peças, preenchimento de cavidades e finalmente como processo de revestimento de superfícies. Esta última aplicação serve para proteger e aumentar o tempo de vida útil de superfícies de peças expostas a processos industriais que sofrem abrasão, corrosão e até mesmo a própria cavitação. São exemplos de setores industriais que demandam melhorias nesta área: química, geração de energia elétrica, extração e transporte de petróleo, entre outros.

Para isso, é necessário procurar algumas características associadas ao processo e ao respectivo procedimento para cumprir os requisitos técnicos especificados. A geometria da secção transversal do cordão, conforme Figura 1 serve como referência para as medições que irão qualificar a solda. No caso de aplicações de revestimento além da ausência de defeitos nos cordões de solda e em suas sobreposições, a penetração e a diluição, Equação 1, devem ter níveis mínimos para garantir a qualidade pretendida (MINÁ, 2016).

Figura 1 – Perfil de um cordão de solda.



FONTE: Pessoa (2010)

Onde:

$L$  = Larura média (mm);

$P$  = Penetração (mm);

$R$  = Reforço (mm);

Sendo:

$$D = \frac{Af}{(Ad + Af)} 100 \quad (1)$$

Onde:

$D$  = Diluição (%);

$Af$  = Área fundida (mm<sup>2</sup>);

$Ad$  = Área depositada média (mm<sup>2</sup>);

Os revestimentos podem ser feitos com uma ou várias camadas. Ao se analisar um revestimento feito com uma única camada observa-se uma tendência de diminuição da resistência à corrosão com o aumento da diluição (ABIOYE et al, 2015; MADALENA et al, 2015). Por outro lado observa-se uma tendência de aumento da resistência ao arrancamento com o aumento da diluição (SILVA et al, 2015). Dessa forma, encontrar o equilíbrio da resistência à corrosão e ao arrancamento em função da diluição consiste no desafio de determinar qual o melhor processo a ser utilizado.

Os processos de soldagem automáticos mais utilizados para realizar revestimento metálico com o Inconel 625 de superfícies são os que utilizam gás ativo ou inerte como o GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) e seu derivado CMT (*Cold Metal Transfer*), o TIG (*Tungsten Inert Gas*) e seus derivados TIP TIG e TOP TIG que conseguem realizar revestimentos com uma altura de 1,5 mm, o plasma com alimentação de pó (PTAP) e o que utiliza fluxo SAW (*Submerged Arc Welding*), (TEICHMAN, 2016).

Atualmente, a soldagem por arco submerso é amplamente utilizada como processo de união em uma grande variedade de indústrias. Geralmente, o material de adição é do tipo arame com diâmetro superior a 1,6 mm. As principais vantagens desse processo são a economia em função de seu alto rendimento que proporciona maior taxa de deposição em relação aos processos supracitados com proteção gasosa, a facilidade de treinar os operadores na mecanização, maior versatilidade pelo uso de múltiplos arames e as condições favoráveis ao operador, como: a ausência de respingos, invisibilidade do arco e pouca fumaça. Além disso, as tochas e os periféricos utilizados são mais baratos que as utilizadas em processos que usam a fita como material de adição.

As desvantagens são a utilização de fontes de soldagem de grande capacidade de corrente elétrica, a grande poça de fusão que limita a maioria das soldagens à posição plana e a necessidade de manusear o fluxo novo e o usado. A aplicação do processo SAW na posição vertical ainda está em desenvolvimento e depende de novos dispositivos para manter o processo estável.

Atualmente os diferentes procedimentos de revestimento competem entre si, possibilitando ao setor de engenharia das empresas demandantes de revestimento selecionar o que possui a menor relação custo/benefício. Com este foco, a Tabela 2

apresenta as informações quanto a produtividade e a qualidade dos principais processos de revestimento da atualidade.

Tabela 2 – Competitividade entre os principais processos de revestimento.

Processo	Vs (cm/min)	TD (kg/h)	Fe na primeira camada (%)	Fe na segunda camada (%)
Eletrodo Revestido	-	1,40	17,20	5,81
GMAW Pulse Argon	60,00	3,81	13,53	2,98
TIG Hot wire	25,00	1,61	7,35	1,34
Plasma	25,00	1,44	8,01	1,34
Laser Hybrid	210,00	5,19	16,37	3,96
CMT Ni 10	60,00	4,61	2,38	0,37
Time Twin Ni 10	60,00	10,72	15,69	3,60
<sup>1</sup> SAW Fita	13,00	17,00	11,91	3,28

FONTE: Rutzinger (2014), <sup>1</sup>ESAB (2008)

O Eletrodo Revestido é um processo manual e com pouca eficiência que é utilizado no processo de revestimento de recuperação de pequenas áreas.

O *GMAW Pulse Argon* largamente utilizado na indústria pelas suas características de aplicação em diversas posições, mas que ainda possui limitações devido a sua qualidade superficial da solda devido a proteção do gás que facilita a formação de respingos.

O Processo *TIG Hot Wire* é utilizado principalmente pela indústria petroquímica devido a sua baixa espessura na primeira camada e boa qualidade superficial.

O *Laser Hybrid* ainda é pouco utilizado devido a seu alto custo operacional e aplicações específicas.

O CMT é um processo que foi idealizado para a soldagem de alumínio na indústria automobilística, mas vem ganhando espaço na soldagem de revestimento devido à baixa diluição com apenas a primeira camada.

Apesar do *Time Twin Ni 10* ter alta taxa de deposição, o procedimento precisa de duas fontes de energia de baixa capacidade de corrente para realizar o revestimento, enquanto que o processo SAW com fita exige uma única fonte de energia, mas com alta capacidade de corrente.

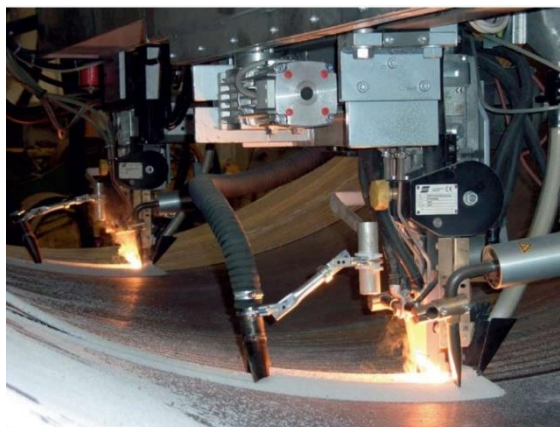
Diante de todo o exposto, desenvolver um procedimento de revestimento competitivo com velocidade de soldagem e taxas de deposição melhores para o

processo SAW com o arame Inconel 625 é o desafio a ser superado e ao mesmo tempo a motivação deste trabalho.

## 1.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

No revestimento com o processo SAW é comum o uso de fitas, Figura 2, ao invés do arame o que permite a produção de cordões de solda mais largos, reduzindo assim, o número de passes de revestimento. Normalmente, as fitas têm dimensões variadas com largura de 30 a 100 mm e espessura de 0,5 mm.

Figura 2 – Aplicação de fita no processo de revestimento.



FONTE: ESAB (2008).

Com este tipo de material de adição é necessário o uso de alimentador automático específico e fonte de soldagem com alta capacidade de corrente, conforme mostra os parâmetros da Tabela 3 aplicados no revestimento da Figura 2. Estas características operacionais necessárias elevam o custo do procedimento com fita, tornando o processo menos competitivo para o revestimento de superfícies.

Tabela 3 – Parâmetros de soldagem com fita.

Material de adição / Fluxo	Fita OK 11.62 SAW de 60,0 x 0,5 mm / OK 10.05
Tensão aplicada (V)	26,0
Corrente média medida (A)	750,0
Densidade de corrente (A/mm <sup>2</sup> )	25,0
Velocidade de soldagem (m/min)	0,1
Energia (kJ/mm)	11,7
Altura do cordão (mm)	4,5
Largura do cordão (mm)	65,0
Diluição (%)	18,0
Número de camadas	2,0
Taxa de deposição (kg/h)	14,0
Consumo de Fluxo (kg/kg de fita)	0,8

FONTE: ESAB (2008).

## **1.2 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA**

O presente trabalho se justifica pela crescente demanda de processos de soldagem de revestimentos mais efetivos, com qualidade melhor e custo mais baixo. Como exemplos podem ser citados dois dentre os segmentos da indústria que dependem deste tipo de operação:

- A indústria petrolífera, na extração de petróleo junto a reservas de pré-sal, utiliza tubos revestidos com Inconel de forma a proteger as paredes internas destes contra a abrasão e a corrosão. Além da PETROBRÁS, todas as empresas que transportam e armazenam petróleo utilizam este tipo de revestimento, não só nos tubos de prospecção e transporte, mas também nas paredes metálicas de tanques de armazenamento (SANTOS et al, 2015).
- O aumento do tempo de utilização das termelétricas brasileiras, devido crescente demanda por energia elétrica em períodos de escassez de chuvas está gerando um aumento na manutenção das caldeiras. Neste sentido estão sendo desenvolvidas e aplicadas técnicas para evitar a substituição de tubos de caldeiras pela operação de soldagem de revestimento na fabricação de novos painéis tubulares e recuperação destes (CARVALHO et al., 2008).

## **1.3 OBJETIVOS**

### **1.3.1 OBJETIVO GERAL**

Com base na relevância do tema, o objetivo geral deste trabalho de dissertação é o de adequar o procedimento automático de soldagem por arco submerso para o revestimento anticorrosivo de superfícies metálicas com o arame sólido de Inconel 625.

### **1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Desenvolver estratégia de soldagem para proporcionar cordões de solda com reduzida penetração e diluição;
- Criar um método de revestimento SAW mais produtivo em termos de maior tempo de arco aberto e que proporcione revestimentos mais lisos;
- Desenvolver o procedimento SAW para proporcionar revestimentos de boa qualidade, com baixa diluição e reduzido teor de ferro na superfície;
- Desenvolver o procedimento SAW para produzir revestimentos com maior taxa de fusão do arame e maior produção em termos de cobertura do metal de base do que os processos com proteção gasosa;
- Reduzir o custo de produção dos revestimentos pelo uso de arame com equipamentos de soldagem convencionais de baixa capacidade de corrente no lugar de fita com seus equipamentos específicos de alto custo;

### **1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO**

Para alcançar os objetivos propostos, o presente trabalho está estruturado em cinco capítulos sendo o primeiro capítulo, a própria introdução do tema.

No segundo capítulo, encontra-se um histórico e a fundamentação teórica sobre o processo SAW, abordando suas principais características, vantagens, desvantagens e sua automatização e a influência de suas principais variáveis na soldagem.

No terceiro capítulo, são descritas as características dos corpos de prova, os insumos utilizados, os equipamentos da bancada de soldagem, as três fases da metodologia de soldagem empregada e os critérios de aprovação de revestimentos.

No quarto capítulo são apresentados os resultados obtidos nas três fases da metodologia aplicada com respectivas observações e discussões.

No quinto, e último capítulo, encontram-se a conclusão desta pesquisa e sugestões para desenvolvimento de trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA





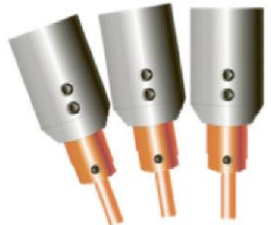


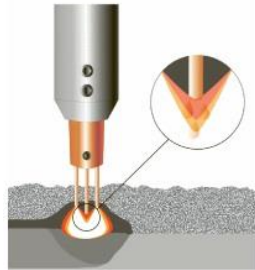
### 2.1 A SOLDAGEM SAW

Robinoﬀ (1930) patenteou o processo SAW para a soldagem de união de chapas, e sua utilização se consolidou na IIª Guerra Mundial na produção de produtos de grande porte como navios. A soldagem por arco submerso (SAW) se caracteriza pela utilização de fluxo como material fundente agindo como proteção da poça de fusão.

Por não produzir respingos, ser automatizado e robusto, o processo SAW foi inicialmente utilizado para a união, mas por possuírem um bom acabamento superficial e eficiência térmica começou a ser usado em revestimentos internos de tubulações e principalmente em revestimentos externos de eixos com cordões de cobertura helicoidal ao longo de toda a extensão da peça.

Ao longo do tempo foram desenvolvidas variantes do processo SAW, conforme ilustra a Tabela 4, com o objetivo de incrementar a produção em ambos os tipos de aplicações.

Tabela 4 – Variantes do processo SAW.

<i>Single wire</i>	<i>Twin wire</i>	<i>Tandem wire</i>	<i>Twin Tandem</i>
			
<i>Multi wire</i>	<i>Narrow Gap</i>	<i>Strip</i>	<i>ICE™</i>
			

FONTE: Adaptado de ESAB (2017).



A variante *Twin wire* foi desenvolvida com base na patente de Robinoff (*Single wire*) pelo acréscimo de mais um eletrodo na mesma tocha. Neste caso, os dois eletrodos são conectados em uma única fonte de soldagem. Já a variante *Tandem wire* também usa dois eletrodos, porém um em cada tocha e, cada tocha com sua própria fonte de soldagem.

A variante *Twin Tandem* é uma composição das duas anteriores, usa duas tochas, cada uma com sua fonte de soldagem e, dois eletrodos por tocha. Já a variante *Multi wire* é uma extensão da *Tandem wire* pelo acréscimo de mais eletrodos com as respectivas fontes de soldagem.

Para união de peças com abertura estreita foi desenvolvida a variante *Narrow gap* que oscila a tocha na abertura enquanto se desloca no sentido vertical ascendente, enquanto que produção de revestimento foi desenvolvida a variante *Strip* que neste caso usa fita como material de adição.

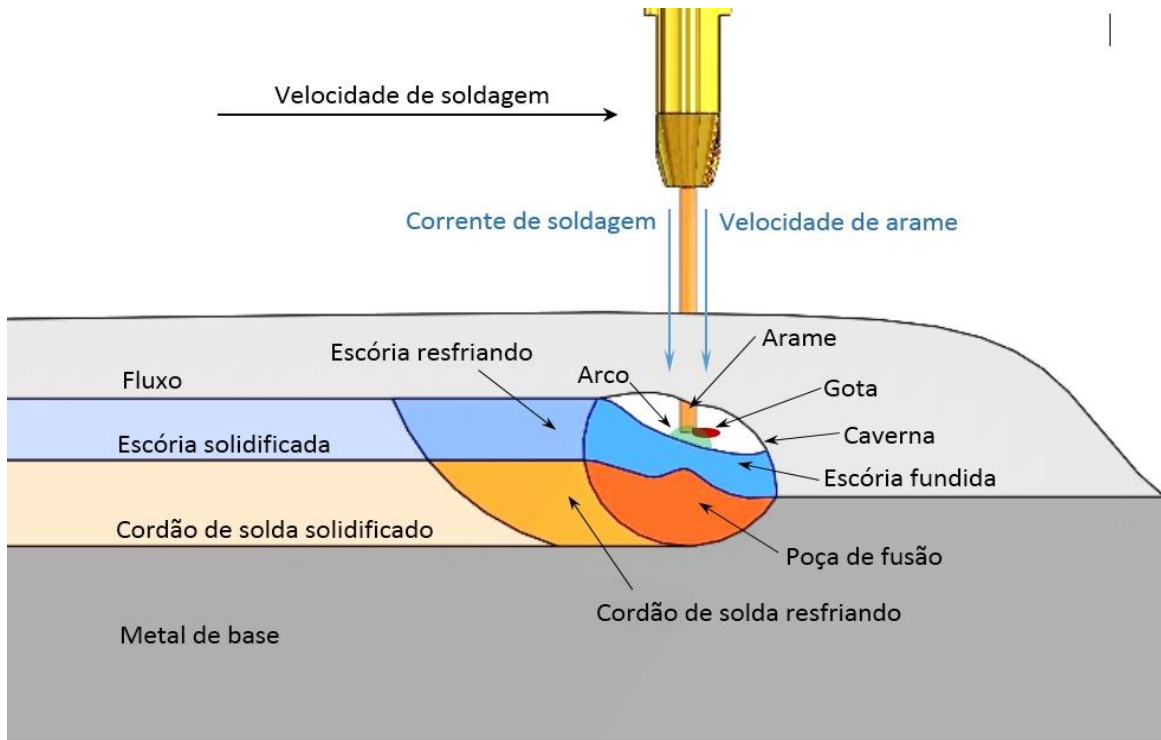
A *Strip Cladding* (fita) é utilizada exclusivamente para a realização de revestimento de grandes áreas, sendo que a altura da primeira camada fica acima de 3 mm devido a sua alta taxa de deposição. Atualmente a Lincoln lançou a fita híbrida que conta com a adição de um arame quente para aumentar a taxa de deposição e diminuir ainda mais a diluição resultante desta variante (LINCOLN, 2017).

A variante *ICE<sup>TM</sup>* (*Integrated Cold Electrode*) nada mais é do que a variante *Twin wire* com a introdução de um eletrodo frio (sem corrente elétrica) entre os dois. Essa variante foi desenvolvida tanto para aplicações de união como mostra a foto da Tabela 4, quanto para revestimento com o sentido de deslocamento da tocha perpendicular ao da foto da Tabela 4.

## **2.2 CARACTERÍSTICAS DO PROCESSO SAW DE REVESTIMENTO**

A soldagem por arco submerso se caracteriza pela formação de uma caverna de fluxo (SENGUPTA e MENDEZ, 2017), conforme a Figura 3, dentro da qual o arco realiza o trabalho de fundir o material de adição e o fluxo, em uma condição influenciada pela formação de campo magnético e gases que formam uma atmosfera crítica.

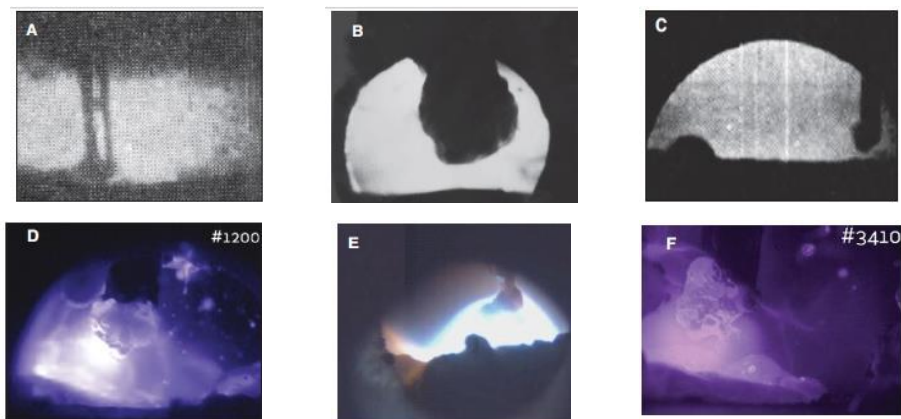
Figura 3 – Representação esquemática do processo SAW.



FONTE: O autor (2017).

No processo SAW a transferência metálica se dá dentro da caverna e, na maioria dos casos, as gotas do material de adição sofrem repulsão e são conduzidas até a poça de fusão pelas paredes da caverna (CHO ET AL, 2013). Registros de imagens pesquisadas (SENGUPTA E MENDEZ, 2017) mostra a evolução do registro de imagens da poça de fusão, conforme Figura 4.

Figura 4 – Evolução do registro de imagens do processo SAW: (a) 1964, Pokhodnya, arame de 6 mm, 470 A, 29 V, raio X; (b) 1965, Franz, arame de 3 mm, 470 A, 31 V, óptico; (c) 1981, Akahide, arame de 4,8 mm, 500 A, 40 V, raio X; (d) 2014, Mendez, arame de 3,2 mm, 500 A, 30 V, óptico; (e) 2015, Reissen, arame de 2 mm, 435 A, 28 V, óptico; (f) 2017, Sengupta, 500 A, 30 V, óptico.



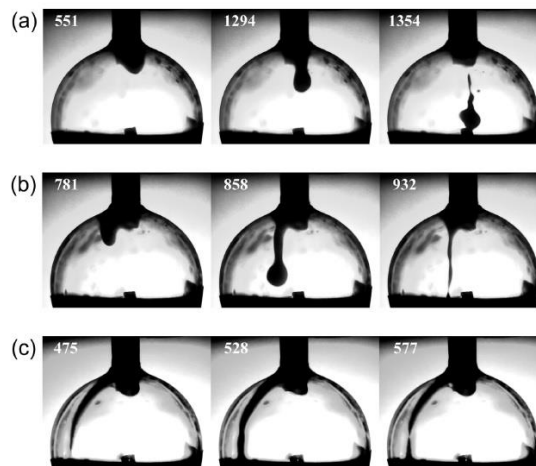
FONTE: Sengupta e Mendez (2017)

Devido ao contato físico da ponta fundida do metal de adição e a escória líquida, diferentes modos de transferência metálica são obtidas em função da intensidade da corrente de soldagem (Li et al, 2017), sendo eles:

- Modo de transferência metálica do tipo globular repulsiva que se dá em baixas intensidades de corrente elétrica. Nesta condição a gota não toca a parede de fluxo se destacando livremente para a poça de fusão, Figura 5a;
- Guiada pela parede do fluxo sem curto-circuito que ocorre em médias intensidades. A gota escorre pela parede da caverna formada pelo fluxo e se destaca antes que ocorra o curto-circuito, Figura 5b;
- Guiada pela parede do fluxo com curto-circuito que se dá em altas intensidades. A gota se movimenta pela parede da caverna até tocar a poça de fusão formando uma ponte com o eletrodo, gerando o curto-circuito, Figura 5c.

Para melhor explicar o fenômeno de transferência metálica os pesquisadores desenvolveram um modelo físico baseado no cateter, conforme mostra a Figura 5.

Figura 5 – Modelo físico do cateter: (a) Transferência globular repulsiva, (b) Guiada pela parede do fluxo sem curto-circuito, (c) Guiada pela parede do fluxo com curto-circuito.



FONTE: Li et al(2017).

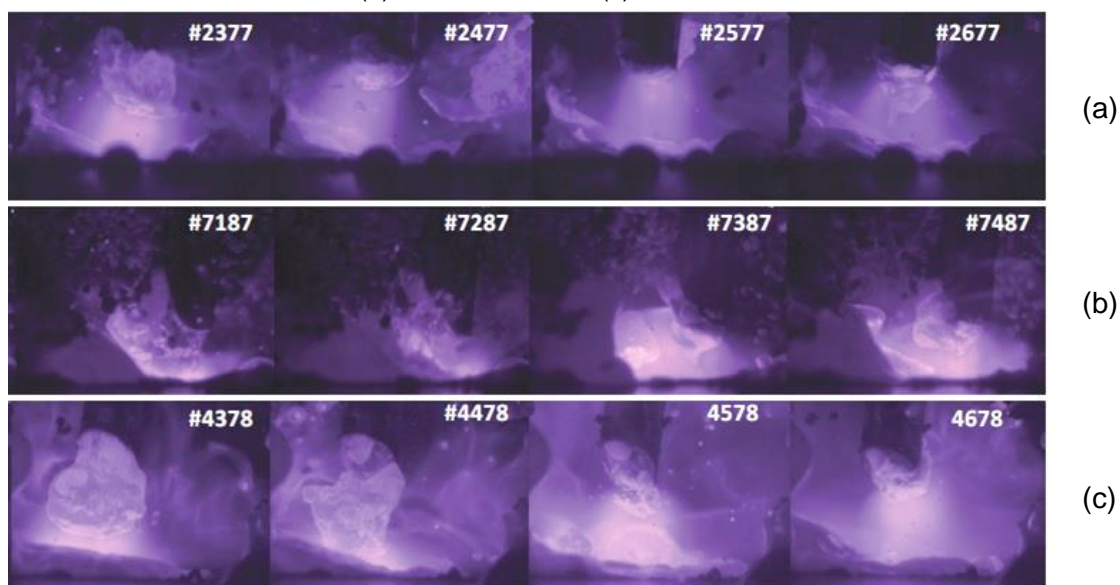
A principal característica da soldagem por arco submerso é a utilização de fluxo, material sólido granuloso composto por minerais, ligas metálicas, óxidos e aglomerantes. Ele pode ser básico, ativo, neutro ou ligado. O fluxo tem o papel fundamental de proteger o arco-elétrico da atmosfera através da formação de uma caverna. Uma vez que o fluxo funde com o material de adição ele se precipita

solidificando e formando uma escória na superfície do cordão. Este fenômeno garante a concentração de energia térmica na poça de fusão com perdas menores que outros processos, além de evitar respingos.

Os dois principais fatores que determinam a escolha do tipo de fluxo são as características de desempenho e as propriedades mecânicas. As principais características de desempenho são: facilidade de remoção da escória, velocidade de soldagem, facilidade de remoção de óxidos, capacidade de condução de corrente elétrica, número de passes e possibilidade de uso de vários arames (ESAB, 2008).

A escolha correta do tipo de fluxo influencia diretamente na qualidade do cordão. Soldas realizadas com o fluxo incorreto formam um cordão que apresenta inclusões, óxidos na superfície e má formação geométrica. Além disso, diferentes fluxos interferem diretamente no destacamento de gota, diâmetro de gota e comprimento do arco, conforme mostra a Figura 6.

Figura 6 – Experimentos realizados com 30 V e 500 A com diferentes fluxos: (a) Lincolnweld 760 M, (b) Lincoln ES200 e (c) Lincolnweld 980



FONTE: Sengupta e Mendez (2017)

Segundo a AWS (2004) a largura e a profundidade da camada de fluxo influencia o desempenho do processo SAW, bem como as características do cordão de solda produzido. Se a camada de fluxo for em excesso, os gases gerados no processo demorarão a sair e causarão uma superfície distorcida e irregular. Se a camada de fluxo for insuficiente apresentará um cordão com aspecto áspero e rugoso, com possível aparecimento de poros, conforme mostra a Figura 7b. A

camada ideal de fluxo, Figura 7a, é determinada aumentando lentamente a quantidade de fluxo, até que o arco elétrico fique submerso de modo que não se visualize mais a sua luminosidade.

Figura 7 – Influência da camada de fluxo na qualidade do cordão, (a) altura correta, (b) pouco fluxo.



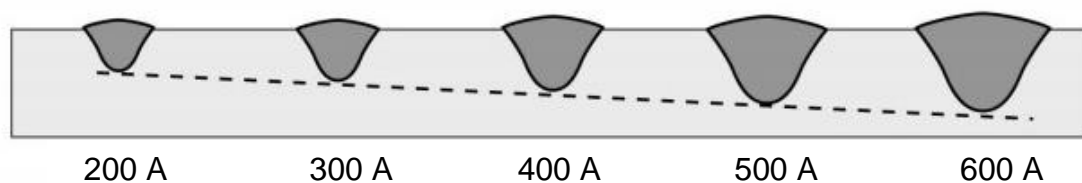
FONTE: ESAB (2004) adaptado.

De acordo com a AWS (2004), as principais variáveis do processo SAW no modo tensão constante são: corrente elétrica, tensão do arco, velocidade de soldagem, diâmetro do eletrodo e a extensão do eletrodo (*stick-out*).

## 2.2.1 CORRENTE DE SOLDAGEM

Para um determinado valor de tensão elétrica aplicada, a intensidade da corrente de soldagem é incrementada via o aumento da velocidade de alimentação do arame. Desta forma, a taxa de fusão do arame e também a penetração do cordão de solda estão diretamente relacionados com a intensidade da corrente elétrica, conforme mostra a Figura 8. Por ser responsável pela fusão do material de adição, a intensidade da corrente vai determinar o tipo de transferência metálica, conforme abordado anteriormente.

Figura 8 – Influência da corrente na geometria do cordão de solda para o mesmo valor de tensão aplicada.



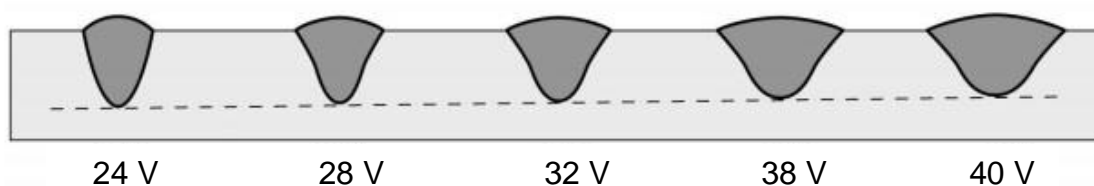
FONTE: Arcspecialties (2017).

### 2.2.2 TENSÃO

A tensão e a corrente são os principais parâmetros a serem ajustados no processo de soldagem (WAINER, 1992). A estabilidade do processo se deve à constância do tamanho do arco, no caso do SAW o arco se mantém protegido pela formação da caverna de fluxo. Esta caverna não pode sofrer colapso, pois isto extinguiria o arco provocando instabilidade no processo e consequentemente defeitos de preenchimento no cordão.

Quanto mais alta for a tensão elétrica aplicada, maior será a altura e o diâmetro do arco elétrico, proporcionando com isso, um incremento da largura do cordão de solda e uma redução da penetração, conforme mostra a Figura 9.

Figura 9 – Influência da tensão aplicada na geometria do cordão de solda para o mesmo valor de corrente de soldagem.

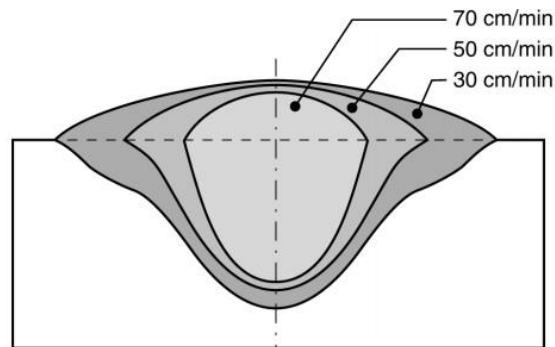


FONTE: Arcspecialties (2017)

### 2.2.3 VELOCIDADE DE SOLDAGEM

A velocidade de soldagem influencia diretamente na produtividade do procedimento e na largura do cordão. Quanto maior a velocidade de soldagem, menor será a largura do cordão (MARQUES, 2009), conforme mostra a Figura 10. Além disso, velocidades altas podem provocar defeitos como inclusão de escória e descontinuidade do cordão de solda. O processo SAW exige uma energia mínima para manter o arco estável devendo gerar a queima correta do fluxo para a formação da caverna que protegerá a poça de fusão (TEICHMANN, 2016). Esta energia deve ser diretamente proporcional à velocidade de soldagem.

Figura 10 – Influência da velocidade de soldagem na geometria do cordão de solda.

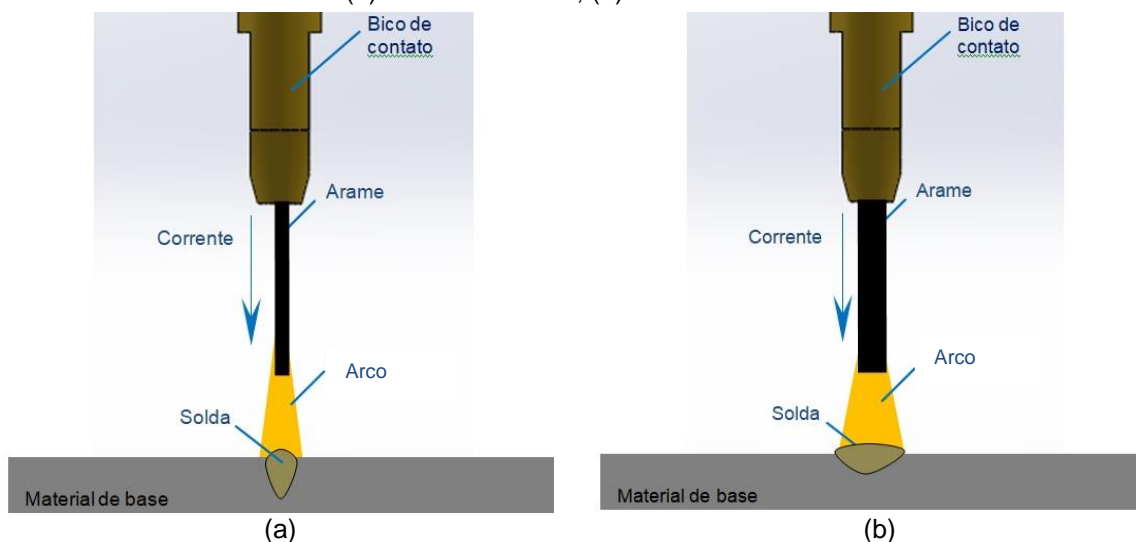


FONTE: Arcspecialties (2017).

## 2.2.4 DIÂMETRO DO ELETRODO

A resistividade do eletrodo influencia na sua taxa de deposição, assim como o seu comprimento (WEINER et al, 1992). O diâmetro do eletrodo afeta a penetração no material de base, sendo esta relação inversamente proporcional conforme Figura 11. Quanto menor o diâmetro maior será sua penetração. Esta relação se explica pela corrente que passa pela área da secção transversal do metal de adição. (ARCSPECIALTIES, 2013).

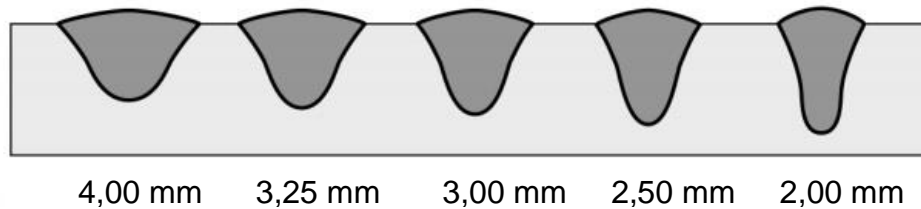
Figura 11 – Relação diâmetro do eletrodo e a penetração para mesma intensidade de corrente:  
(a) Diâmetro menor; (b) Diâmetro maior.



FONTE: O autor (2017)

Além disso, o diâmetro afeta a penetração e a geometria do cordão de solda, conforme Figura 12.

Figura 12 – Influência do diâmetro do arame na geometria do cordão de solda

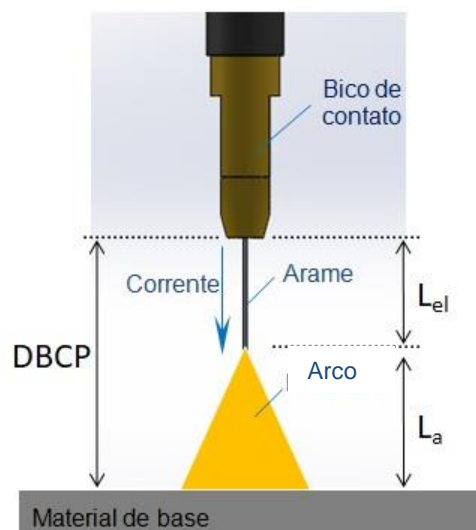


FONTE: Arcspecialties (2017).

## 2.2.5 EXTENSÃO DO ELETRODO

A distância bico de contato peça (DBCP), consiste na soma da extensão do eletrodo ( $L_{el}$ ) e o comprimento do arco ( $L_a$ ) conforme mostra a Figura 13. Trata-se de um parâmetro altera a intensidade da corrente elétrica que funde o arame e consequentemente influencia na geometria do cordão no metal base.

Figura 13 – Distância bico de contato peça.



Fonte: O autor (2017)

A DBCP quando aumentada, reduz a corrente média de soldagem que, por sua vez, reduz a penetração e aumenta a relação R/L, sendo considerado por Silva (2016) o parâmetro de maior significância estatística a afetar a geometria do cordão de solda no processo SAW, conforme mostra a Figura 14.



Figura 14 – Influência da DBCP na macro do cordão com velocidade de alimentação constante em 7 m/min, velocidade de soldagem em 22 cm/min e tensão em 40 V. (a) DBCP de 20 mm, (b) DBCP de 30 mm.



FONTE: Silva (2016) adaptado.

A desvantagem de uma DBCP maior está na condição de aumentar a extensão do eletrodo aquecido, afetando a linearidade do cordão de solda e incrementando a dissipação de calor para o ambiente.

A extensão do eletrodo ( $L_{el}$ ) consiste no comprimento de arame entre a saída do bico de contato e o início do arco (AWS, 2014). Este parâmetro pode ser ajustado diretamente pela DBCP ou, indiretamente pela alteração da tensão aplicada. Em ambos os casos a corrente de soldagem é alterada.

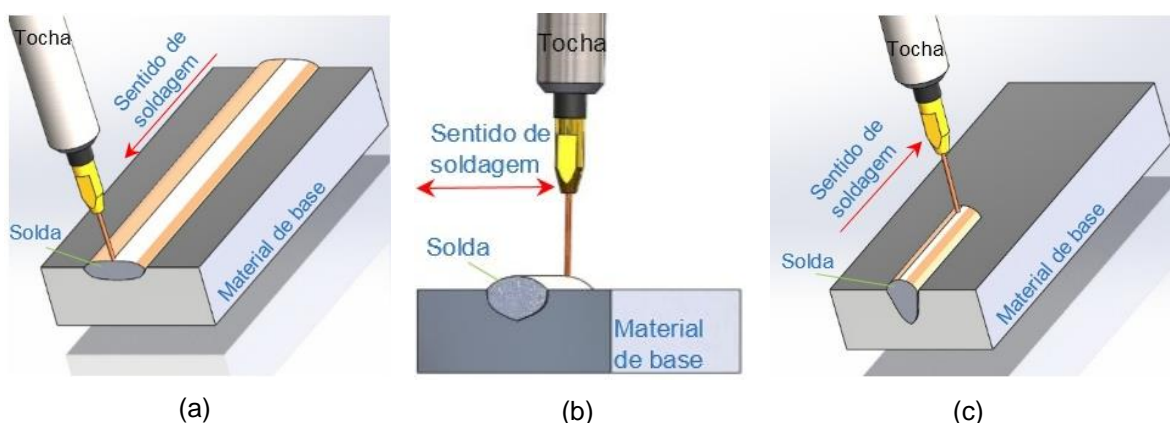
Ao decrementar a tensão aplicada com uma DBCP constante, a corrente de soldagem é reduzida, diminuindo desta forma o comprimento do arco e incrementado a extensão do eletrodo. Nesta condição, a potência elétrica do arco é reduzida enquanto que a do eletrodo é incrementada, promovendo menores valores de penetração e de diluição do cordão de solda. Mantendo constante a intensidade da corrente de soldagem, o aumento deste comprimento aumenta a taxa de deposição em até 50% (AWS, 2004).

## 2.2.6 INCLINAÇÃO DO MATERIAL DE BASE

O processo de soldagem pode ser realizado com uma pequena inclinação do material de base. Nesta situação o sentido da tocha tem influência direta na geometria final do cordão de solda (AWS, 2004). Considerando-se os mesmos parâmetros de soldagem, a posição da tocha sempre perpendicular ao material de base, e variando apenas o sentido de deslocamento da tocha e a inclinação do

material de base. Quando a tocha está no sentido descendente a penetração diminui e a largura do cordão aumenta, conforme Figura 15a. Quando a tocha está no sentido ascendente a relação penetração largura do cordão se inverte, conforme Figura 15c.

Figura 15 – Influência do sentido de soldagem aliado à inclinação do material de base: (a) Movimento descendente da tocha com material de base inclinado; (b) Movimento da tocha e posição plana do material de base; (c) Movimento ascendente da tocha com o material de base inclinado



FONTE: O autor (2017)

### 3 MATERIAIS, EQUIPAMENTOS E MÉTODOS

#### 3.1 MATERIAIS

Chapa de aço SAE 1010 de 6,35 mm de espessura, cuja composição está apresentada na Tabela 5, foi o material de base usado para a construção dos corpos de prova de dimensões 220 x 100 mm. O material de adição usado para o revestimento foi o arame maciço Inconel 625 com diâmetro de 1,143 mm, cuja composição está apresentada na Tabela 6. O fluxo usado foi o ESAB 10.93, aglomerado básico não ligado para soldagem ao arco submerso de aços inoxidáveis e aços alta liga ligados ao CrNiMo.

Tabela 5 – Composição do aço SAE 1010

Elemento	C	Mn	P máx.	S máx.
% em massa	0,08 – 0,13	0,30 – 0,60	0,040	0,050

FONTE: SAE – AISI

Tabela 6 – Composição do arame de Inconel 625.

Elemento	C	Mn	Si	P	S	Cr	Nb+Ta	Cb	Mo	Fe	Al	Ti	Ni
% em massa	0,10 máx	0,50 máx	0,50 máx	0,015 máx	0,015 máx	20-30	3,15-4,15	1,00 máx	8-10	5,00 máx	0,40 máx	0,40 máx	58 mín

FONTE: ASTM

### 3.2 EQUIPAMENTOS

Os experimentos de revestimento com o processo SAW foram realizados em laboratório de soldagem do IFSC, conforme mostra a bancada da Figura 16. Os principais equipamentos utilizados foram: robô antropomórfico marca Fanuc M10iA com tocha GMAW instalada, plataforma de fixação e posicionamento dos corpos de prova, fonte eletrônica microprocessada de solda marca IMC modelo Digiplus A7 com alimentador automático de arame, unidade de refrigeração da tocha e seu respectivo sistema portátil de aquisição de dados modelo Sap V4. Por se tratar de uma tocha GMAW não havia silo, de forma que o fluxo foi colocado sobre a área a ser coberta pelos cordões de forma manual tomando-se o cuidado para que sua altura cobrisse o arco.

Figura 16 – Bancada de ensaios do processo SAW.

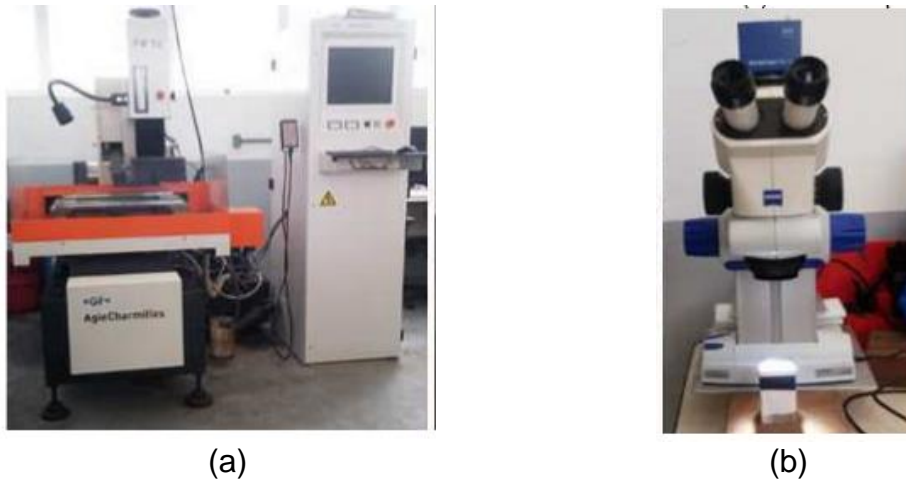


FONTE: O autor (2017)

Os corpos de prova foram cortados na máquina de eletroerosão a fio, marca Charmilles modelo FW-1, conforme mostra a Figura 17a. As respectivas macrografias foram realizadas em laboratório de materiais via lixamento seguido de

ataque químico por Nital. Os parâmetros geométricos de cada cordão de solda das macrografias foram medidos diretamente pelo estereoscópio eletrônico Zeiss modelo Stemi 2000 C, Figura 17b, e seu respectivo programa. Já os parâmetros geométricos dos revestimentos foram mesurados via a análise das fotos das respectivas macrografias pelo programa *SolidWorks*.

Figura 17 – Em (a) a máquina de eletroerosão a fio e em (b) estereoscópio Zeiss.



FONTE: Teichmann (2016).

As análises da composição química dos revestimentos produzidos foram realizadas na empresa Usicast Indústria e Comércio Ltda, utilizando um espectrômetro de emissão ótica da marca AMETEK, modelo SPECTROMAX LMX06, Figura 18.

Figura 18 – Espectrômetro de emissão ótica Spectromaxx LMX 06



FONTE: Usicast Indústria e Comércio Ltda

### 3.3 METODOLOGIA

Com base nas informações pesquisadas e recomendadas para as variáveis do procedimento de revestimento com o processo SAW, item 2.2 deste trabalho, a metodologia aplicada deste trabalho foi estruturada em uma sequência de três fases:

- Produção de cordões de solda exploratórios;
- Determinação da estratégia de soldagem;
- Desenvolvimento do método de revestimento.

#### 3.3.1 PRODUÇÃO DE CORDÕES DE SOLDA EXPLORATÓRIOS

Para reduzir gastos com consumíveis, nesta fase foram utilizados materiais existentes no laboratório: fluxo neutro ESAB 429 e o arame AWS ER70S-6 de 1,2 mm de diâmetro com composição química apresentada na Tabela 7.

Tabela 7 – Composição química do arame ER70S-6 em valores percentuais.

Elemento	C	Si	Mn	P	S	Cu
% em massa	0,06 - 0,15	0,80 – 1,15	1,40 – 1,85	≤ 0,02	≤ 0,03	≤ 0,50

FONTE: AWS

O objetivo desta fase é o de ajustar os parâmetros de soldagem para produzir cordões de solda contínuos e de boa aparência na posição plana com ângulos de ataque e de soldagem nulos para servir como ponto de partida da segunda fase. Macrografias serão também realizadas para medir os parâmetros geométricos dos cordões de solda.

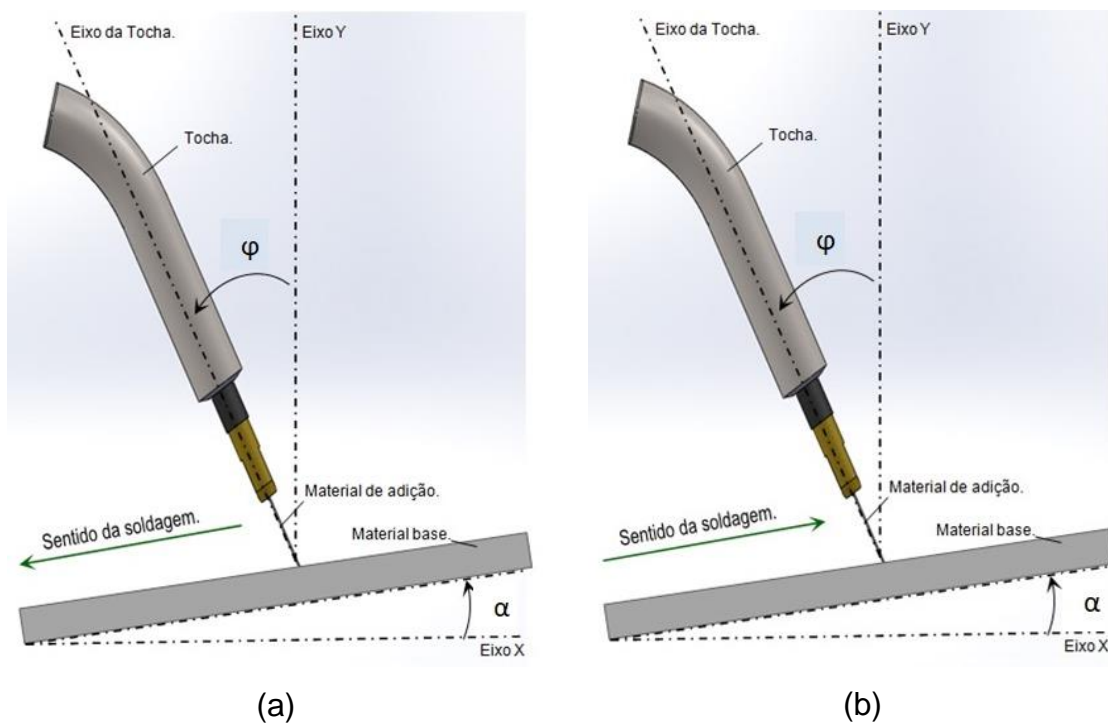
#### 3.3.2 DETERMINAÇÃO DA ESTRATÉGIA DE SOLDAGEM

Nesta fase foram usados os consumíveis referente a proteção corrosiva de superfícies: arame maciço Inconel 625 com diâmetro de 1,143 mm e o fluxo básico ESAB 10.93. Com o objetivo de melhorar a qualidade do revestimento foi proposta duas estratégias de soldagem, conforme mostra a Figura 19.

Em ambas as estratégias de soldagem, o corpo de prova é posicionado de forma inclinada, ângulo  $\alpha$ , em relação à posição plana, eixo x, para favorecer o

deslocamento da poça de fusão e, com isso, reduzir a penetração e a diluição do cordão de solda, conforme (AWS, 2004) e (MARQUES et al, 2009). Na estratégia da Figura 19a a soldagem é puxando com ângulo de ataque  $\varphi$  no sentido descendente, enquanto que na estratégia da Figura 19b a soldagem é empurrando com ângulo de ataque  $\varphi$  no sentido ascendente.

Figura 19 – Estratégias de soldagem: (a) ascendente empurrando e em (b) descendente puxando.

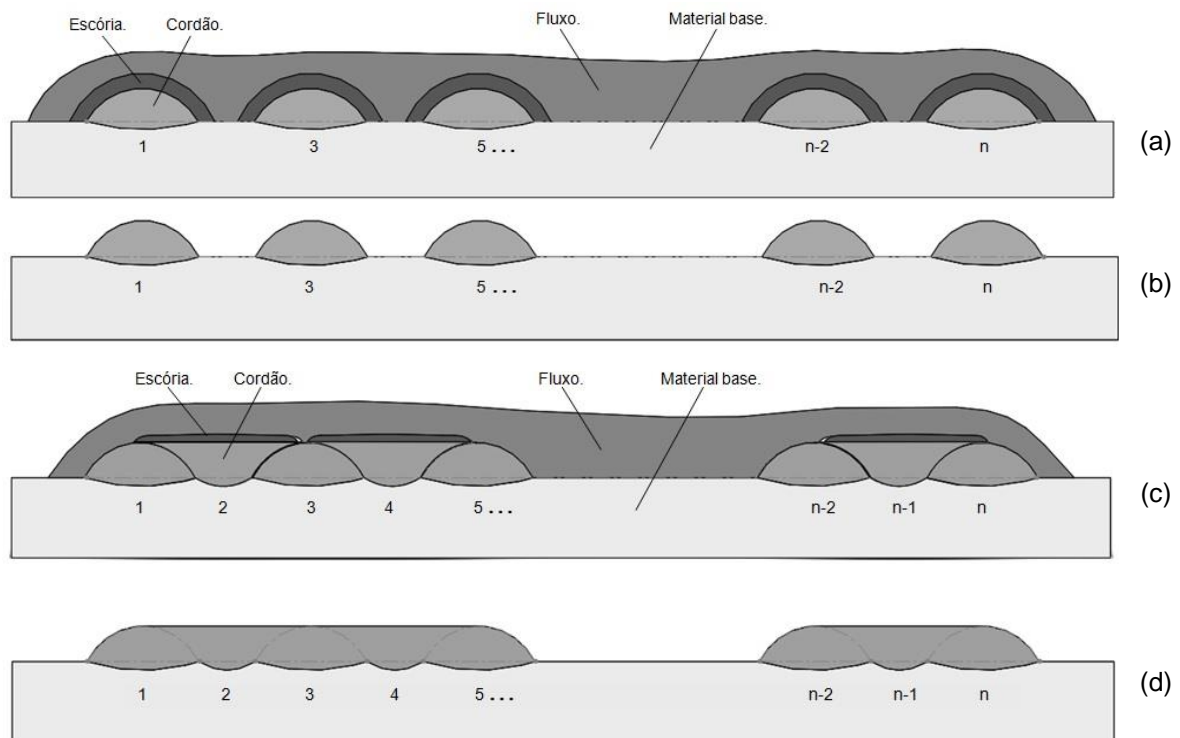


FONTE: O autor (2017)

### 3.3.3 DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO DE REVESTIMENTO

Nesta terceira e última fase, um novo método de revestimento com quatro etapas, Figura 20, é proposto com o objetivo de aumentar a produção do procedimento. Este método não foi encontrado na literatura revisada. Esse incremento de produção, em relação ao método tradicional, é devido a não haver mais a necessidade de parar a deposição do material de adição e, só começar a produzir o próximo cordão do revestimento quando for concluída a remoção da escória do cordão anterior.

Figura 20 – Etapas do método de revestimento: (a) - produção dos cordões ímpares, (b) - remoção da escória dos cordões ímpares, (c) - produção dos cordões pares e (d) - remoção da escória dos cordões pares.



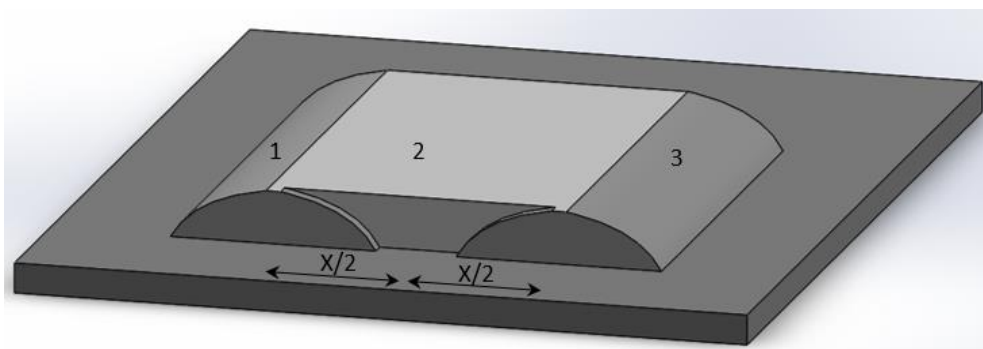
FONTE: O autor (2017)

Na primeira etapa, são produzidos todos os cordões de solda ímpares do revestimento, Figura. 20a. Na segunda etapa, a escória destes cordões ímpares é removida, Figura 20b. Na terceira etapa, todos os cordões de solda pares são produzidos entre os cordões ímpares, Figura. 20c. Essa estratégia permite que a produção dos cordões de solda pares seja guiada pelo chanfro formado pelos cordões ímpares adjacentes, melhorando assim, o acabamento superficial do revestimento. Na quarta e última etapa, a escória dos cordões pares é removida, concluindo assim, o revestimento, Figura. 20d.

É possível ainda incrementar a produtividade deste procedimento de revestimento. Para isso, a escória dos cordões de solda já produzidos devem ser removidas simultaneamente com a execução dos próximos cordões do revestimento, evitando assim, períodos sem deposição de material de adição.

A distância  $X/2$ , Figura 21, em que a área da secção transversal de um cordão de solda par é idêntica a área da secção transversal de um cordão de solda ímpar foi obtida via o modelamento da área depositada de ambos os tipos de cordão de solda no software de CAD *SolidWorks*.

Figura 21 – Método gráfico para a determinação da distância entre dos cordões de solda do revestimento.



FONTE: O autor (2017)

### 3.4 CRITÉRIOS PARA VALIDAÇÃO DE REVESTIMENTOS

A produção de revestimentos resistentes à corrosão com o material Inconel 625 são comuns nas empresas de petróleo e gás. Normalmente, o requisito de qualidade para as típicas aplicações industriais exige um máximo de 10 % de teor de ferro na superfície do revestimento (FUNDERBURK, 2015).

Por outro lado, existem normas que especificam o percentual máximo na superfície do revestimento. Por exemplo, as normas do <sup>1</sup>American Petroleum Institute (API) e da <sup>2</sup>Det Norske Veritas (DNV) determinam que o percentual de ferro no Inconel não pode superar 5%. Sendo que a norma API 6A divide os revestimentos de Inconel 625 em duas classes de diluição de ferro no depósito: Fe5 (máximo 5% de ferro) e Fe10 (máximo 10% de ferro), (TEICHMANN, 2016).

A baixa contaminação de ferro na superfície do revestimento de Inconel é um dos principais fatores que irá influenciar na vida útil deste. Geralmente, nos revestimentos com Inconel 625 o valor do teor de ferro na superfície do revestimento é ligeiramente menor que o valor da diluição calculada pela Equação 1.

Alguns autores como Abioye (2015) consideram uma diluição entre 5% e 13% e ângulo Beta  $\beta$  abaixo de  $80^\circ$  na banda do cordão, conforme mostra a Figura

<sup>1</sup>API. API 5L - Specification for Line Pipe. 2004. American Petroleum Institute, Washington, DC.

API. API 6A - Specification for Wellhead and Christmas Tree Equipment. 2005. American Petroleum Institute, Washington, DC.

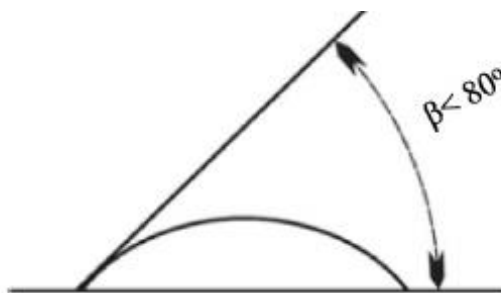
<sup>2</sup>DNV. Submarine Pipeline Systems. 2013. DET NORSKE VERITAS AS, Oslo, Norway.



22, como aceitáveis ao realizar testes de corrosão em revestimentos de Inconel 625 utilizando as normas da <sup>3</sup>American Society Testing and Materials (ASTM) G5-94 e G61-86. Quanto menor o ângulo  $\beta$  melhor a deposição do cordão adjacente e menor a possibilidade de defeitos na borda.

Pesquisas realizadas sugerem que uma diluição muito abaixo de 5% na primeira camada facilita o arrancamento do revestimento, por outro lado acima de aproximadamente 14% na superfície compromete a resistência a corrosão para determinadas aplicações, (ABIOYE, 2015) e (ALTOÉ et al, 2015).

Figura 22 – Esquema de medição do ângulo da borda do cordão.



FONTE: Abioye (2015)

Com relação à razão R/L quanto menor for o seu valor, mais largo e baixo será o cordão de solda, visto que assim será necessário menos passes para recobrir a área de interesse. Entretanto, a norma Petrobrás N 1707 determina que a altura mínima do reforço deva ficar acima de 3,0 mm (SANTOS, 2015).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados produzidos e as respectivas análises e discussões são apresentados neste capítulo e são referentes às três fases da metodologia supracitada.

### 4.1 FASE 1: PRODUÇÃO DE CORDÕES DE SOLDA EXPLORATÓRIOS

Os cordões de solda produzidos nesta fase tiveram como base os parâmetros de soldagem usados por Silva (2016) que apresentou resultados de qualidade aceitável. Para garantir a estabilidade do processo de soldagem por arco submerso

<sup>3</sup>ASM Handbook, 2003. Corrosion: Fundamentals, Testing and Protection, vol. 1A. ASM International.

a fonte de energia operou no modo convencional de tensão contínua, para manter a altura do arco a mais uniforme possível através do controle natural da corrente de soldagem, e polaridade positiva (SAW-DCEP). A posição de soldagem foi à plana com os ângulos de ataque e de soldagem nulos.

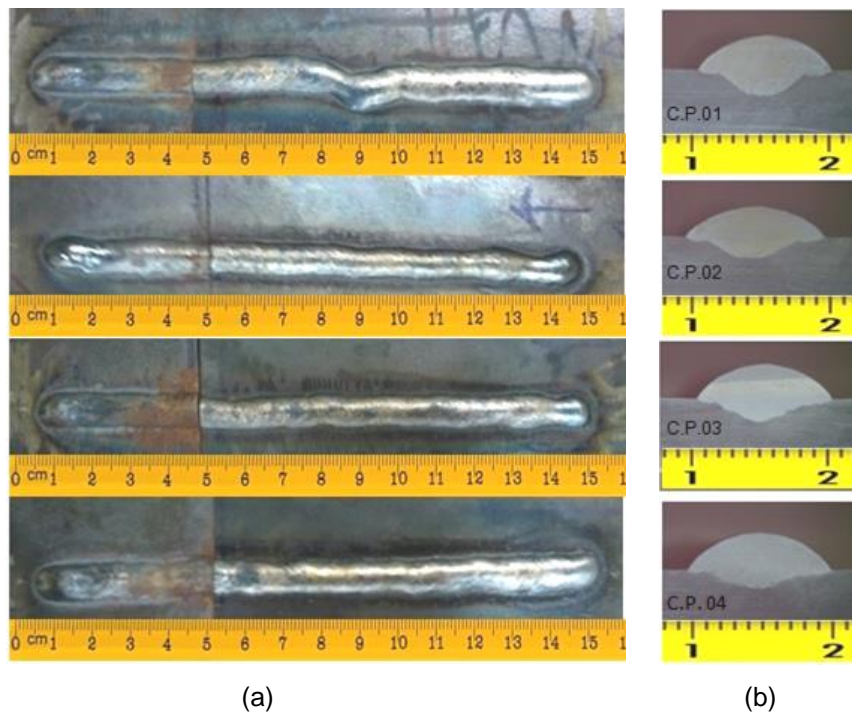
Com o objetivo de produzir cordões de solda adequados para o revestimento foi considerado a influência das variáveis do processo na geometria do cordão de solda descrita no segundo capítulo, tensão aplicada e DBCP com valores maiores, Tabela 8.

Tabela 8 – Parâmetros utilizados na realização dos cordões de solda fase 1.

N° do cordão de solda	01	02	03	04
Tensão aplicada (V)	40	40	40	40
Velocidade do arame (m/min)	6,2	6,0	6,2	5,0
DBCP (mm)	36	36	40	40
Corrente média medida (A)	187	185	182	160
Tensão média medida (V)	40,1	40,1	40,1	40,1
Velocidade de soldagem (m/min)	0,30	0,30	0,30	0,24

FONTE: O autor (2017)

Figura 23 – Cordões de solda realizados na Fase 1: (a) Aspectos visuais; (b) Macros



FONTE: O autor (2017)

A partir dos cordões de solda realizados foram feitas análises para determinar a geometria e sua diluição. Os resultados podem ser conferidos na Tabela 9.

Apesar das escórias saírem facilmente dos cordões de solda, a linearidade dos mesmos ficou prejudicada decorrente do maior valor de DBCP usado. Além disso, tanto o valor da penetração, quanto o da diluição são grandes, o que prejudicaria a qualidade do revestimento.

Tabela 9 – Resultados das macrografias fase 1

C.P.	L (mm)	P (mm)	R (mm)	Af (mm <sup>2</sup> )	Ad (mm <sup>2</sup> )	D (%)	R/L
01	9,71	1,51	2,41	7,10	16,96	29,52	0,24
02	9,99	1,33	2,16	6,30	15,31	29,16	0,21
03	9,53	1,52	2,50	7,09	16,86	29,61	0,26
04	10,18	1,10	2,61	5,11	18,99	21,20	0,25

FONTE: O autor (2017).

Depois disso, o arame AWS ER70S-6 de 1,2 mm de diâmetro foi substituído pelo arame maciço Inconel 625 com diâmetro de 1,143 mm mantendo o fluxo neutro ESAB 429. Em função da diferença de diâmetros a velocidade de alimentação do arame foi adequada, Tabela 10.

Tabela 10 – Parâmetros utilizados na realização do cordão de solda com o arame Inconel 625.

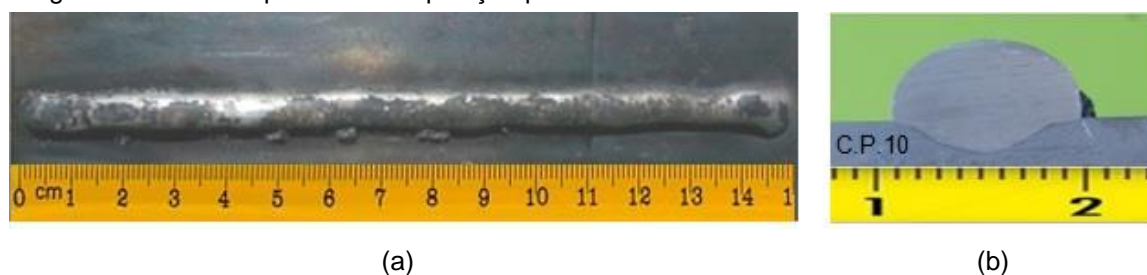
N° do cordão de solda	10
Tensão aplicada (V)	40
Velocidade do arame (m/min)	7,0
DBCP (mm)	40
Corrente média medida (A)	142
Tensão média medida (V)	40,2
Velocidade de soldagem (m/min)	0,24

FONTE: O autor (2017)

O cordão produzido está apresentado na Figura 24 onde se verifica que o fluxo neutro ESAB 429 não é adequado para o arame Inconel 625. Por se tratar de um fluxo destinado a aços de baixa-liga ele não reage bem com o Inconel 625 que impede a sua total precipitação. Além da dificuldade da remoção da escória, houve inclusão da mesma no cordão de solda. Outra observação importante é a baixa

molhabilidade do Inconel 625 refletindo em uma maior relação R/L e ângulo  $\beta$  maior do que 80 graus, conforme resultados apresentados na Tabela 11.

Figura 24 – Cordão produzido na posição plana com o Inconel 625 e o fluxo neutro ESAB 429.



(a)

(b)

FONTE: O autor (2017)

Tabela 11 – Resultados da macrografia do C.P. 10

L (mm)	P (mm)	R (mm)	D (%)	R/L
9,52	1,79	4,85	19,5	0,51

FONTE: O autor (2017)

## 4.2 FASE 2: ESTRATÉGIA DE SOLDAGEM

Com base nos resultados da fase 1, fica evidente a necessidade de usar um fluxo adequado para o arame Inconel 625 e desenvolver uma estratégia de soldagem para reduzir os valores de penetração e de diluição dos cordões de solda. Assim, foi adquirido o fluxo básico ESAB 10.93 que é do tipo aglomerado básico não ligado para a soldagem de aços inoxidáveis e aços CrNiMo de alta liga.

Como estratégia de soldagem, a peça foi inclinada, conforme mostra a Figura 19, em uma faixa de  $5^\circ \leq \alpha \leq 15^\circ$  para favorecer o deslocamento da poça de fusão e, com isso, reduzir a penetração e a diluição do cordão de solda. Inclinações superiores a  $15^\circ$ , o fluxo desliza sobre o metal de base inviabilizando a soldagem e, abaixo de  $5^\circ$  não produzem o efeito desejado na poça de fusão.

Inicialmente foi testado o sentido de soldagem descendente empurrando com ângulo de ataque de  $10^\circ$  para os valores extremos da faixa de inclinação. Em ambas as condições o metal líquido da poça de fusão escorreu sobre a superfície da peça e caindo sobre a mesa de soldagem.

Para evitar o problema de escorrimento da poça de fusão, foi invertido o sentido de soldagem, Figura 19b, ou seja, ascendente puxando com ângulo de ataque de  $10^\circ$  para os valores extremos da faixa de inclinação. Nestas situações, os

cordões de solda obtidos tiveram valores elevados de relação R/L e de diluição, parecido com o corpo de prova 10 da Tabela 11.

Por último, foi testado a estratégia referente à Figura 19a, sentido de soldagem descendente puxando com o ângulo de ataque de  $10^\circ$  para os valores extremos da faixa de inclinação. Na condição de inclinação,  $\alpha = 10^\circ$ , obteve-se o melhor resultado em termos de geometria de cordão de solda, Figura 25, para diferentes velocidades de soldagem e de alimentação de arame, Tabela 12.

Tabela 12 – Parâmetros utilizados na realização dos cordões de soldada fase 2.

N° do cordão de solda	30	32	35	43	44
Tensão aplicada (V)	40,00	40,00	40,00	40,00	40,00
Velocidade do arame (m/min)	10,00	10,00	10,00	12,00	14,00
DBCP (mm)	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00
Corrente média medida (A)	163,00	164,00	161,00	184,00	199,00
Tensão média medida (V)	40,00	40,20	40,10	40,30	40,00
Velocidade de soldagem (m/min)	0,24	0,18	0,30	0,30	0,36

FONTE: O autor (2017)

Figura 25 – Cordões de solda realizados na fase 2: (a) Aspectos visuais, (b) Macros



(a)

(b)

FONTE: O autor (2017)

A partir dos cordões de solda realizados foram feitas medições da geometria e os cálculos para determinar as respectivas diluições e relações R/L, conforme mostra a Tabela 13. Todos os cordões obtidos nesta fase possuem características geométricas para produção de revestimentos de qualidade.

Tabela 13 – Resultado das macrografias da fase 2.

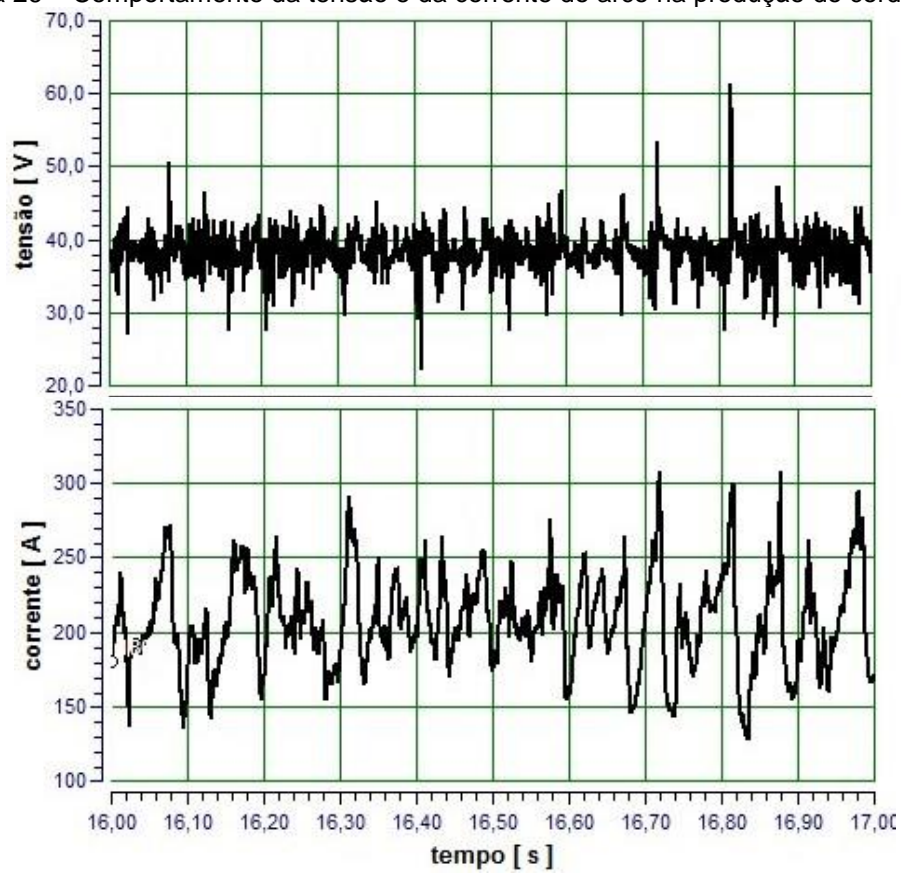
C.P.	L (mm)	P (mm)	R (mm)	Af (mm <sup>2</sup> )	Ad (mm <sup>2</sup> )	D (%)	R/L
30	14,22	0,23	3,83	0,41	21,43	1,87	0,27
32	17,32	0,40	3,70	0,59	26,84	2,15	0,21
35	13,24	0,28	3,18	0,28	17,28	1,59	0,24
43	13,14	0,61	3,46	1,95	35,65	5,18	0,26
44	14,09	0,60	3,70	2,25	40,41	5,27	0,26

FONTE: O autor (2017)

O cordão de prova referente ao corpo de prova 44, C.P.44, foi o escolhido para formar os revestimentos da próxima fase por ter sido produzido com a maior velocidade de alimentação de arame. Isso irá implicar em uma maior taxa de fusão do arame em quilos por hora e uma maior produtividade em termos de área revestida por hora.

Com o sistema de aquisição de dados da soldagem foi mesurado a tensão e a corrente de soldagem durante todo o intervalo de execução do cordão de solda 44. Nos referidos oscilogramas, observou-se a estabilidade do processo de soldagem, sem a ocorrência da interrupção do arco elétrico ou curtos-circuitos, conforme mostra a Figura 26. De acordo com a literatura consultada, o modo de transferência metálica para o valor de intensidade de corrente média usado (200 A) é do tipo globular repelida e guiada pela parede do fluxo sem curto-circuito até à poça de fusão.

Figura 26 – Comportamento da tensão e da corrente do arco na produção do cordão 44.



FONTE: O autor (2017)

### 4.3 FASE 3: MÉTODO DE REVESTIMENTO

Com a estratégia e o método de quatro etapas apresentados nas Figuras 19a e 20, foi realizado um revestimento com apenas três cordões de solda, Figura 27, com os mesmos parâmetros de soldagem usados na execução do cordão de solda do corpo de prova 44, CP 44 da Tabela 13. A distância calculada usada para determinar o afastamento dos cordões de solda do revestimento,  $X/2$ , foi de 12 mm. Nesta condição, os principais parâmetros foram medidos e calculados, Tabela 14.

Figura 27 – Revestimento com três cordões: (a) Aspecto visual; (b) Macrografia.



(a)

(b)

Fonte: Schaeffer et al (2017).

Tabela 14 – Parâmetros medidos e calculados da macrografia da Figura 27.

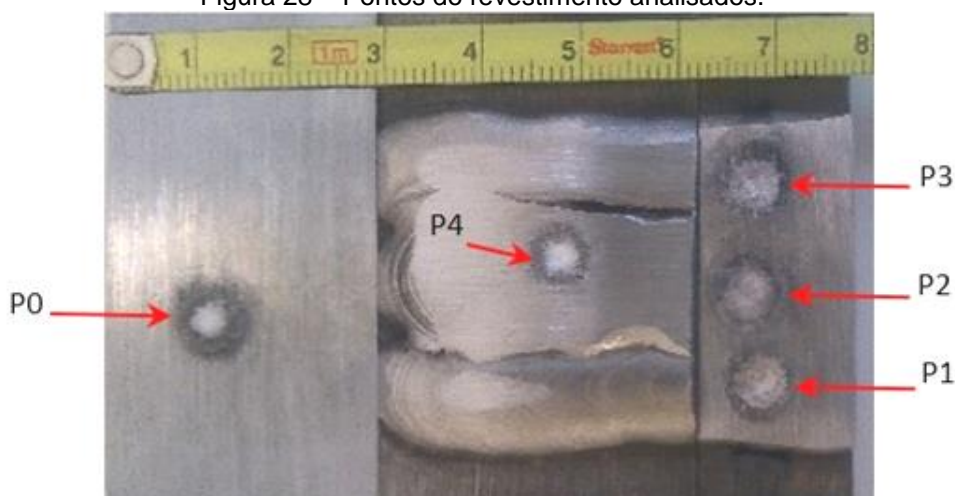
L (mm)	P (mm)	R <sub>min</sub> (mm)	R <sub>máx</sub> (mm)	$\Delta R$ (mm)	Af (mm <sup>2</sup> )	Ad (mm <sup>2</sup> )	D (%)	Tf (kg/h)	Pd (m <sup>2</sup> /h)
33,50	1,10	2,45	3,40	0,96	16,69	97,90	14,6	7,23	0,26

FONTE: Schaeffer et al (2017).

Na macrografia da Figura 27, observa-se que o cordão central, teve a maior penetração. Este fato é explicado pelo atraso do deslocamento da poça de fusão que faz com que o arco elétrico incida mais sobre o metal de base, causando maior penetração. Por sua vez, o atraso da poça de fusão se deve ao seu deslocamento não ser livre sobre o metal de base e, sim, guiada pelos cordões laterais ímpares, o que dificulta o seu deslocamento.

Mesmo com uma diluição acima dos 14%, foi realizada a análise espectrográfica para se certificar da composição do metal de base e para mesurar o teor de ferro na superfície do revestimento. Para isso, parte do revestimento e do metal de base da Figura 27 foram usinados para possibilitar a análise em pontos estratégicos. A Figura 28 mostra uma imagem superior do corpo de prova em que no ponto P0 foi realizado o lixamento do material de base para fazer a análise química, já nos pontos P1, P2 e P3 foi realizada a usinagem de 1 mm de profundidade do revestimento para que a análise química pudesse se feita, por fim no ponto P4 foi realizado apenas um lixamento para uniformizar a superfície e confrontar o resultado da análise química com o ponto P2.

Figura 28 – Pontos do revestimento analisados.



FONTE: Schaeffer et al (2017).



A Tabela 15 apresenta o resultado da análise química em cada ponto da Figura 28. Como era esperado o material de base foi analisado no ponto P0 e, pelo percentual de carbono, foi classificado como aço SAE 1010.

Os cordões de solda ímpares, pontos P1 e P3, tiveram o menor teor de ferro do revestimento, 6,62% e 7,27% respectivamente. O cordão par, ponto P2, localizado no centro do revestimento, foi o que teve o maior teor de ferro, 11,47%.

Cabe ressaltar que os pontos P1, P2 e P3 foram analisados cerca de 1 mm abaixo da superfície do revestimento decorrente da usinagem de preparação. Para confirmar a tendência que o teor de ferro é menor na superfície do revestimento, um ponto, P4 na superfície do cordão par, foi analisado e a diluição diminuiu de 11,47% para 10,52%.

Apesar do alto teor de ferro, o revestimento com o processo SAW-DCEP resultou uma taxa de fusão do arame de 7,23kg/hora e uma produtividade de 0,26 m<sup>2</sup>/hora. O reforço médio obtido foi de 2,93mm com uma variação de  $\pm 0,48$ mm.

Tabela 15 – Análise química do revestimento da Figura 29 em percentual de massa.

Pontos	Fe (%)	C(%)	Si(%)	Mn(%)	P(%)	S(%)	Cr(%)	Mo(%)	Ni(%)
P0	98,7392	0,1250	0,1920	0,7160	0,0146	0,0155	0,1080	0,0107	0,0739
P1	6,6200	0,0103	0,4240	0,0706	0,0119	0,0123	18,0500	8,3100	62,5000
P2	11,4700	0,0166	0,3920	0,0949	0,0202	0,0152	17,2700	8,2400	60,3000
P3	7,2700	0,0175	0,5090	0,0730	0,0156	0,0165	17,7100	8,4200	61,9000
P4	10,5200	0,0224	0,2160	0,1300	0,0104	0,0045	22,4000	5,5900	57,8000

Gentileza: Metalúrgica Precicast.

Com o objetivo de reduzir a penetração dos cordões pares e de diminuir a variação da altura do revestimento,  $\Delta R$ , foi realizado mais um revestimento com cinco cordões de solda, Figura 30, alterando somente dois parâmetros. A velocidade de soldagem foi incrementada de 0,36 m/min para 0,42 m/min para reduzir a penetração e aumentar a produtividade. Para compensar o incremento da velocidade que reduz o valor da área depositada, a distância entre cordões,  $X/2$ , teve que ser reduzida de 12 mm para 10 mm. Na sequência, os parâmetros da macrografia da Figura 30 foram medidos e calculados, como mostra a Tabela 16.

Na Figura 29 são apresentados os três cordões ímpares produzidos na primeira etapa do método ainda com a escória por remover. Pode-se observar que

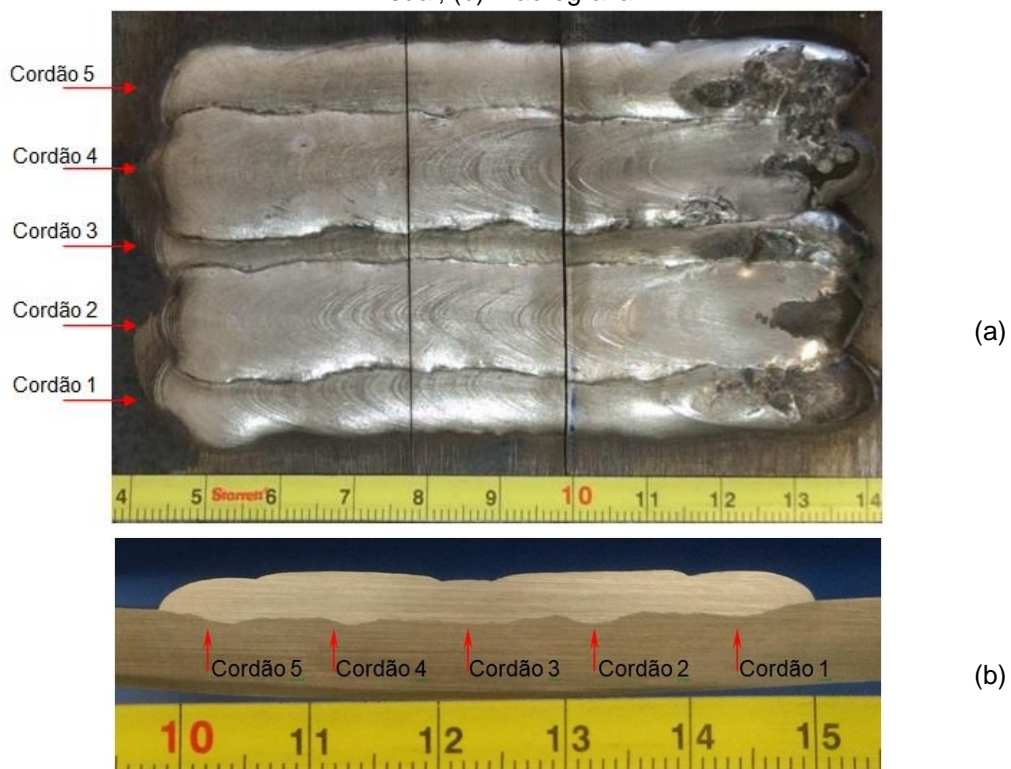
há distância suficiente entre os cordões ímpares de modo que a escória não prejudica a produção dos cordões pares.

Figura 29 – Produção dos cordões ímpares da primeira etapa do novo método de revestimento.



FONTE: Schaeffer et al (2017).

Figura 30 – O revestimento de 5 cordões obtido com o processo SAW-DCEP: (a) Aspecto visual; (b) Macrografia.



FONTE: Schaeffer et al (2017).

Tabela 16 – Parâmetros medidos e calculados da macrografia da Figura 30b.

L (mm)	P (mm)	R <sub>min</sub> (mm)	R <sub>máx</sub> (mm)	ΔR (mm)	A <sub>f</sub> (mm <sup>2</sup> )	A <sub>d</sub> (mm <sup>2</sup> )	D (%)	T <sub>f</sub> (kg/h)	P <sub>d</sub> (m <sup>2</sup> /h)
52,37	0,97	2,52	3,63	1,12	164,00	20,55	11,11	7,23	0,25

FONTE: Schaeffer et al (2017).

Da mesma forma que o revestimento com três cordões, foi medido o teor de ferro na superfície do revestimento com cinco cordões. O menor teor de ferro obtido foi o de 6,62 % no cordão de solda par de número 2, enquanto que o maior teor de ferro foi o de 7,27% no cordão de solda ímpar de número 5. Os cordões de solda pares apresentaram menor teor de ferro, pois a aproximação dos cordões ímpares funcionou como uma proteção do material de base.

O revestimento com o processo SAW-DCEP resultou uma taxa de fusão do arame de 7,2 kg/hora e uma produtividade de 0,25 m<sup>2</sup>/hora. O reforço médio obtido foi de 3,08 mm com uma variação de  $\pm 0,56$  mm e o ângulo da borda abaixo de 80°.

## **5 CONCLUSÕES**

Com base nos resultados obtidos da adequação do procedimento de soldagem por arco submerso com polaridade positiva, pode-se afirmar que o desafio inicial de produzir revestimentos de boa qualidade e produtividade com arame no lugar de fita e equipamentos de soldagem de baixa capacidade de corrente para diminuir custos, foi superado. Cabe como trabalho futuro realizar mais experimentos no sentido de consolidar o procedimento desenvolvido nesta dissertação.

Os cordões de solda, produzidos pelo processo SAW-DCEP no sentido descendente puxando com a peça inclinada em 10°, possuem características geométricas apropriadas para a tarefa de revestimento de superfícies, como: penetração rasa, superfície praticamente lisa e boa relação reforço/largura.

A estratégia descrita nesta dissertação pode ser aplicada para o revestimento de peças longas na posição plana. Essa é uma alternativa mais econômica e ergonômica correta com relação aos procedimentos de revestimento com o processo GMAW realizados na posição vertical descendente para diminuir a penetração. Além disso, o processo SAW-DCEP resulta em uma produtividade superior à obtida pelos processos de soldagem com proteção gasosa.

O método proposto com quatro etapas sequenciais juntamente com o procedimento desenvolvido produz revestimentos sem descontinuidades, isentos de respingos, bom aspecto visual com reforço mínimo de 2,62 mm e um máximo sobremetal menor que 1,2 mm e um teor de ferro na superfície inferior a 8% com apenas uma camada depositada.

A estratégia, a metodologia e o procedimento SAW-DCEP desenvolvidos e, que foram aqui apresentados, poderão servir como ponto de partida para futuros trabalhos. A introdução de um segundo arame, frio ou quente, na poça de fusão com o objetivo de reduzir a penetração e aumentar a produtividade é uma das propostas de trabalho futuro na área de revestimento. Outra proposta seria o de união de peças espessas com chanfro estreito usando a técnica de tecimento longitudinal, conhecida na literatura por *switch back*. Essa ideia partiu da viabilidade atestada neste trabalho em soldar com DBCPs superiores a 35 mm.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS

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 Nº 14587 na Resistência à Corrosão por Pite.** 70º Congresso Anual da ABM – Internacional. Agosto/2015, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

ARCSPECIALTIES. **INCONEL 625® Corrosion Resistant Overlay Study Submerged Arc Welding (SAW) Project 50107-I Final Report.** ARCSPECIALTIES Engineering and Consulting Services. Houston, TX. 2012

ARCSPECIALTIES. **Submerged Arc Welding for Corrosion Resistant Overlay.** ARC Specialties Engineering and Consulting Services. Houston, TX. 2013

ARCSPECIALTIES. **A discussion of the welding process and how welding parameters affect the chemistry of Corrosion Resistant Overlays (CRO).** ARC Specialties Engineering and Consulting Services. Houston, TX. <<https://www.arcspecialties.com/documents/316L%20CRO%20-%20SAW%20Study%20-%20Final%20Report.pdf>> Acesso em 12/11/2017.

AWS - American Welding Society. **Welding Handbook- Welding Science and Technology**.9. ed. [S.I.]: AWS, v. 2, 2004. 680p.ISBN: 0-87171-729-8

CARVALHO, R. S. DUTRA, J. C., FELIPPE, L. **Desenvolvimento de um Manipulador CNC Robótico para a Recuperação por Soldagem dos Tubos das Caldeiras Termelétricas**. 63º Congresso Anual da ABM, Agosto/2008, Santos, SP, Brasil.

CHO, D. WON, SONG, W. HYUN, CHO, M. HYUN. **Analysis of Submerged Arc Welding Process by Three-Dimensional Computational Fluid Dynamics Simulations**. Journal of Materials Processing Technology 213 (2013) 2278-2291.

ESAB. **Technical Handbook - Strip Cladding**. 2008. < [http://www.ozmetalsan.com/images/catalog/55608ESAB\\_Strip\\_Cladding\\_EI\\_Kitabi\\_-\\_EN.pdf](http://www.ozmetalsan.com/images/catalog/55608ESAB_Strip_Cladding_EI_Kitabi_-_EN.pdf)> Acesso em 05/07/2017.

ESAB. **Manual de Soldagem a Arco Submerso**. 2004 <[http://www.esab.com.br/br/pt/education/blog/processo\\_soldagem\\_arco\\_submerso.cfm](http://www.esab.com.br/br/pt/education/blog/processo_soldagem_arco_submerso.cfm)> Acesso em 20/09/2017.

ESAB. **Apresentação de aplicações do método ICE™**.<<http://www.esabna.com/shared/content/products/upload/ice-application-solutions-20140212.pdf>> Acesso em 02/11/2017.

ESAB. **Revista Solução**. Abril2005. Pg 32<[http://www3.esab.com.br/Revista\\_Solucao\\_20\\_0505.pdf](http://www3.esab.com.br/Revista_Solucao_20_0505.pdf)> Acesso em 02/11/2017.

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

LI, k., Wu, Z., Zhu, Y. and Liu, C. 2017. **Metal transfer in submerged arc welding**. Journal of Materials Processing Technology 244: 314-319.

LINCOLN. **Hybrid Electroslag Cladding**. 2017. < [http://www.lincolnelectric.com/nl-nl/support/process-and-theory/Documents/STRIP\\_CLADDING\\_ENG.pdf](http://www.lincolnelectric.com/nl-nl/support/process-and-theory/Documents/STRIP_CLADDING_ENG.pdf)> Acesso em 19/12/2017.

MADALENA, F. C. A., ALVARÃES, C. P., SOUZA, L. F. G., JORGE, J. C. F., ARAÚJO, L. S. **Mechanical and Microstructural Properties of the Inconel 625 alloy weld overlay obtained by electroslag welding process**. 23<sup>rd</sup> ABCM International Congress of Mechanical Engineering, December 6-11, 2015, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. (Coautor). **Soldagem: fundamentos e tecnologia**. 3. ed. atual. Belo Horizonte: Ed. da UFMG, 2009. 362 p., il., 26 cm. (Didática). Inclui bibliografia. ISBN 9788570417480.

MINÁ, E. M., SILVA, Y. C., SILVA, C.C. **Efeito da Diluição Sobre a Microestrutura da Liga AWS ER NiCrMo-14 na Soldagem de Revestimentos pelo Processo TIG com Alimentação de Arame Frio**. Soldagem & Inspeção. 2016; 21(3):317-329.

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.

ROBINOFF, B. S., Paine, S. E. and Quillen, W. E. 1930. **Method of welding**. United States Patent Office. US1782316A.

RUTZINGER, B. **Influence of the welding process to the dilution rate of weld overlays on unalloyed steel using the weld consumable ERNiCrMo-3 (Alloy 625)**. Biuletyn Instytutu Spawalnictwa, v. 5/2014, 2014.

SANTOS, A.X., MACIEL, T.M., SANTANA, R.A. **Avaliação de revestimentos à base de Inconel 625 depositados através do processo de soldagem GMAW em aço API 5L X70 utilizando Planejamento Fatorial**. Rev. Bras. Apl. Vac., Campinas, Vol. 34, N°3, pp. 128-140, Set - Dez., 2015

SANTOS, C. E. F. **Processos de soldagem: conceitos, equipamentos e normas de segurança**. São Paulo: Érica, 2015. 152 p., il. ISBN 9788536512075.

SCHAEFFER, C. M., BONACORSO, N. G., TEICHMANN, E. W., ROMANI, D., FLORENCE, L., SCHMIDT, G. A. **Adequação do Procedimento de Soldagem por Arco Submerso para o Revestimento com o Arame Inconel 625**. XLIII CONSOLDA – Congresso Nacional de Soldagem, Novembro/2017, Joinville, SC, Brasil.

SENGUPTA, V., MENDEZ, P.F. **Effect of Current on Metal Transfer in SAW Part 1**. Welding Journal. 2017; vol. 96; 241-s.

SENGUPTA, V., MENDEZ, P.F. **Effect of Current on Metal Transfer in SAW Part 2**. Welding Journal. 2017; vol. 96; 271-s.

SENGUPTA, V., MENDEZ, P.F. **Effect of Fluxes on Metal Transfer and Arc Length in SAW**. Welding Journal. 2017; vol. 96; 334-s.

SILVA, M. M., Araújo B.A., MACIEL, T. M., SANTOS, M.A. **Estudo de revestimento de liga Ni aplicados em aço carbono submetidos a ensaios de arrancamento**. Revista Eletrônica de Materiais e Processos, v. 10, n.2 (2015) 56-61 ISSN 1809-8797.

SILVA, M. M., BATISTA, V.R., MACIEL, T. M., SANTOS, M.A., BRASILEIRO, T.M. **Otimização de Parâmetros do Processo de Soldagem Arco Submerso para Revestimentos Anticorrosivos**, Soldagem & Inspeção. 2016; 21(1):115-124.

TEICHMANN, E. W. **Desenvolvimento de Processos Alternativos para o Revestimento Interno com Inconel 625 de Tubos API**. 2016. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

WAINER, E., BRANDI, S. D., MELLO, F. D. H. **SOLDAGEM: processos e metalurgia**. São Paulo: Edgard Blücher, 1992. 494 p. ISBN 9788521202387.