

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

GABRIELA GARCIA DA SILVA

ANÁLISE DE SOLDAS PRODUZIDAS PELO PROCESSO DE ARCO SUBMERSO  
COM CORRENTE PULSADA EM BAIXAS FREQUÊNCIAS

Joinville

2018

GABRIELA GARCIA DA SILVA

ANÁLISE DE SOLDAS PRODUZIDAS PELO PROCESSO DE ARCO SUBMERSO  
COM CORRENTE PULSADA EM BAIXAS FREQUÊNCIAS

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

2018

GABRIELA GARCIA DA SILVA

ANÁLISE DE SOLDAS PRODUZIDAS PELO PROCESSO DE ARCO SUBMERSO  
COM CORRENTE PULSADA EM BAIXAS FREQUÊNCIAS

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

Joinville (SC), 29 de novembro de 2018.

BANCA EXAMINADORA:

---

Dr. Tiago Vieira da Cunha  
Presidente/Orientador

---

Dr. Carlos Enrique Niño Bohórquez  
Membro

---

Dr. Zízimo Moreira Filho  
Membro

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar agradeço a Deus pelas inúmeras oportunidades recebidas, sem as quais não teria chegado até aqui.

À minha família, especialmente meus pais e minha avó, pelo amor e carinho, e por todo o incentivo e motivação para poder concluir meus estudos.

Ao meu namorado, por dividir e compartilhar os momentos bons e difíceis dessa etapa de minha vida e pela ajuda e apoio nos momentos de desânimo.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Tiago Vieira da Cunha pelas orientações recebidas e por acreditar no meu potencial para a realização deste trabalho.

À Universidade Federal de Santa Catarina pelo ensino gratuito e de qualidade e seu corpo docente pelos ensinamentos proporcionados ao longo da graduação.

Aos meus colegas de trabalho do PET EMB e LTS, pelo crescimento pessoal e profissional durante esses anos de convívio.

À todos os amigos que fiz na universidade, em especial aqueles que me acompanharam nesta jornada: Mayara, Milena, Andréia, Giovanna, Thaís e Jordana, pelas conversas, apoio, risadas, companhia e por todos os momentos vivenciados.

À minha segunda família onifamily e à minha amiga Beatriz por todos os anos de amizade e companheirismo e por entenderem meus momentos de ausência. Vocês fizeram muita falta.

À todos aqueles que de alguma forma contribuíram na realização deste trabalho.

## RESUMO

A soldagem a arco submerso (SAW) é um processo mecanizado de alta produtividade, comumente empregado na fabricação de grandes estruturas metálicas como, por exemplo, embarcações marítimas. De forma a se elevar ainda mais a produtividade do processo e se obter maior qualidade nas uniões, a soldagem a arco submerso permite o emprego de diversas técnicas. Neste contexto, uma técnica que é muito utilizada, especialmente no processo Tungsten Inert Gas (TIG), é a pulsação da corrente em baixas frequências, conhecida como pulsação térmica. As vantagens na utilização dessa técnica vão desde ganhos operacionais do processo a melhorias metalúrgicas da solda. Apesar das vantagens já relatadas em diversos estudos de soldagem TIG, não se encontra qualquer referência ao uso desta técnica na soldagem a arco submerso. Em vista disso, neste trabalho foi realizada uma investigação quanto ao emprego da técnica de pulsação da corrente em baixas frequências no processo SAW. Para tanto, foram realizados ensaios de simples deposição sobre chapas de aço carbono ASTM A36 com 13 mm de espessura, variando-se os tempos de pulsação de 0,5 a 2,0 s e as velocidades de soldagem (18 cm/min e 36 cm/min). Os resultados obtidos demonstraram que, além de perfeitamente viável, a aplicação da técnica de pulsação térmica na soldagem SAW resultou, do ponto de vista operacional, em maior eficiência no processo, sem, entretanto, acarretar em instabilidades ou problemas relacionados à inclusão de escória. No entanto, diferentemente do que é relatado na literatura, a pulsação térmica não apresentou melhorias metalúrgicas significativas para nenhuma das condições de soldagem estudadas.

**Palavras-chave:** Soldagem, arco submerso, pulsação da corrente, baixas frequências.

## ABSTRACT

Submerged arc welding (SAW) is a mechanized process of high productivity, commonly used in the manufacture of large metal structures, such as marine vessels. In order to raise the process productivity even more and to obtain higher quality in the junction, the submerged arc welding allows the use of several techniques. In this context, a technique that is widely used, especially in the Tungsten Inert Gas (TIG) welding, is the low frequency pulsed current. The advantages in the use of this technique range from operational gains of the process to metallurgical improvements of the weld. Despite the advantages already reported in several TIG welding studies, no reference is made to the use of this technique in submerged arc welding. In this study, an investigation was carried out on the use of low frequency pulsed current technique in the SAW process. For this, tests of bead-on-plate of ASTM A36 carbon steel with 13 mm of thickness were performed, varying pulsation times of 0.5s to 2.0s and the welding speeds (18 cm/min and 36 cm/min). The results showed that, in addition to being perfectly viable, the application of the thermal pulsation technique in SAW welding resulted, from the operational point of view, in greater efficiency in the process, without, however, entailing instabilities or problems related to the inclusion of slag. However, unlike what is reported in the literature, the thermal pulsation did not show significant metallurgical improvements for any of the welding conditions studied.

**Keywords:** welding, submerged arc, pulsed current, low frequencies.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema do processo de soldagem a arco submerso .....	13
Figura 2 - Representação esquemática da pulsação da corrente .....	17
Figura 3 - Representação esquemática da variante MIG/MAG com pulsação térmica .....	20
Figura 4 - Perfil de penetração para o processo MIG pulsado com pulsação térmica variando o tempo de pulsação .....	21
Figura 5 - Microestrutura da zona fundida de liga de titânio Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo .....	22
Figura 6 - Microestrutura da seção transversal do centro da solda com diferentes frequências: (a) 0 Hz; (b) 6 Hz; (c) 10 Hz .....	23
Figura 7 - Bancada de ensaios.....	26
Figura 8 - Características geométricas dos cordões .....	30
Figura 9 - Regiões de registro de imagem microestrutural.....	31
Figura 10 - Aspecto superficial dos cordões de solda .....	34
Figura 11 - Macrografias da seção transversal dos cordões de solda .....	36
Figura 12 - Medida de área fundida dos cordões para cada uma das amostras.....	37
Figura 13 - Medida de largura dos cordões para cada uma das amostras .....	38
Figura 14 - Medida de reforço dos cordões para cada uma das amostras .....	38
Figura 15 - Medida de penetração dos cordões para cada uma das amostras.....	39
Figura 16 - Micrografia da região central dos cordões de solda obtidos com velocidade de soldagem de 18 cm/min .....	41
Figura 17 - Micrografia da região central dos cordões de solda obtidos com velocidade de soldagem de 36 cm/min .....	42
Figura 18 - Detalhe do efeito da técnica de pulsação na amostra V36-1,0 .....	44

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Composição química do aço ASTM A36.....	27
Tabela 2 - Propriedades mecânicas para o aço ASTM A36.....	27
Tabela 3 - Composição química do par arame-fluxo F7A6-EM12K .....	28
Tabela 4 - Parâmetros ajustados para realização dos ensaios .....	29
Tabela 5 - Valores obtidos durante o processo de soldagem para cada ensaio .....	33

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ASTM - American Society for Testing and Materials

AWS – American Welding Society

DBCP – Distância bico de contato-peça

LTS - Laboratório de Tecnologia da Soldagem

MAG – Metal Active Gas

MIG – Metal Inert Gas

SAE - Society of Automotive Engineers

SAW – Submerged Arc Welding

TIG - Tungsten Inert Gas

UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina

ZAC – Zona afetada pelo calor

ZF – Zona fundida

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
1.1	Objetivos .....	12
1.1.1	Objetivo Geral.....	12
1.1.2	Objetivos Específicos .....	12
2	REFERENCIAL TEÓRICO .....	13
2.1	Soldagem a Arco Submerso .....	13
2.2	Pulsação da corrente em baixas frequências.....	16
3	METODOLOGIA .....	25
3.1	Bancada de ensaios.....	25
3.2	Materiais e métodos.....	27
3.3	Análise geométrica do cordão.....	29
3.4	Análise microestrutural das amostras .....	31
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	32
4.1	Análise dos resultados .....	32
5	CONCLUSÕES.....	45
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	46
	REFERÊNCIAS.....	47
	APÊNDICE A – Micrografias obtidas das amostras .....	50

## 1 INTRODUÇÃO

A construção de uma embarcação envolve, entre outras etapas, a união de chapas metálicas pelo processo de soldagem. Tal processo corresponde a aproximadamente um terço dos trabalhos da construção de um navio de grande porte (Okumura, 1982), o que demonstra a importância para o setor.

Neste contexto, nos estaleiros navais uma demanda existente é a soldagem de chapas de grande espessura, como por exemplo, a união dos elementos dos painéis estruturais do casco das embarcações. Em aplicações como essas, a utilização da soldagem a arco submerso, ou Submerged Arc Welding, doravante SAW, é muito empregada, visto que a mesma faz uso de elevadas intensidades de corrente e tem como característica a alta penetração do cordão de solda. Além disso, é considerado um processo de fácil mecanização, conferindo rapidez e economia quando comparado aos demais processos de soldagem com arco voltaico (Wainer, 1992).

Outra característica importante da soldagem a arco submerso é sua alta produtividade, justificada pela alta eficiência energética e grande taxa de deposição oferecida pelo processo. Esta produtividade pode ser elevada fazendo uso de eletrodos geminados conectados à mesma fonte (twin arc), eletrodos paralelos conectados a fontes individuais (tandem), eletrodo frio extra (cold-wire), eletrodo quente extra (hot-wire) e pela adição de pó metálico a soldagem. Essas diferentes técnicas de soldagem surgiram a partir da necessidade de se obter maiores índices de produtividade aliado a qualidade nas uniões realizadas através desses processos.

Em se tratando de técnicas de soldagem uma que é muito utilizada, especialmente no processo TIG, desde a década de 80, é a pulsação da corrente em baixas frequências, conhecida como pulsação térmica. Esta consiste no uso de uma corrente de pulso com alta energia, para promover a formação da poça fundida, e uma corrente de base com baixa energia, suficiente apenas para manter o arco aberto e promover o resfriamento da poça de fusão. As vantagens em se utilizar essa técnica

são inúmeras, entre elas: garantir o maior controle sobre a poça de fusão, promover menor aporte de calor, reduzir tensões residuais e distorções da peça, refinar o grão obtido na zona fundida e reduzir a largura da zona afetada pelo calor (ZAC).

Existem diversos trabalhos na literatura sobre o uso da pulsação térmica em processos de soldagem como TIG e MIG/MAG, no entanto, no levantamento bibliográfico realizado nesse trabalho, não foram encontrados artigos que trouxessem informações acerca de sua utilização na soldagem a arco submerso.

## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem por objetivo avaliar a técnica de pulsação da corrente de soldagem em baixa frequência no processo de soldagem a arco submerso.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Conceber uma bancada de ensaios;
- Realizar ensaios de soldagem com o processo arco submerso, empregando a técnica de pulsação da corrente em baixas frequências;
- Avaliar os efeitos obtidos com aplicação da corrente pulsada em baixa frequência ao processo de soldagem a arco submerso em relação aos aspectos morfológicos do cordão de solda;
- Analisar os efeitos obtidos com aplicação da corrente pulsada em baixa frequência ao processo de soldagem a arco submerso em relação as características metalúrgicas da zona fundida;

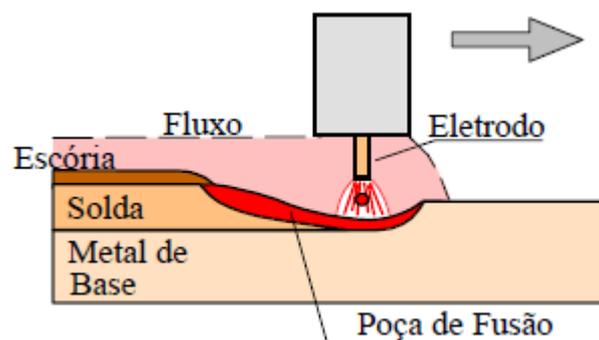
## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo aborda o emprego do método da pulsação da corrente em baixas frequências nos processos de soldagem a arco voltaico. Inicialmente, é realizada uma revisão da literatura acerca da soldagem a arco submerso abordando suas principais características para, na sequência, pontuar a aplicação da pulsação da corrente em baixas frequências em dois processos de soldagem: TIG e MIG/MAG.

### 2.1 Soldagem a Arco Submerso

A soldagem a arco submerso é um processo no qual o calor requerido para fundir o metal é produzido por um arco elétrico mantido entre a extremidade do arame de soldagem e a peça de trabalho. Conforme ilustrado na Figura 1, a ponta do arame de soldagem, o arco elétrico e a peça de trabalho são cobertos por uma camada de um material mineral granulado conhecido por fluxo. Esse fluxo é fundido na região próxima ao arco, protegendo a poça de fusão da contaminação atmosférica e formando, posteriormente, uma camada sólida de escória sobre o cordão.

Figura 1 - Esquema do processo de soldagem a arco submerso



Fonte: Modenesi (2006)

Além da função de proteção, o fluxo usado na soldagem a arco submerso funciona como um isolante térmico, garantindo uma excelente concentração de calor, o que caracteriza a alta penetração obtida por meio desse processo. Uma vez que fica completamente coberto pelo fluxo, o arco elétrico não é visível, e a soldagem se desenvolve sem faíscas, luminosidades ou respingos, diferente do ocorrido em processos de soldagem em que o arco é exposto (Wainer, 1992). Ademais, o fluxo pode ser também agente de adição de certos elementos de liga no cordão de solda, como por exemplo, o uso de fluxos contendo óxidos de titânio, que contribui para melhora da tenacidade e ductilidade do material (Paniagua, 2009) e o uso de fluxos com teores de CaO e CaF<sub>2</sub> que afetam a resistência ao impacto das peças soldadas (Jindal, 2013).

O material de adição do processo SAW pode ser encontrado no formato de arames maciços, tubulares ou fitas, fornecidos na forma de carretéis ou bobinas e são classificados de acordo com a sua composição química pelas normas AWS A.5.17 e A.5.23 (AWS, 1997) da American Welding Society. Os eletrodos costumam ter diâmetro entre 2,4 e 6,0 mm, o que permite a soldagem com altos valores de corrente, de tal maneira que o processo é aplicável a chapas com espessura a partir de 3,0 mm. As propriedades mecânicas obtidas pelo processo a arco submerso são funções das características do metal de base e da combinação arame-fluxo empregada na soldagem. A rigor, dependendo do tipo de material-base, deve-se escolher a combinação arame-fluxo mais adequada (Okumura e Taniguchi, 1982).

Em se tratando dos equipamentos, o processo SAW é geralmente realizado de forma mecanizada, embora também existam tochas de soldagem manuais para esse processo. Devido à sua facilidade de operação e produtividade, o arco submerso é empregado em grande escala na indústria. No Brasil, é um processo muito utilizado no ramo da construção naval, fabricação de tubos, vasos de pressão, trocadores de calor, caldeiras, entre outros tipos de equipamentos pesados (Paranhos e Souza, 1999). O equipamento básico consiste de uma fonte de energia, tocha de soldagem, alimentador de arame, sistema de controle, dispositivo para alimentação do fluxo, cabos elétricos e dispositivos para deslocamento da tocha de soldagem.

Com relação às fontes de soldagem, para eletrodos de diâmetro menor que 4mm, costuma-se utilizar fontes do tipo tensão constante. Nestes equipamentos, o

valor da corrente de soldagem é controlado pela velocidade de alimentação do arame, de modo que um aumento na velocidade de arame produzirá um aumento da corrente de soldagem de forma a manter constante o tamanho do arco (auto ajuste do processo). Já para arames de diâmetro mais elevado, é comum o uso de fontes do tipo corrente constante, que permitem que, durante a soldagem, o comprimento do arco varie sem que a corrente de soldagem sofra grandes alterações.

A energia de soldagem do processo é calculada baseada nos parâmetros de corrente, tensão e velocidade de soldagem e identifica a quantidade de calor produzida pelo arco por unidade de comprimento linear. Para a soldagem a arco elétrico o valor de  $E$ , em J/cm, é dado pela Equação 1 (Marques e Modenesi, 2014).

$$E = \frac{60 \cdot V \cdot I}{v_s} \quad (1)$$

Onde:

$V$  = tensão em volts [V];

$I$  = corrente elétrica em ampères [A];

$v_s$  = velocidade linear de soldagem, em cm/min.

Devido a possibilidade de se trabalhar com altos valores de corrente e possuir um rendimento térmico próximo de 100% (Machado, 1996), o processo SAW tem como forte característica o seu elevado rendimento de fusão e deposição. Mesmo em seu método mais simples e amplamente aplicado, que é a soldagem com arame único, o arco submerso possui altas taxas de deposição quando comparado a outros processos. No entanto, várias técnicas e configurações de tochas podem aumentar ainda mais essa produtividade a fim de atingir o máximo desempenho desse processo. Algumas destas incluem métodos simples como a adição de pó metálico na poça de fusão ou o uso de técnicas como eletrodos geminados conectados à mesma fonte (twin arc), eletrodos paralelos conectados a fontes individuais (tandem), eletrodo frio extra (cold wire) e eletrodo quente extra (hot wire). Neste contexto, é possível encontrar na literatura grande quantidade de trabalhos que demonstram os benefícios, em produtividade e/ou qualidade ao se utilizar essas técnicas. É o caso de Toscano (1997) que apresenta em seu trabalho como a adição de pó metálico à poça de fusão

na soldagem SAW resultou num aumento de 13% na taxa de deposição de material, sem, no entanto, acrescer o aporte de calor do processo. Ramakrishnan e Muthupandi (2012) constaram que para uma mesma entrada de calor, a taxa de deposição com a adição de um eletrodo extra frio foi quase o dobro do que o SAW convencional, aumentando de 8 kg/h para 14 kg/h. Em estudo similar sobre o uso de eletrodo extra, porém quente (hot-wire), foi observado por Tsuyama et al (2014) um aumento de 90% na produtividade do processo e refino da microestrutura do metal de solda, o que acarretou melhorias consideráveis nas propriedades mecânicas da peça.

Conforme pode ser observado, diversas técnicas de soldagem são empregadas com sucesso no processo a arco submerso. Algumas das técnicas citadas tem sua aplicação também em outros processos de soldagem, como é o caso do hot-wire, desenvolvida na soldagem TIG nos anos 60, e o emprego de mais de um arame na soldagem, usado no processo MIG/MAG, conhecido como MIG/MAG duplo arame. Isso demonstra como técnicas não são exclusivas de um único processo de soldagem e podem ser adaptadas para outros processos em busca de melhores resultados.

## 2.2 Pulsação da corrente em baixas frequências

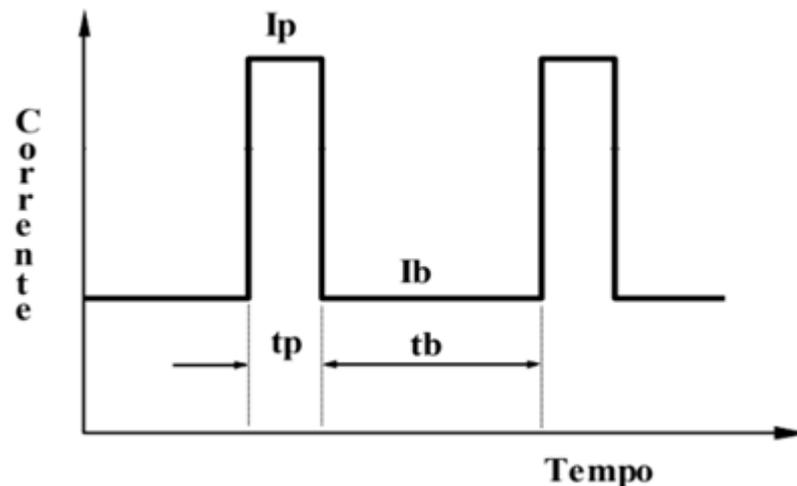
Ao longo das últimas décadas, diversas técnicas têm sido estudadas com o intuito de melhorar a produtividade e a qualidade dos cordões de solda produzidos pelos mais diversos processos de soldagem a arco. Aliado a isso, os avanços no campo da microeletrônica possibilitaram o desenvolvimento de fontes eletrônicas capazes de realizar o controle mais eficiente das variáveis de soldagem, em especial da corrente. No processo TIG, este controle possibilitou a concepção de novas técnicas de soldagem, entre elas, a soldagem com corrente pulsada. Cunha (2013) classifica a pulsação da corrente em três níveis: baixas frequências (menores que 20 Hz), altas frequências (entre 20 Hz e 20.000 Hz) e frequências ultraelevadas (acima de 20.000 Hz).

A pulsação da corrente em baixas frequências, também conhecida como pulsação térmica, foco de estudo deste trabalho, tem a variação da corrente em dois níveis bem definidos de energia, numa dada frequência. Um dos níveis é a corrente de pulso, que entrega alta energia a soldagem e é responsável por promover a

formação da poça fundida. O outro é a corrente de base, com baixa energia, suficiente apenas para manter o arco aberto e promover o resfriamento da poça de fusão. O efeito da pulsação da corrente sobre a geometria do cordão de solda resulta em cordões escamados, uma vez que a solda é conduzida por vários pontos de solda sobrepostos, sendo que a sobreposição entre esses pontos depende da frequência de pulsação e da velocidade de soldagem (Cunha, 2013).

A Figura 2 ilustra uma representação esquemática da corrente pulsada. Normalmente a pulsação da corrente é em formato retangular e as características desse tipo de soldagem são determinadas pelo pulso de corrente ( $I_p$ ), corrente de base ( $I_b$ ), tempo de pulso ( $t_p$ ) e tempo base ( $t_b$ ).

Figura 2 - Representação esquemática da pulsação da corrente



Fonte: Modenesi (2012)

Com base nos parâmetros apresentados na Figura 2, é possível calcular a corrente média da soldagem ( $I_M$ ) desse processo, conforme Equação 2, abaixo:

$$I_M = \frac{I_p t_p + I_b t_b}{t_p + t_b} \quad (2)$$

A vantagem no uso da corrente pulsada, em geral, é permitir um maior controle sobre o tamanho da poça de fusão com uma menor entrada de calor no processo. Assim, é possível obter maiores penetrações do que com o uso de corrente

contínua constante e trabalhar com materiais mais sensíveis à entrada de calor com minimização das distorções.

Em seu estudo, Santos et al. (1998, apud Santos, 2001, p.99) detectaram o aumento da penetração em soldas realizadas com o processo TIG com pulsação da corrente em baixas frequências. Os autores utilizaram nos ensaios 0,5 segundos como tempo de pulso e base, e o mesmo valor de corrente constante foi usado na corrente média de soldagem do processo sem pulsação, sendo  $I_p = 132$  A,  $I_b = 10$  A,  $I_m = 71$  A. Além disso, a velocidade de soldagem dos ensaios foi de 14,4 cm/min. Com isso, os autores puderam notar um volume maior de material dentro da zona fundida da solda realizada com pulsação térmica. Como os dois experimentos foram realizados com a mesma velocidade de soldagem e aproximadamente o mesmo aporte térmico, foi possível concluir que a soldagem com pulsação térmica teve uma eficiência de fusão mais alta do que a soldagem convencional do processo TIG.

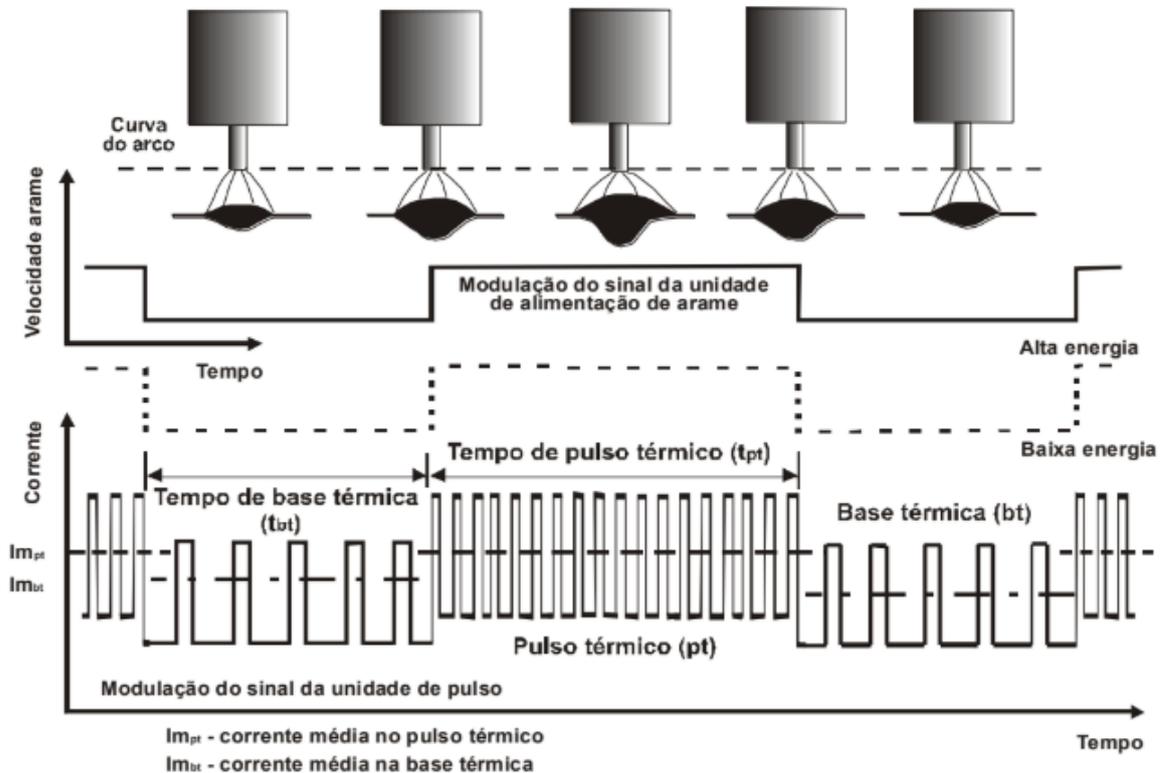
Em estudo comparativo sobre pulsação térmica também no processo TIG, Gonzalez et al (1994) concluem que a principal vantagem da técnica de pulsação é a possibilidade de se obter altos valores de penetração, com baixos valores de corrente média. Eles obtiveram, para um mesmo valor de penetração, menor entrada de calor com o processo TIG pulsado em comparação ao TIG convencional o que, portanto, reduz distorções e tamanho da ZAC e se torna ideal quando se requer soldar chapas finas. A possibilidade em se soldar chapas finas empregando a pulsação térmica está relacionada com a alteração na tensão superficial e viscosidade da poça entre os períodos de pulso e de base térmica, isto é, na fase de pulso térmico haverá uma fusão mais efetiva (maior penetração), enquanto que na base térmica ocorrerá um “resfriamento” da poça (menor penetração).

Traidia et al (2010), também notou a redução do aporte térmico no uso da soldagem TIG pulsado na soldagem de aço inoxidável AISI 304. Estudando os efeitos da frequência de pulsação, os autores obtiveram as mesmas dimensões para a poça de soldagem (largura e penetração) nos processos com pulsação e sem pulsação, porém com redução de 22% da energia de soldagem pela técnica pulsada. Além disso, ao variar as frequências em 2, 4 e 6 Hz, perceberam que o cordão de solda com as maiores dimensões foi obtido pela soldagem com frequência de pulsação de 2 Hz. Os autores concluem que, como a corrente de pulso é mantida durante mais tempo para frequências menores, esta provoca um aumento da temperatura da poça de fusão e,

portanto, das dimensões. Também constataram que quanto maior for a frequência, mais as dimensões da poça de soldagem se assemelharam às obtidas com corrente média constante.

A soldagem MIG/MAG pulsada, também é um processo que oferece capacidade de controle dos níveis de energia durante a soldagem. Porém, diferente do processo TIG pulsado, neste a adição de material faz parte do princípio de funcionamento do processo e o controle da corrente é usado para garantir uma transferência metálica mais uniforme. No entanto, a alta frequência de pulsação usada no MIG/MAG não permite a ação de aquecimento e resfriamento da poça, necessária para se controlar a mesma. Assim, buscando unir as características de maior controle de poça de fusão do processo TIG pulsado e de maior capacidade de produção do processo MIG/MAG pulsado, desenvolveu-se a soldagem MIG/MAG Pulsado com pulsação térmica (Figura 3). Neste processo, a pulsação térmica, também chamada de dupla pulsação, busca aliar as vantagens do processo TIG pulsado com MIG/MAG pulsado convencional, trabalhando em dois níveis de pulsação, um para controle da transferência, com maior frequência, e outro para controle da poça, em baixa frequência, sendo que dentro de cada nível a corrente é pulsada.

Figura 3 - Representação esquemática da variante MIG/MAG com pulsação térmica



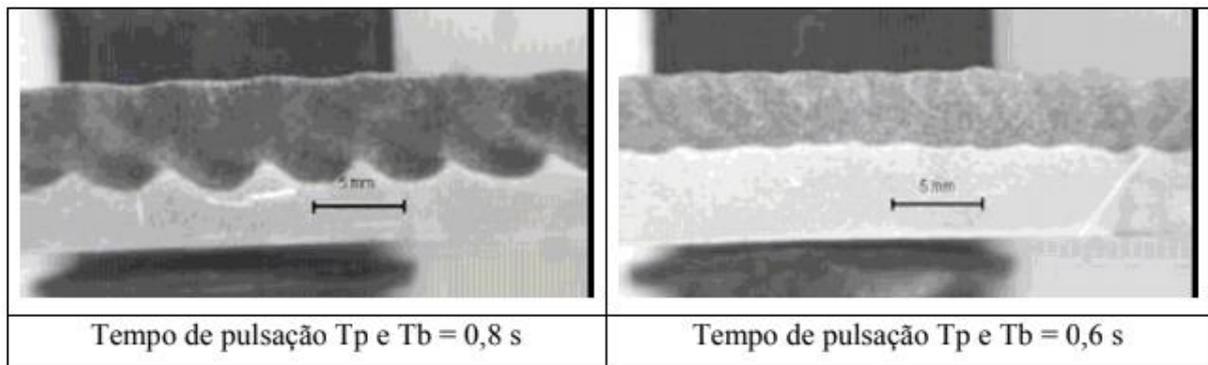
Fonte: Barra (2002)

O melhor controle da penetração da solda adquirido pelo uso da técnica da pulsação térmica também é notado para o processo MIG/MAG. Ziberov (2013), em estudo comparativo do processo MIG/MAG com pulsação convencional e pulsação térmica, soldou chapas de aço carbono ABNT 1020 utilizando uma corrente média de 70 A na base térmica e de 160 A no pulso térmico, garantindo uma corrente média total do processo de 115 A. Para termos de comparação, o autor manteve a corrente média da soldagem MIG/MAG Pulsado convencional constante em 115 A, e também manteve constante o mesmo volume de cordão nos dois processos. Os resultados obtidos indicaram maior controle da poça de fusão pelo processo MIG/MAG pulsado com pulsação térmica, pois ele permitiu alcançar penetração total com maior regularidade. Ziberov (2013) conclui que este controle certamente está ligado com o resfriamento da poça de fusão durante os períodos da base térmica (menor corrente média).

Silva e Scotti (2001), demonstraram, para uma liga de alumínio na soldagem MIG, que o tempo de pulsação térmica  $t_p$  e  $t_b$  têm efeito significativo sobre a

profundidade e regularidade da penetração da solda (Figura 4), e também sobre o aspecto visual do cordão, avaliado pelo número de escamas por unidade de comprimento. Os autores realizaram experimentos com combinações de  $t_b$  e  $t_p$  em quatro níveis, variando os valores de 0,4 a 1,0 s, e observaram que o aumento do parâmetro  $t_b$ , provoca diminuição da penetração e o inverso acontece com  $t_p$ , ou seja, o seu aumento leva a aumentar a penetração. Sobre o aspecto visual do cordão, os autores alcançaram um melhor resultado para os menores valores dos parâmetros de pulsação  $t_p$  e  $t_b$ . Cabe ressaltar que o volume de material depositado por unidade de comprimento da solda foi mantido constante para todos os ensaios.

Figura 4 - Perfil de penetração para o processo MIG pulsado com pulsação térmica variando o tempo de pulsação



Fonte: Silva e Scotti (2001)

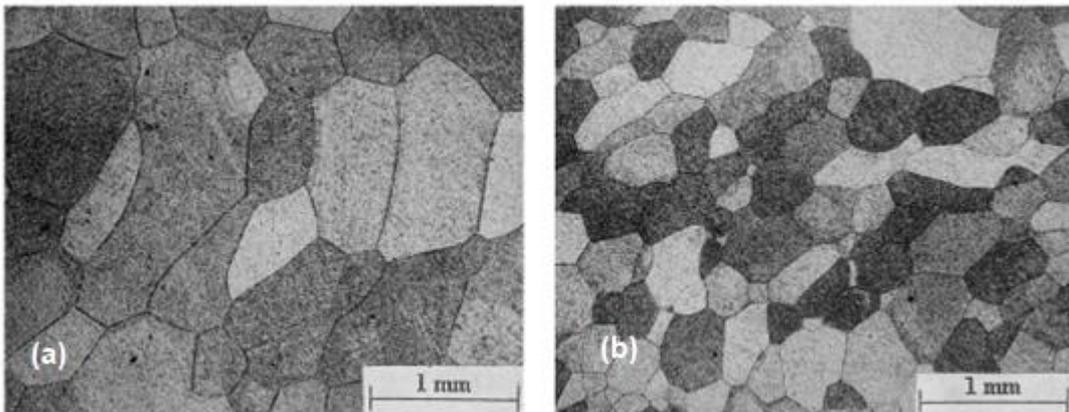
Além da pulsação térmica concentrar os efeitos do calor e facilitar a obtenção de cordões com penetração mais uniforme, ela mantém a poça fundida na sua dimensão máxima por menos tempo, evitando o escorrimento de material em soldas realizadas sobre a cabeça e proporcionando uma geometria mais adequada para o cordão de solda produzido (Delgado, 2000).

A técnica da pulsação térmica, aplicada nos processos de soldagem TIG e MIG/MAG é reportada também como uma excelente controladora do refinamento de grãos. De acordo com Wu et al (1999), o refino do grão acontece devido ao ciclo térmico causado pela pulsação da corrente, que é responsável por interferir diretamente no modo de solidificação da zona fundida. Esta técnica de soldagem causa uma variação periódica do aporte de calor na poça de fusão originando flutuações térmicas, as quais dependem das condições de pulsação. Uma das consequências dessas flutuações térmicas é a interrupção periódica do processo de

solidificação. Como a corrente de base diminui a entrada de calor, a interface sólido-líquido avança na direção do arco; posteriormente com o acréscimo da corrente de pulso a solidificação é interrompida e pode ocorrer uma refusão das dendritas solidificadas, promovendo o refino dos grãos.

Em estudo feito sobre liga de titânio no processo TIG, Sundaresan et al (1999) obtiveram como resultado um significativo refinamento da microestrutura do material com o uso da corrente pulsada (em especial para pulsação com corrente alternada). Os autores variaram as frequências de pulsação em 2, 4, 6 e 8 Hz e constataram que o tamanho de grão foi menor nas soldas feitas a uma frequência de pulso de 6 Hz (Figura 5). O refinamento de grãos observado foi atribuído a melhora no fluxo do fluido, redução dos gradientes de temperatura e a mudança contínua no tamanho e na forma da poça de solda causado pela pulsação. O refinamento da microestrutura resultou ainda em um aumento considerável na ductilidade da zona fundida do metal.

Figura 5 - Microestrutura da zona fundida de liga de titânio Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo  
(a) Corrente contínua sem pulsação; (b) Corrente contínua pulsada em 6Hz

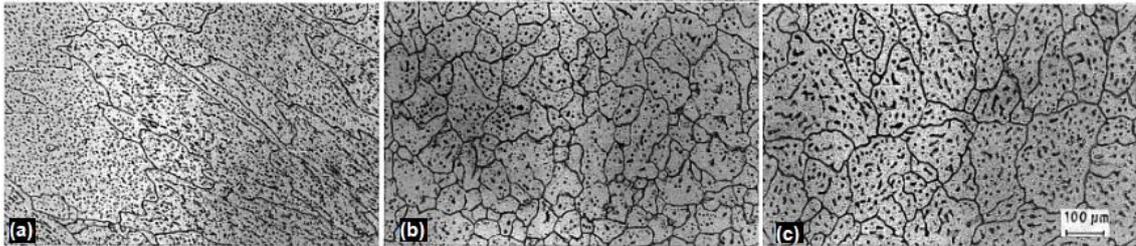


Fonte: Sundaresan et al (1999)

Reddy et al (1998), estudaram os efeitos da frequência de pulsação na microestrutura do cordão de solda, dureza e nas propriedades de tração de chapas de liga de alumínio-lítio. Os autores observaram que a estrutura no metal era predominantemente colunar no caso do processo convencional com soldagem TIG (corrente contínua). A estrutura de grãos tornou-se mais fina e equiaxiada com a introdução da pulsação de corrente. Além disso, dentre os valores de frequências estudados (1 a 10 Hz), houve um intervalo de frequência ótimo sobre o qual o

refinamento do grão foi máximo (6 a 8 Hz), conforme Figura 6. A mesma faixa de frequência ótima correspondeu aos valores máximos em dureza, resistência à tração e alongamento percentual.

Figura 6 - Microestrutura da seção transversal do centro da solda com diferentes frequências: (a) 0 Hz; (b) 6 Hz; (c) 10 Hz



Fonte: Reddy et al (1998)

Janaki Ram et al (2004) usaram corrente pulsada na soldagem TIG da superliga Inconel 718 e também conseguiram um refinamento significativo da microestrutura. Da mesma forma, Rao et al (2005) obtiveram grãos mais finos nas ligas de alumínio de cobre 2219-T6 e 2219-T87 usando TIG com corrente pulsada e alcançaram o maior refinamento usando uma combinação de corrente pulsada alternada e oscilação de arco.

Barra (2003) avaliou as vantagens metalúrgicas do emprego da pulsação térmica (efeito do espaçamento entre os pulsos térmicos, velocidade de soldagem, tempo e intensidade da corrente de pico na fase térmica), na soldagem MIG/MAG da liga Al-Mg, sobre o controle do processo de solidificação da ZF. Os resultados demonstram que o refinamento obtido se deve claramente à transformação de fase originada pela imposição de sucessivos ciclos térmicos (aquecimento e resfriamento de uma estreita região) passando pela temperatura de austenitização da liga.

O uso da técnica da pulsação térmica para refinamento microestrutural e uma transição de crescimento dos grãos colunares para equiaxial, é relatado também em aços inoxidáveis, tanto no processo TIG (Shinoda et al (1990); Villafuerte e Kerr (1990)), quanto na soldagem MIG/MAG (Ghosh et al, 1998) e em aços baixo carbono (Becker Adams (1979); Figueirôa et al (2005)). A corrente pulsada promove um refinamento adicional em ligas que sofrem transformação de fase depois da solidificação, como os aços inoxidáveis, os quais sofrem ciclos térmicos na zona fundida dentro da faixa de transformação austenítica.

Já se tratando de propriedades mecânicas, a soldagem com a técnica da corrente pulsada também apresenta vantagens em relação a soldagem com corrente constante. A estrutura colunar, normalmente presente na ZF, é associada com defeitos tais como trinca de solidificação e propriedades mecânicas mais pobres. Assim, num refinamento microestrutural é esperado um melhoramento nas propriedades mecânicas do cordão. Balasubramaniam et al (2008) avaliaram o efeito dos processos TIG pulsado e MIG pulsado sobre a resistência à propagação de trinca por fadiga na soldagem da liga AA7075. Os autores observaram que a aplicação de pulsação de corrente, em função do refino de grão propiciado, é benéfica para o incremento da resistência à propagação de trinca por fadiga na liga estudada. Outros autores, como Farahani (2012), Kumar (2007) e Rao et al (2005), também obtiveram resultados semelhantes em relação a tenacidade, tração e tensões residuais, constatando melhoras dessas propriedades com o uso da técnica da corrente pulsada.

Percebe-se, com base na literatura, uma série de benefícios decorrentes do uso da pulsação da corrente em baixas frequências em processos de soldagem como TIG e MIG/MAG. No entanto, ainda não são encontrados estudos acerca do efeito dessa técnica aplicada à soldagem a arco submerso, ponto esse a ser explorado no presente trabalho.

### 3 METODOLOGIA

De modo a avaliar os efeitos da técnica de pulsação da corrente em baixas frequências no processo de soldagem a arco submerso, foram realizados cordões de solda de simples deposição sobre a chapa. Ao todo foram realizados 10 ensaios, variando o tempo de pulso e base, e a energia de soldagem do processo, com a finalidade de analisar a influência desses parâmetros durante o processo de soldagem. Além disso, para discussões de carácter comparativo, duas das dez amostras foram produzidas sem a técnica da pulsação, usando-se apenas a corrente constante de mesmo valor que a corrente média de soldagem dos ensaios com pulsação térmica.

Após a soldagem, retirou-se duas amostras de cada corpo de prova para análises metalográficas. Estas consistiram de análises dos aspectos geométricos dos cordões de solda obtidos e micrografias a fim de avaliar o tamanho de grão.

#### 3.1 Bancada de ensaios

Para estudar a aplicação da técnica da pulsação da corrente em baixas frequências na soldagem a arco submerso, uma bancada de ensaios foi montada no Laboratório de Tecnologia da Soldagem (LTS) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Centro Tecnológico de Joinville. Esta é composta por uma fonte de soldagem multiprocesso, tocha de soldagem, tracionador de arame, sistema de aquisição de dados, alimentador de fluxo e sistema de deslocamento de tocha, conforme apresentado na Figura 7.

Figura 7 - Bancada de ensaios



Fonte: Autor (2018)

A fonte de soldagem utilizada consistiu no modelo DigiPLUS A7 da empresa IMC, com capacidade de corrente de até 450 A. No processo a arco submerso, a fonte de soldagem opera no modo tensão constante, o que significa que o comprimento do arco elétrico é auto ajustado de acordo com as variações na corrente de soldagem. Em fontes com essa característica de saída, o valor da corrente está diretamente relacionado à velocidade de alimentação do arame. Quanto maior for a velocidade de alimentação, maior será a corrente fornecida pela fonte de modo a fundir o arame alimentado à poça de fusão e, assim, ajustar a altura do arco. Sendo assim, com o objetivo de obter a pulsação da corrente de soldagem durante os ensaios, variou-se a velocidade de alimentação do arame do processo. Ou seja, ao pulsar o valor da velocidade de alimentação do arame obteve-se a pulsação da corrente devido ao auto ajuste do processo (controle interno). O ajuste da velocidade de alimentação do arame é realizado na própria fonte de soldagem, que se comunica com a unidade de controle externa do tracionador de arame.

Para o deslocamento do cabeçote de soldagem foi utilizado o sistema de deslocamento de tocha Tartilope V2. Na realização dos ensaios foi utilizado ainda o sistema de aquisição de dados SAP V4, com o objetivo de registrar os dados instantâneos de tensão de arco e corrente de soldagem. De posse desses dados foi possível obter as medidas de corrente média de cada ensaio, bem como o valor real da energia de soldagem.

### 3.2 Materiais e métodos

Para a realização dos ensaios de soldagem foi utilizado como metal de base chapas de aço ASTM A36 com dimensões de 250 mm x 120 mm x 13 mm. As Tabelas 1 e 2 apresentam, respectivamente, a composição química e as propriedades mecânicas para o aço ASTM A36, estabelecidas pela norma ASTM A36.

Tabela 1- Composição química do aço ASTM A36

<b>Composição Química</b>					
C máx	Mn	P máx	S máx	Si máx	Cu mín
0,28	0,6 - 0,9	0,04	0,05	0,4	0,2

Fonte: ASTM A36 (2010)

Tabela 2 - Propriedades mecânicas para o aço ASTM A36

<b>Propriedades Mecânicas</b>	
Limite de escoamento (LE)	250 MPa
Limite de ruptura (LR)	400 - 550 MPa
Alongamento	23%

Fonte: ASTM A36 (2010)

Tratando-se dos consumíveis, a escolha do conjunto arame-fluxo, foi baseada na norma AWS 5.17 (AWS, 1997), da American Welding Society. O metal de adição utilizado foi o arame maciço com diâmetro de 2,4 mm, classificado pela AWS como EM12K. Em relação ao fluxo, utilizou-se o F7A6, também classificado pela norma AWS A5.17, resultando no par arame-fluxo igual a F7A6-EM12K. A Tabela 3, a seguir, apresenta a composição química para o arame e fluxo utilizados no processo.

Tabela 3 - Composição química do par arame-fluxo F7A6-EM12K

%	C	Si	Mn	P	S	Cu
<b>Arame</b>	0,05-0,15	0,10-0,35	0,80-1,25	0,03	0,03	0,35
<b>Fluxo</b>	0,09	0,40	1,55	0,023	0,004	-

Fonte: AWS (1997) e Hyundai (2018)

Antes da realização dos ensaios, os corpos de prova foram limpos e esmerilhados para garantir a uniformidade da solda. Após a montagem da bancada, fixou-se a distância entre bico contato-peça (DBCP) em 25 mm.

A fonte de soldagem foi ajustada para fornecer uma tensão de 30 V em todos os ensaios. Com relação a corrente de soldagem, esta é auto ajustada de acordo com a velocidade de alimentação de arame, de forma a manter a tensão de arco inserida na fonte. Assim, ajustaram-se dois valores de velocidade de alimentação de arame, levando-se em consideração a capacidade do equipamento utilizado, que resultaram em dois valores de corrente de soldagem, sendo esses o valor da corrente de pulso e a corrente de base.

A fim de facilitar a realização dos testes e a análise dos resultados, foi adotada a igualdade entre os tempos de pulsação da corrente (base e pulso). Esses foram definidos de acordo com a capacidade dinâmica do tracionador de arame, visto que a alternância das correntes de base e de pulso dependiam, na verdade, da alternância entre as velocidades de arame ajustadas no processo. Os tempos de pulsação definidos foram de 0,5, 1,0, 1,5 e 2,0 segundos.

A Tabela 4 relaciona o conjunto de parâmetros ajustados para cada um dos ensaios. A fim de facilitar a identificação das amostras, estas foram nomeadas de acordo com a velocidade de soldagem ajustada seguida pelo tempo de base/pulso utilizado.

Tabela 4 - Parâmetros ajustados para realização dos ensaios

Amostra	Velocidade de soldagem [cm/min]	Tensão [V]	Velocidade de alimentação do arame base [m/min]	Velocidade de alimentação do arame pulso [m/min]	Tempo de base [s]	Tempo de pulso [s]	Frequência [Hz]
V18-0,0	18	30,0	1,26	1,26	-	-	-
V18-0,5	18	30,0	0,71	1,81	0,5	0,5	1,00
V18-1,0	18	30,0	0,71	1,81	1,0	1,0	0,50
V18-1,5	18	30,0	0,71	1,81	1,5	1,5	0,33
V18-2,0	18	30,0	0,71	1,81	2,0	2,0	0,25
V36-0,0	36	30,0	1,26	1,26	-	-	-
V36-0,5	36	30,0	0,71	1,81	0,5	0,5	1,00
V36-1,0	36	30,0	0,71	1,81	1,0	1,0	0,50
V36-1,5	36	30,0	0,71	1,81	1,5	1,5	0,33
V36-2,0	36	30,0	0,71	1,81	2,0	2,0	0,25

Fonte: Autor (2018)

Conforme pode ser observado na Tabela 4, foram realizados dez cordões de solda com parâmetros distintos. Nestes, variaram-se os valores de tempo de pulso e de tempo de base, e de velocidade de soldagem, objetivando a realização de ensaios com quatro frequências de pulsação diferentes, sendo estas: 1,0, 0,5, 0,33 e 0,25 Hz, e duas energias de soldagem. Desse modo, foi possível observar a influência destes parâmetros na aplicação da técnica de pulsação térmica no processo SAW. A fim de possibilitar as análises e discussão dos resultados, dois dos ensaios (1 e 6) ocorreram sem a aplicação da técnica estudada, onde o valor de velocidade de arame para estes ensaios foi ajustado de forma a fornecer um valor médio de corrente constante igual ao valor de corrente média dos ensaios com a técnica de pulsação.

### 3.3 Análise geométrica do cordão

Para realizar a medição das características geométricas dos cordões, os corpos de prova, após soldados, passaram primeiramente pela etapa de corte. Nos cordões cuja geometria apresentou alguma variação devido a técnica de pulsação empregada, foram retiradas duas amostras afim de melhorar a confiabilidade dos resultados. Todos os cortes foram realizados em seções transversais ao cordão de

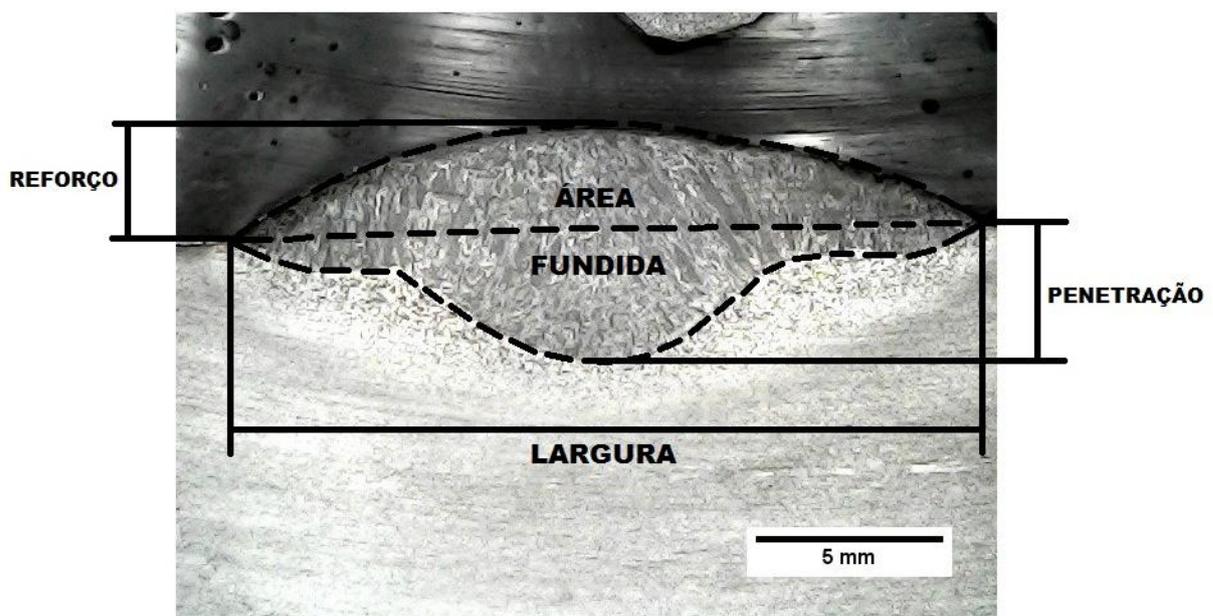
solda e com equipamentos que promoviam a refrigeração da peça, de forma a não alterar a microestrutura do material.

Após cortadas, as seções foram embutidas em resina e passaram pelo processo de lixamento superficial, onde foram usadas lixas com gramaturas de 80, 180, 240, 400 e 600 mesh. Iniciou-se o processo com a lixa de gramatura 80 e as trocas de lixa ocorreram no sentido das gramaturas menos grosseiras, até a lixa de 600 mesh.

Em seguida foi realizado o ataque químico das amostras, utilizando o reagente Nital 4%, sendo o ataque realizado pela técnica de imersão. Após a imersão, a superfície das amostras foi limpa com água e álcool e seca com algodão.

Com estes procedimentos foi possível revelar nas amostras as regiões de interesse para análise da geometria resultante dos cordões de solda. As imagens obtidas foram analisadas através de um programa de tratamento de imagem, o open source ImageJ. Este software permite realizar a medição de áreas selecionadas na imagem, a partir da calibração por meio de uma distância já conhecida. Assim realizaram-se as medidas de penetração (P), largura (L), reforço (R) e área fundida (Af) dos cordões obtidos, conforme Figura 8. Para os cordões em que se retirou mais do que uma amostra, as dimensões finais foram as médias obtidas nas amostras.

Figura 8 - Características geométricas dos cordões



Fonte: Autor (2018)

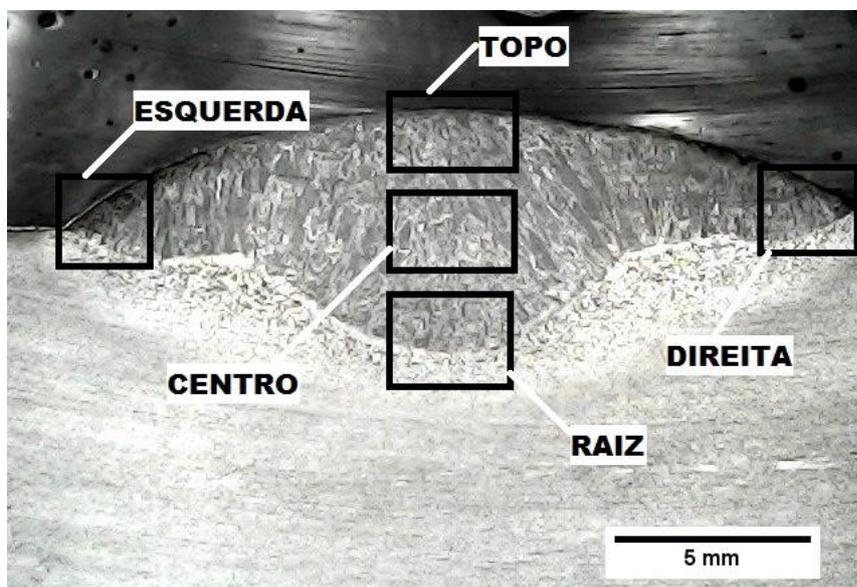
### 3.4 Análise microestrutural das amostras

Para a análise microestrutural, as amostras preparadas para as macrografias foram novamente lixadas, dessa vez com lixas mais finas, de 1000 e 1500 mesh, até obter uma superfície com riscos suaves, adequada para a etapa de polimento.

O processo de polimento foi realizado com auxílio de uma polidora mecânica, onde o abrasivo utilizado foi a alumina ( $1\mu\text{m}$ ). Após polidas, as amostras foram mais uma vez atacadas com Nital 4% e em seguida foram capturadas imagens da microestrutura por meio do microscópio óptico.

Para possibilitar a comparação microestrutural entre os corpos de prova confeccionados, foi proposto para o presente trabalho o registro de pelo menos 5 regiões de cada amostra, conforme Figura 9. Estes registros foram realizados com ampliação de 50 vezes para melhor capturar os efeitos da técnica de pulsação térmica da corrente nas regiões observadas.

Figura 9 - Regiões de registro de imagem microestrutural



Fonte: Autor (2018)

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

No presente capítulo são descritos os resultados obtidos a partir dos procedimentos experimentais definidos no capítulo anterior.

Primeiramente discute-se os resultados dos ensaios realizados em relação aos dados obtidos durante a realização das soldagens e os aspectos superficiais dos cordões de solda, resultantes do processo a arco submerso com corrente constante e com a técnica de pulsação térmica da corrente.

Em seguida são apresentadas as macrografias dos cordões de solda e discute-se os efeitos dos parâmetros variados no experimento em relação a geometria resultante dos cordões.

Por fim são expostas as micrografias de cada região de interesse das amostras confeccionadas e discute-se sobre os efeitos da pulsação térmica da corrente nas microestruturas encontradas, além de apresentar correlações com a literatura estudada, quando aplicável.

### 4.1 Análise dos resultados

Os dados gerados durante a aplicação do processo de soldagem SAW com corrente constante e com a técnica de pulsação térmica da corrente, são apresentados na Tabela 5:

Tabela 5 - Valores obtidos durante o processo de soldagem para cada ensaio

<b>Amostra</b>	<b>Corrente média de base (A)</b>	<b>Corrente média de pulso (A)</b>	<b>Corrente média de soldagem (A)</b>	<b>Tensão média (v)</b>	<b>Energia de soldagem (kJ/cm)</b>
V18-0,0	-	-	308	27,2	27,93
V18-0,5	215	403	309	27,2	28,20
V18-1,0	210	413	312	27,1	28,14
V18-1,5	203	410	307	27,2	27,79
V18-2,0	205	407	306	27,1	27,64
V36-0,0	-	-	306	27,5	14,03
V36-0,5	205	406	306	27,2	13,85
V36-1,0	207	408	308	27,2	13,94
V36-1,5	199	409	304	27,3	13,83
V36-2,0	200	410	305	27,1	13,78

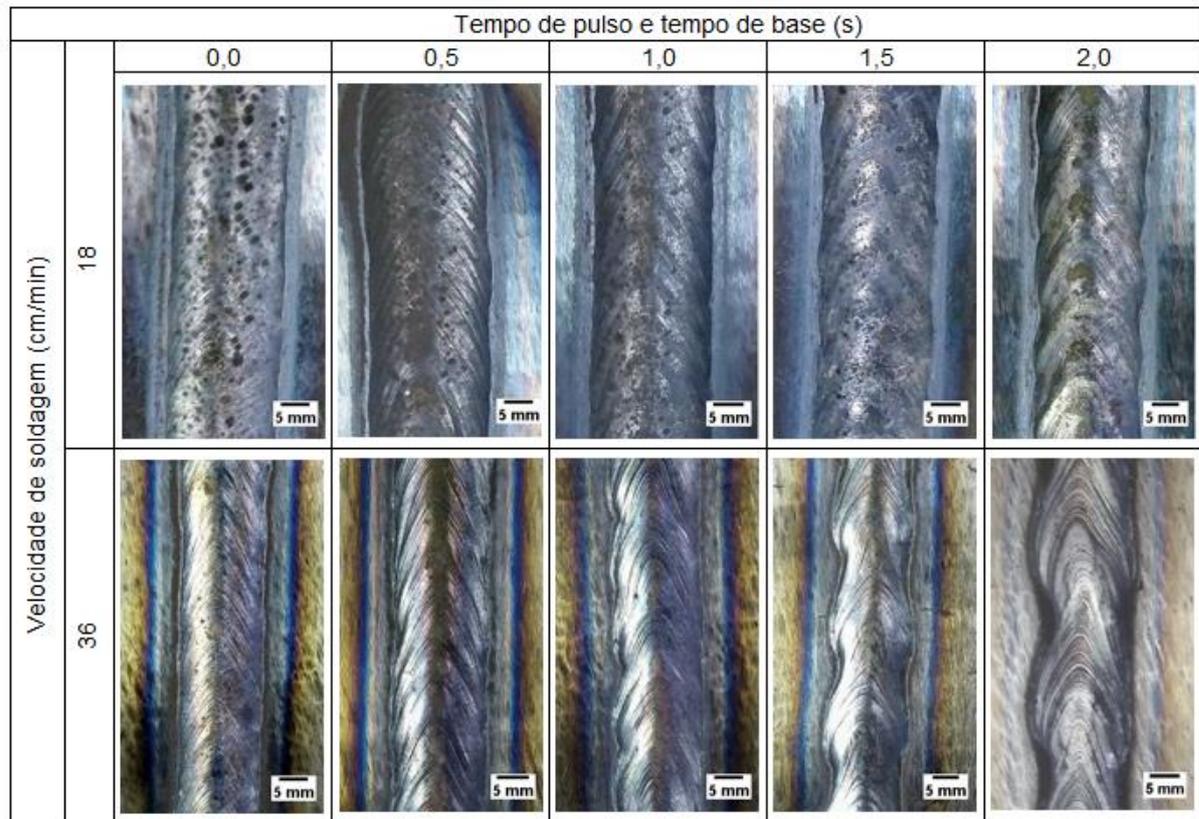
Fonte: Autor (2018)

Na Tabela 5, os dados apresentados das correntes média e tensão média foram arquivados com o auxílio do SAP V4 durante a realização dos ensaios, bem como os valores da energia de soldagem.

Nota-se que conforme esperado como comportamento de um processo de tensão constante, as tensões médias de arco medidas apresentaram-se em um pequeno intervalo de valores, com variação máxima de 0,4 volts entre os registros. Os valores de corrente média também não apresentaram resultados muito dispersos, com uma variação de cerca de 3% entre o maior e o menor valor registrado. Dessa forma, as energias de soldagem obtidas foram também semelhantes, dentro do mesmo grupo de velocidades de soldagem, como pode ser visto na última coluna da Tabela 5. Para as soldagens realizadas com velocidade de 18 cm/min, os valores de energia medidos ficaram próximos de 28 kJ/cm e para o grupo de soldas feitas com velocidade de 36 cm/min, a energia de soldagem girou em torno de 14 kJ/cm.

Os cordões de solda obtidos a partir dos 10 ensaios realizados são apresentados na Figura 10.

Figura 10 - Aspecto superficial dos cordões de solda



Fonte: Autor (2018)

Com base na imagem acima, é possível notar que os cordões de solda apresentaram um bom aspecto visual, em que não se observa nenhuma inclusão de escória ou porosidade aparente, e nota-se a ausência de qualquer descontinuidade superficial que, por ventura, viesse a ser causada pelo efeito da pulsação térmica da corrente.

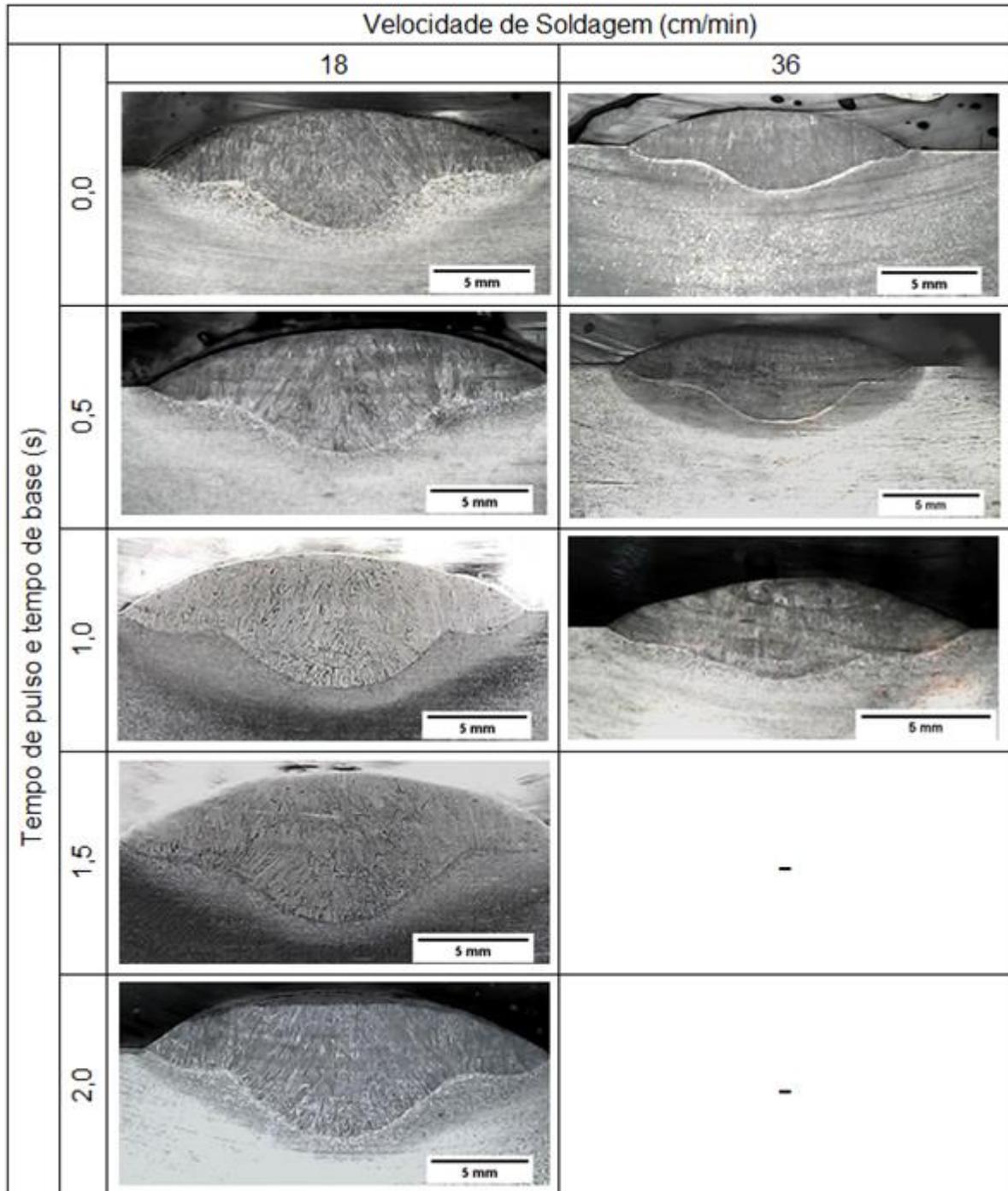
Em relação à geometria, os ensaios realizados com a velocidade de 18 cm/min, resultaram em cordões de maior largura quando comparados aos ensaios realizados com a velocidade de 36 cm/min. Evidentemente, este resultado já era esperado visto que, uma menor velocidade de soldagem acarreta em uma maior quantidade de energia calorífica transferida à peça, resultando, portanto, em uma poça de fusão maior.

Outro ponto a ser avaliado diz respeito ao aspecto escamado observado nos cordões devido a pulsação da corrente. Nota-se que este aspecto intensificou-se a medida em que se aumentou o tempo de pulso da corrente, ou seja, diminuiu-se a frequência de pulsação. É possível observar ainda que, nos cordões realizados com

a maior velocidade de soldagem (36 cm/min), o aspecto escamado ficou mais evidente e espaçado, ao ponto de que, quando pulsou-se a corrente com tempos maiores, a frequência de pulsação tornou-se tão baixa que tornou-se incompatível com a velocidade de soldagem empregada. Este foi o caso dos cordões resultantes dos ensaios V36-1,5 e V36-2,0 que, conforme pode ser visto na Figura 10, apresentaram grande variação na largura. Pode-se concluir, portanto, que a velocidade de soldagem utilizada, de 36 cm/min, e os tempos de pulsação, de 1,5 e 2,0 segundos, não foram parâmetros compatíveis, de modo que foram obtidos cordões muito irregulares com relação à largura e, possivelmente, penetração da solda. Para essa condição de velocidade de soldagem, portanto, pode-se definir como limite máximo de tempo de pulso 1,0 segundo, pois acima deste tem-se como resultado cordões com forma muito irregular, o que não é considerado satisfatório para o processo.

As análises macrográficas da seção transversal dos cordões de solda obtidos são apresentadas na Figura 11. Optou-se por excluir dessa etapa do estudo os corpos de prova resultantes dos ensaios V36-1,5 e V36-2,0, que, conforme já discutido, apresentaram grande irregularidade na forma do cordão, não sendo possível, portanto, encontrar um padrão para analisar suas dimensões.

Figura 11 - Macrografias da seção transversal dos cordões de solda



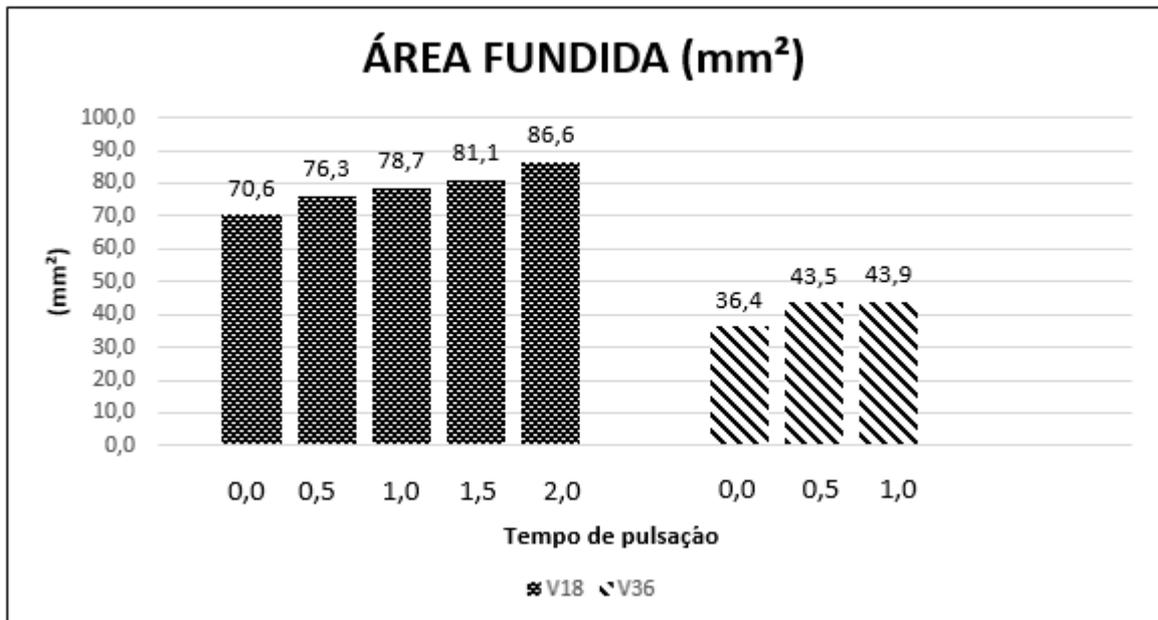
Fonte: Autor (2018)

Conforme pode ser observado, ao fazer o corte da seção transversal dos cordões obtidos, não verificou-se, do mesmo modo que superficialmente, nenhuma descontinuidade interna, inclusão de escória ou porosidade nas soldas. Ainda em relação ao aspecto visual dos cordões, percebe-se que a geometria resultante é semelhante em termos de forma, para as amostras soldadas com o mesmo valor de

energia de soldagem, ou seja, a pulsação da corrente não foi capaz de promover alterações na morfologia dos cordões.

A Figura 12, a seguir, apresenta o valor de área fundida medido para cada uma das amostras.

Figura 12 - Medida de área fundida dos cordões para cada uma das amostras



Fonte: Autor (2018)

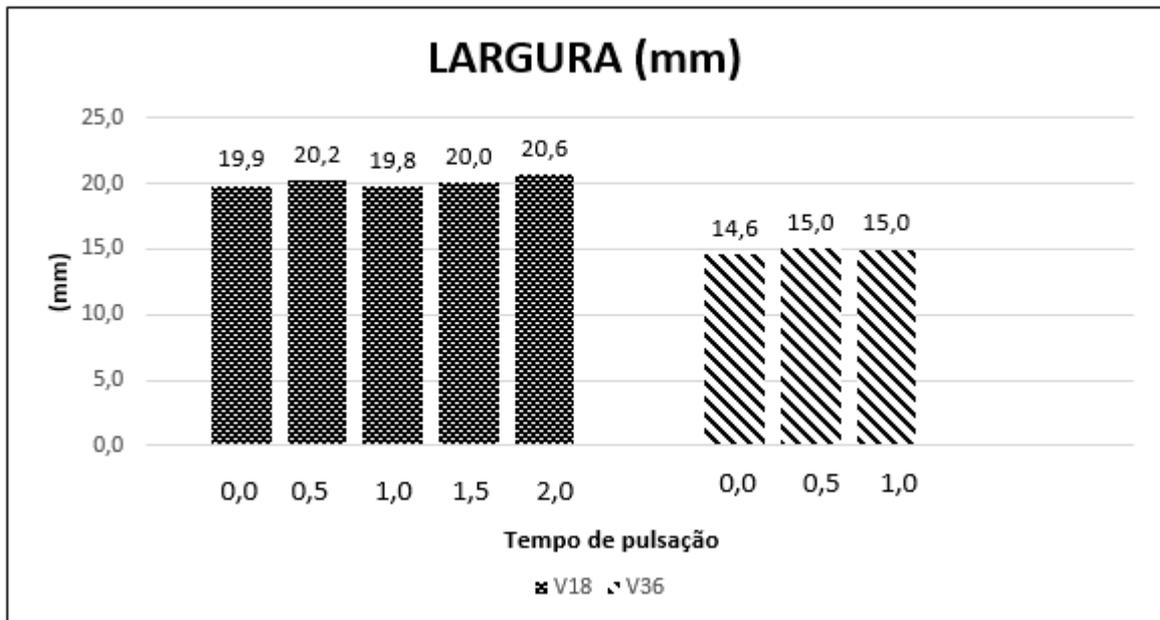
A partir do gráfico acima, nota-se que os ensaios realizados com a velocidade de 18 cm/min (V18), e, portanto, com a maior energia de soldagem, apresentaram os maiores valores de área fundida. Isso se explica novamente, pela maior quantidade de energia imposta à peça na forma de calor.

Percebe-se ainda que, dentro dos grupos com mesma velocidade de soldagem, todas as amostras concebidas com a técnica de pulsação da corrente obtiveram maiores valores de área fundida quando comparadas com as amostras soldadas com corrente constante (V18-0,0 e V36-0,0). Para o grupo soldado com velocidade de 18 cm/min, este aumento corresponde a aproximadamente 23%, comparando-se o processo sem a pulsação da corrente com a amostra pulsada no maior tempo de pulso, 2 segundos. Já para as amostras de menor energia de soldagem (V36), o aumento encontrado foi de 21%. Pode-se dizer então que este aumento na área fundida indica uma maior eficiência do processo obtido com a técnica

de pulsação da corrente em baixas frequências para a soldagem SAW, resultado este, semelhante àqueles obtidos na literatura para os processos TIG e MIG/MAG.

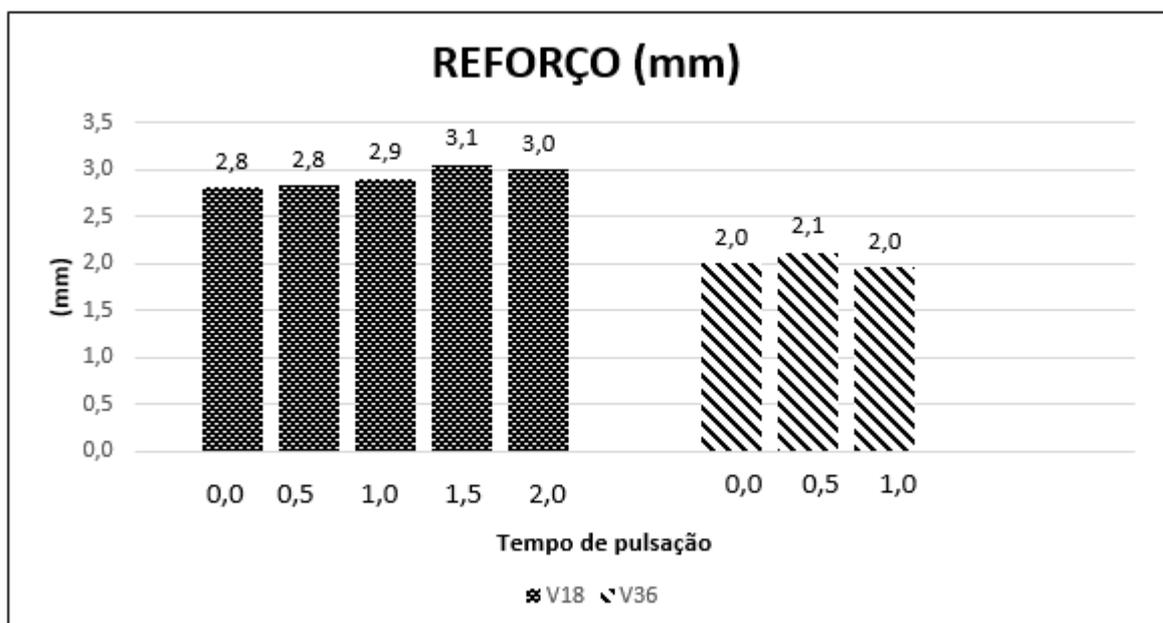
As Figuras 13, 14 e 15 apresentam as medidas obtidas para largura, reforço e penetração dos cordões de solda.

Figura 13 - Medida de largura dos cordões para cada uma das amostras



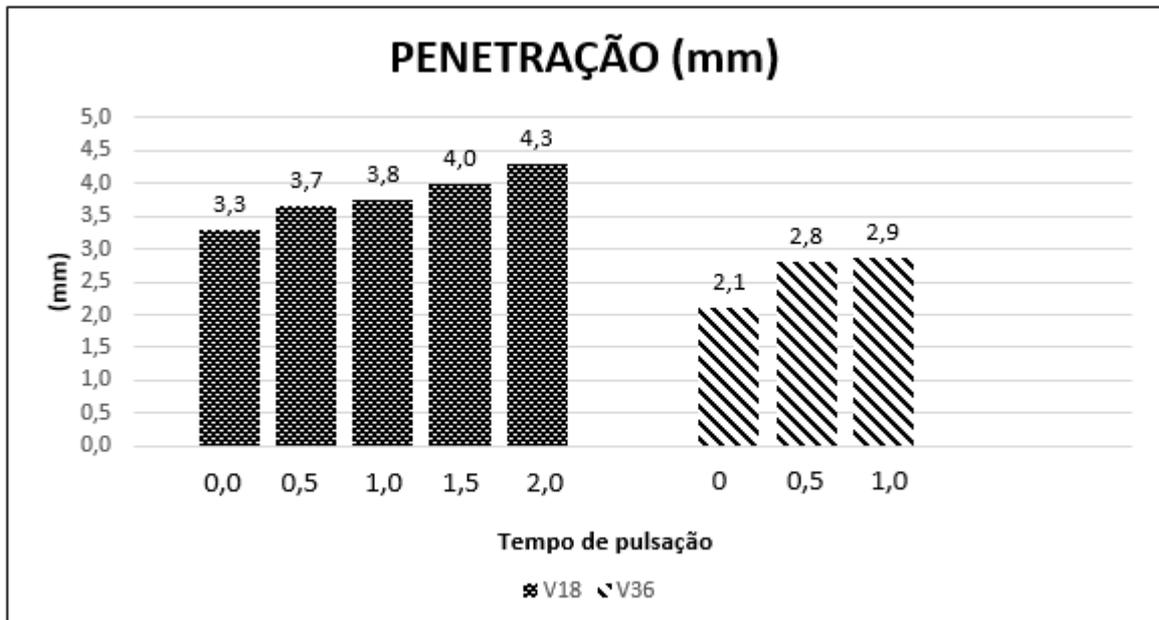
Fonte: Autor (2018)

Figura 14 - Medida de reforço dos cordões para cada uma das amostras



Fonte: Autor (2018)

Figura 15 - Medida de penetração dos cordões para cada uma das amostras



Fonte: Autor (2018)

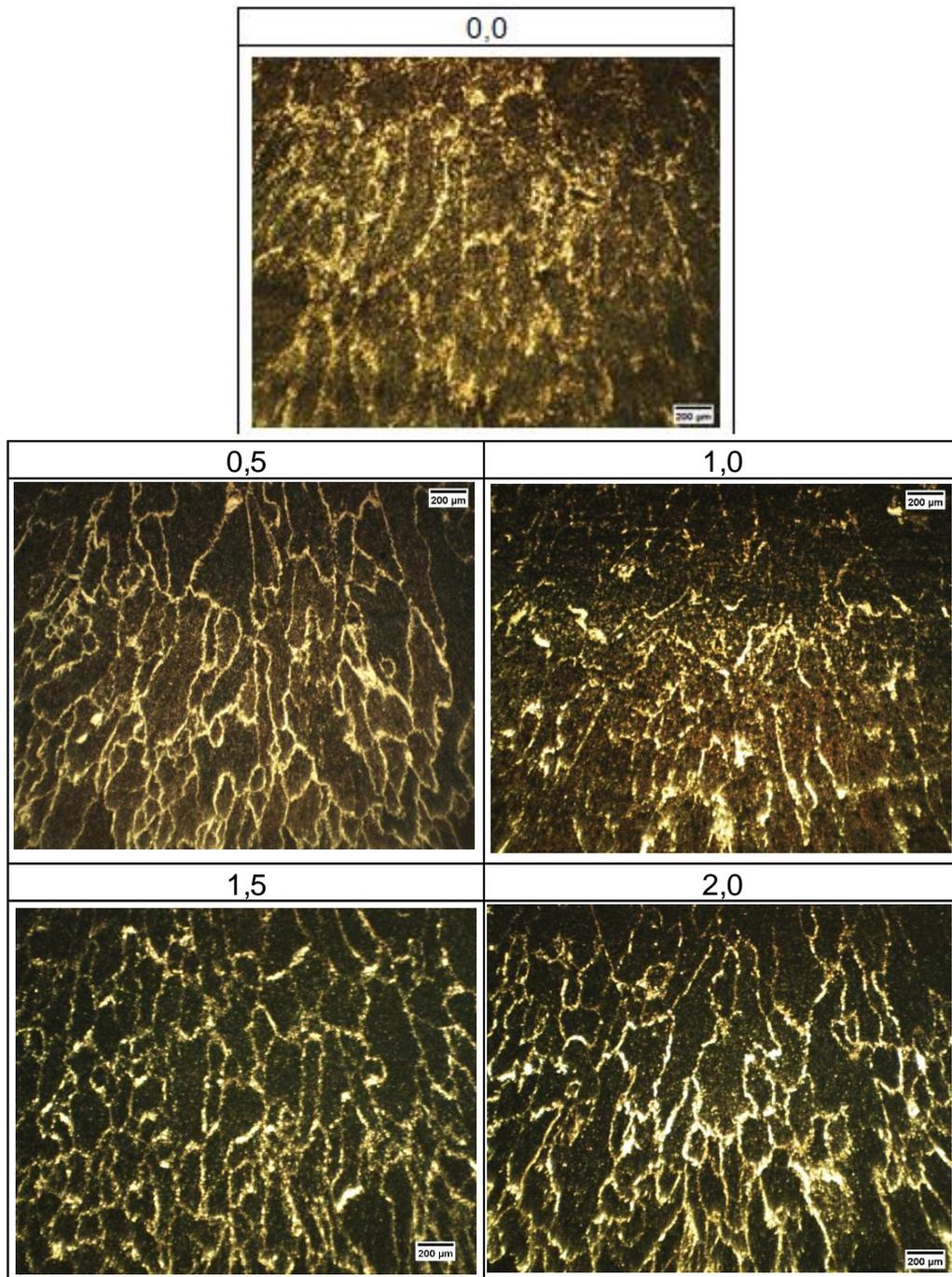
Analisando as dimensões lineares das amostras, percebe-se que praticamente não houve variação nas medidas de largura dos cordões, quando se compara as amostras de mesma energia de soldagem. Um comportamento análogo ocorre com os valores de reforço, que são aproximadamente constantes e iguais ao valor obtido para os cordões sem pulsação. No entanto, para a medida de penetração das soldas, observa-se um aumento significativo nas amostras com pulsação da corrente. Analisando os cordões soldados com velocidade de 18 cm/min, obteve-se um aumento de 30% na penetração, comparando-se a amostra sem pulsação com a amostra pulsada em 2 segundos. Para o grupo soldado com velocidade de 36 cm/min este aumento foi ainda maior, 36%. O resultado obtido é compatível com outros estudos sobre pulsação térmica na literatura, como Santos et al. (1998, apud Santos, 2001, p.99) no processo TIG e Ziberov (2013) com soldagem MIG/MAG. Segundo esses autores, o ganho em penetração é devido a mudança na amplitude da corrente, já que a corrente de pulso está acima da corrente necessária para a espessura do material a ser soldado, mas atuando por um período de tempo suficiente para evitar a perfuração da chapa. Além disso, a alternância da corrente em dois níveis reduz o efeito térmico sobre a peça em consequência de um melhor aproveitamento da energia na fase de pulso para a fusão em profundidade das soldas.

Ao analisar a Figura 15, percebe-se ainda que os valores das medidas de penetração foram crescentes conforme aumento no tempo de pulso. Assim, para ambas energias de soldagem estudadas, as amostras soldadas com menor frequência de pulsação obtiveram as maiores medidas de penetração. Este resultado vai de encontro ao obtido por Traidia et al (2010), que justifica o ganho maior em penetração pelo fato de que a solda realizada em uma frequência mais baixa tem um intervalo de tempo mais longo no nível de corrente alta, o que provoca um aumento da temperatura da poça de fusão e, portanto, nas dimensões do cordão de solda.

Ainda podemos constatar que, ao examinar os valores de penetração em conjunto com os valores de largura e reforço, o ganho obtido em área fundida é devido ao aumento na dimensão de penetração da solda, já que os valores de largura e reforço mantiveram-se praticamente constantes nas amostras.

A seguir são apresentadas as micrografias obtidas da região central da zona fundida das amostras soldadas com maior energia de soldagem (Figura 16).

Figura 16 - Micrografia da região central dos cordões de solda obtidos com velocidade de soldagem de 18 cm/min



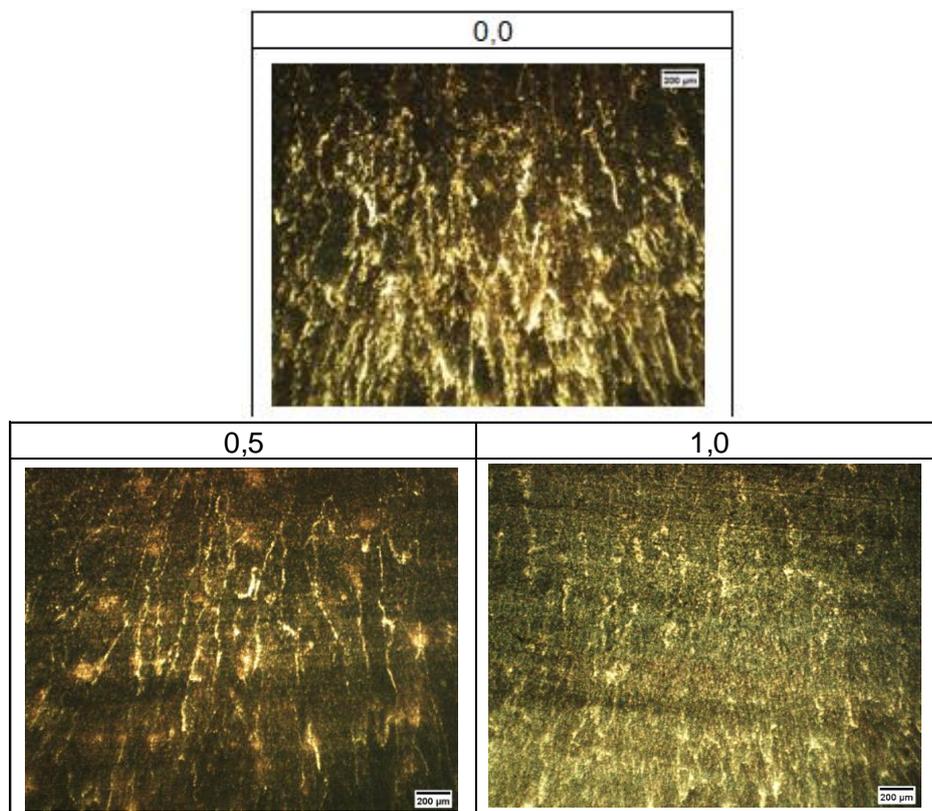
Fonte: Autor (2018)

A partir da figura acima, é possível notar que ao comparar as amostras em que se aplicou a pulsação (0,5, 1,0, 1,5 e 2,0), percebe-se que o comportamento microestrutural no geral não difere muito de uma amostra para outra. No aspecto qualitativo notou-se que os grãos vistos na seção transversal têm forma alongada,

com o eixo maior normalmente orientado em direção praticamente normal à linha de fusão. Contudo, é possível notar o aparecimento de grãos menores nas amostras soldadas com pulsação quando comparadas com a amostra soldada com corrente constante (0,0). No entanto, o grau de refinamento não é tão considerável, visto que ainda se encontra uma grande quantidade de grãos alongados e de tamanho maior nas microestruturas das amostras pulsadas. Da mesma maneira, observou-se nas regiões de topo, raiz e laterais dos cordões o mesmo comportamento da microestrutura, concluindo que não houve grandes alterações em relação à morfologia e dimensão dos grãos com o uso da técnica da pulsação. As demais imagens microestruturais tiradas podem ser encontradas no apêndice A.

A seguir encontram-se as micrografias do centro da zona fundida das amostras soldadas com velocidade de soldagem de 36 cm/min (Figura 17). Da mesma maneira que observado nas amostras de maior energia, os resultados obtidos nestes cordões soldados também não apresentaram mudanças significativas em relação a microestrutura, para nenhuma das regiões analisadas.

Figura 17 - Micrografia da região central dos cordões de solda obtidos com velocidade de soldagem de 36 cm/min

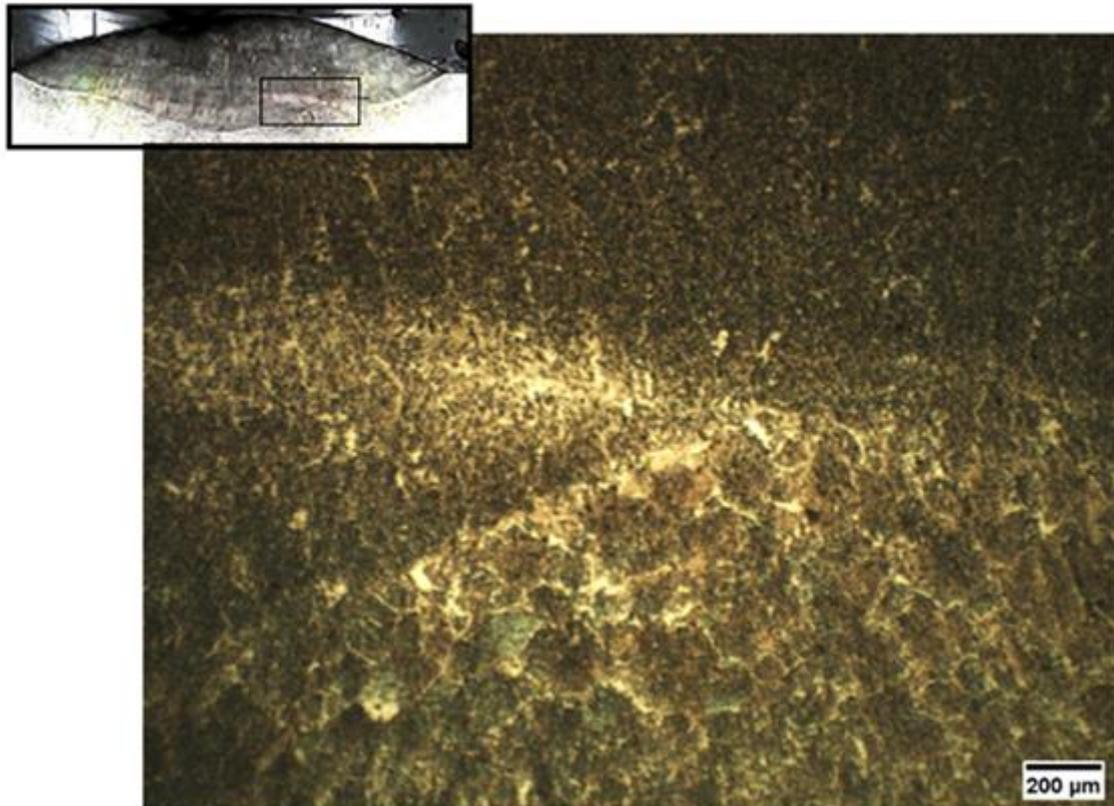


Fonte: Autor (2018)

Diferentemente do que é relatado na literatura, para as condições de soldagem utilizadas, a pulsação térmica não originou uma microestrutura mais refinada para nenhuma das energias de soldagem estudadas. Sabe-se que uma das consequências das flutuações térmicas da pulsação da corrente é a interrupção periódica do processo de solidificação da zona fundida. Segundo Reddy et al (1998), este processo advém da sobreposição dos cordões de solda, fazendo com que o aporte de calor imposto quebre os cristais dos grãos em crescimento do cordão precedente e, portanto, trazendo o refino da microestrutura. No entanto, os relatos encontrados em estudos desse fenômeno, dizem respeito aos processos de soldagem TIG e MIG/MAG. No presente estudo, fazendo uso do processo de soldagem SAW, o mesmo não foi observado, possivelmente por este processo demandar uma maior energia de soldagem, e conseqüentemente, uma entrada de calor maior do que os processos anteriormente citados. Assim, uma explicação plausível seria que, com uma entrada de calor mais elevada, o tempo de base utilizado nos ensaios não foi suficiente para resfriar a poça de fusão a ponto de a mesma solidificar antes do próximo pulso de energia, e assim permitir o mecanismo de refusão responsável por refinar os grãos do material. Deste modo, o efeito térmico na poça fundida tendeu a se aproximar ao que é obtido com corrente contínua constante.

Outro ponto a se destacar nesta discussão, é que não foi possível visualizar o efeito gerado pela imposição dos sucessivos pulsos de energia na grande maioria das micrografias apresentadas. Um indício desse efeito é notado apenas na amostra V36-1,0 (Figura 18), possivelmente pelo fato de esta ter sido soldada com uma velocidade mais rápida (36 cm/min) e um tempo de pulso maior (1,0 s), entre todas as micrografias das amostras estudadas.

Figura 18 - Detalhe do efeito da técnica de pulsação na amostra V36-1,0



Fonte: Autor (2018)

Ao analisar a Figura 18, percebe-se que possivelmente esta linha aparente é devido aos pulsos de energia impostos na peça, como parte do mecanismo de refusão do material soldado. Como nessas amostras a sobreposição dos pulsos foi mais espaçada, foi possível o surgimento desse efeito da pulsação. No entanto, percebe-se que, apesar de aparente, a linha de pulsação não foi capaz de mudar a orientação dos grãos da microestrutura.

## 5 CONCLUSÕES

Tendo em vista os materiais utilizados, as técnicas aplicadas e os resultados obtidos, é possível concluir que:

- A bancada concebida para realização de ensaios de soldagem com o processo Arco Submerso atendeu as necessidades do trabalho.
- É perfeitamente viável utilizar a técnica de pulsação da corrente em baixas frequências no arco submerso.
- Nas condições experimentais empregadas, a técnica da pulsação da corrente não acarretou em instabilidades no processo, tampouco, em problemas relacionados à inclusão e retenção de escória.
- Nas condições estudadas, verificou-se que para a velocidade de 36 cm/min o tempo de pulso e base limite é de 1 segundo.
- Do ponto de vista operacional, obteve-se uma maior eficiência do processo, com o aumento na área fundida em cerca de 23%, para a amostra soldada com velocidade de 18 cm/min e tempo de pulso e base de 2 s, e aumento de 21%, para a soldagem realizada com 36 cm/min e 1 s de tempo de pulso. Estes resultados foram devidos principalmente ao ganho em penetração da solda.
- A pulsação térmica não apresentou melhorias metalúrgicas significativas para nenhuma das condições de soldagem estudadas.

## 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com a realização deste trabalho e os resultados obtidos, sugere-se:

- Avaliar os efeitos da técnica de pulsação térmica para outras amplitudes de corrente.
- Analisar os efeitos da variação dos tempos de pulso e base durante a aplicação da pulsação da corrente.
- Investigar os efeitos obtidos com aplicação da técnica da pulsação térmica em relação as propriedades mecânicas do metal de solda.

## REFERÊNCIAS

- AMERICAN WELDING SOCIETY. **AWS A5.17**: Specification for carbon steel electrodes and fluxes for submerged arc welding. Miami, Florida, set. 1997.
- AMERICAN WELDING SOCIETY. **AWS A5.23**: Specification for low-alloy steel electrodes and fluxes for submerged arc welding. Miami, Florida. 1997.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM A36**: Standard Specification for Carbon Structural Steel. United States of América, 2010.
- BALASUBRAMANIAN, V.; RAVISANKAR, V.; REDDY, G. M. Influences of pulsed current welding and post weld aging treatment on fatigue crack growth behaviour of AA7075 aluminium alloy joints. **International Journal of Fatigue**, v. 30, n. 3, p. 405-416, 2008.
- BARRA, S. R. et al. Aspectos metalúrgicos do processo mig com pulsação térmica: efeito da frequência e do ciclo de trabalho. In: **XXVIII CONSOLDA**, São Paulo, Novembro. 2002.
- BARRA, S. R. et al. **Influência do processo mig/mag térmico sobre a microestrutura e a geometria da zona fundida**. 2003.
- BECKER, D. W.; ADAMS, C. M. The role of pulsed gta welding variables in solidification and grain refinement. **Weld. J**, v. 58, n. 5, 1979.
- CUNHA, T. V. **Desenvolvimento e avaliação de tecnologia para soldagem tig com pulsação ultrassônica**. 266 p. Dissertação (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2013.
- CUNHA, T. V. Proposal of roadmap for determining the variables of pulsed TIG welding process applied to welding of thin plates. **Soldagem & Inspeção**, v. 18, n. 1, p. 64-71, 2013.
- DELGADO, L.C. **Estudo e desenvolvimento do processo tig com alimentação automática de arame**, Dissertação de Mestrado, UFSC, Florianópolis, 2000.
- FARAHANI, E.; SHAMANIAN, M.; ASHRAFIZADEH, F. A comparative study on direct and pulsed current gas tungsten arc welding of alloy 617. **International Journal on Manufacturing and Material Science**, v. 2, n. 1, p. 1, 2012.
- FIGUEIRÔA, D. W. et al. Influência da posição e dos parâmetros de soldagem na soldagem TIG orbital aplicada a tubulações de aço baixo carbono. **Soldagem & Inspeção**, v. 20, n. 4, p. 446-455, 2015.
- GHOSH, P. K.; GUPTA, P. C.; GOYAL, V. K. Stainless steel cladding of structural steel plate using the pulsed current gmaw process. **Welding journal**, v. 77, n. 7, p. 307s-314s, 1998.

GONZALEZ, A. R.; CASSINA, J. C.; MACHADO, I. G. TIG convencional e pulsado: efeito da corrente e velocidade de soldagem sobre a geometria do cordão de solda em aço AISI 304. In: **Contagem-MG: XX ENTS**, 1994.

HYUNDAI. **S-717xM-12K**. 2018. Disponível em: <<http://www.hyundaiwelding.com/download/Product/Consumables/Catalog/S-717xM-12K.pdf>>. Acesso em: 03 set. 2018.

JANAKI RAM, G. D. et al. Control of laves phase in inconel 718 gta welds with current pulsing. **Science and technology of welding and joining**, v. 9, n. 5, p. 390-398, 2004.

JINDAL, S.; CHHIBBER, R.; MEHTA, N. P. Investigation on flux design for submerged arc welding of high-strength low-alloy steel. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, v. 227, n. 3, p. 383-395, 2013.

KUMAR, T. S.; BALASUBRAMANIAN, V.; SANAVULLAH, M. Y. Influences of pulsed current tungsten inert gas welding parameters on the tensile properties of AA 6061 aluminium alloy. **Materials & design**, v. 28, n. 7, p. 2080-2092, 2007.

MACHADO, I. G. **Soldagem & técnicas conexas: processos**. Porto Alegre: Ed. do Autor; 1996.

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J. Algumas equações úteis em soldagem. **Soldagem e Inspeção**, Brasil, v. 19, n. 1, p. 91-102, 2014.

MODENESI, P. J. et al. **Introdução à metalurgia da soldagem**. Departamento de Engenharia Metalúrgica, UFMG, Belo Horizonte, 2006.

MODENESI, P. J. **Introdução à física do arco elétrico soldagem I**, Universidade Federal de Minas Gerais Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Belo Horizonte, 2012.

OKUMURA, T.; TANIGUCHI, C. **Engenharia de soldagem e aplicações**. LTC, Rio de Janeiro, 1982.

PANIAGUA-MERCADO, A. M. et al. Effect of TiO<sub>2</sub>-containing fluxes on the mechanical properties and microstructure in submerged-arc weld steels. **Materials Characterization**, v. 60, n. 1, p. 36-39, 2009.

PARANHOS, R.; SOUZA, A. C. Soldagem a arco submerso, **Coleção Soldagem 2000**, 77 pp, volume 2, FIRJAN/SENAI, Rio de Janeiro, 1999.

RAMAKRISHNAN, M.; MUTHUPANDI, V. Application of submerged arc welding technology with cold wire addition for drum shell long seam butt welds of pressure vessel components. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 65, n. 5-8, p. 945-956, 2013.

RAO, SR K. et al. Grain refinement through arc manipulation techniques in Al-Cu alloy GTA welds. **Materials Science and Engineering: A**, v. 404, n. 1-2, p. 227-234, 2005.

REDDY, G. M.; GOKHALE, A. A.; RAO, K. P., Optimisation of pulse frequency in pulsed current gas tungsten arc welding of aluminium–lithium alloy sheets. **Materials Science and Technology**, v. 14, n. 1, p. 61-66, 1998.

SANTOS, L. A. et al. **Condução de calor na soldagem com pulsação térmica**. 2001.

SHINODA, T.; UENO, Y.; MASUMOTO, I. Effect of pulsed welding current on solidification cracking in austenitic stainless steel welds. **Transactions of the Japan Welding Society**, v. 21, n. 1, p. 18-23, 1990.

SILVA, L. M. C.; SCOTTI, A. Avaliação do efeito dos períodos de pulsação térmica sobre a formação do cordão na soldagem de alumínio pelo processo MIG-PT. In: **1º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação**. Curitiba, Paraná, Brasil. 2001.

SUNDARESAN, S.; RAM, GD J.; REDDY, G. M., Microstructural refinement of weld fusion zones in  $\alpha$ - $\beta$  titanium alloys using pulsed current welding. **Materials Science and Engineering: A**, v. 262, n. 1-2, p. 88-100, 1999.

TOSCANO, L. G. S., **Efeito da diluição da chapa base na soldagem com adição de pó de ferro utilizando fluxo experimental**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, 1997.

TRAIIDIA, A.; ROGER, F.; GUYOT, E. Optimal parameters for pulsed gas tungsten arc welding in partially and fully penetrated weld pools. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 49, n. 7, p. 1197-1208, 2010.

TSUYAMA, T.; NAKAI, K.; TSUJI, T. Development of submerged arc welding method using hot wire. **Welding in the World**, v. 58, n. 5, p. 713-718, 2014.

VILLAFUERTE, J. C.; KERR, H. W. Electromagnetic stirring and grain-refinement in stainless-steel GTA welds. **Welding journal**, v. 69, n. 1, p. S1-S13, 1990.

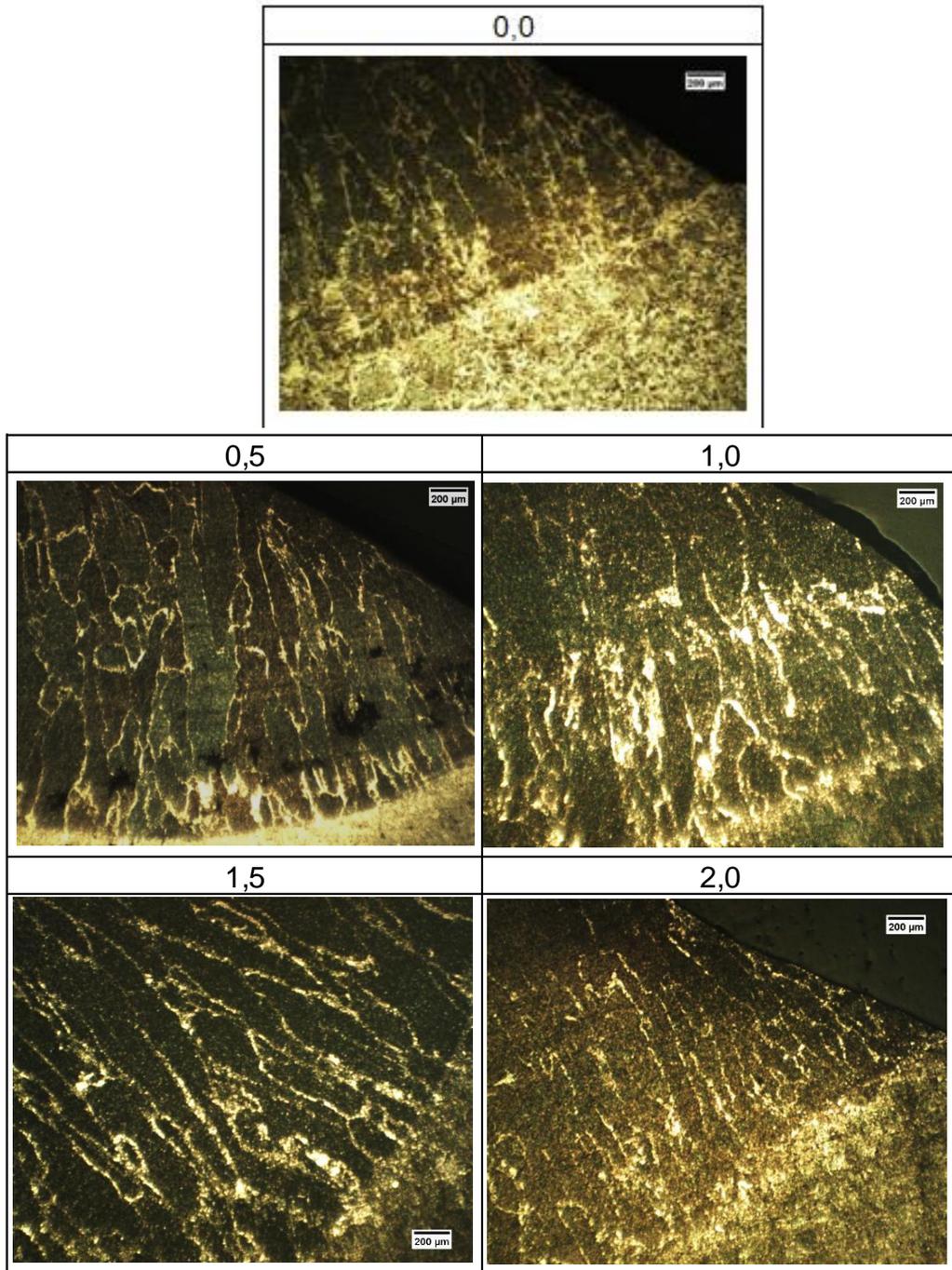
WAINER, E.; BRANDI, S. D.; MELLO, F. D. H. **Soldagem: processos e metalurgia**. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 1992.

WU, C. S.; ZHENG, W.; WU, L. Modelling the transient behaviour of pulsed current tungsten-inert-gas weldpools. **Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering**, v. 7, n. 1, p. 15, 1999.

ZIBEROV, M. et al. **Avaliação da pulsação térmica para controle da poça de fusão em soldagem de raiz com MIG/MAG automatizado**. 2013.

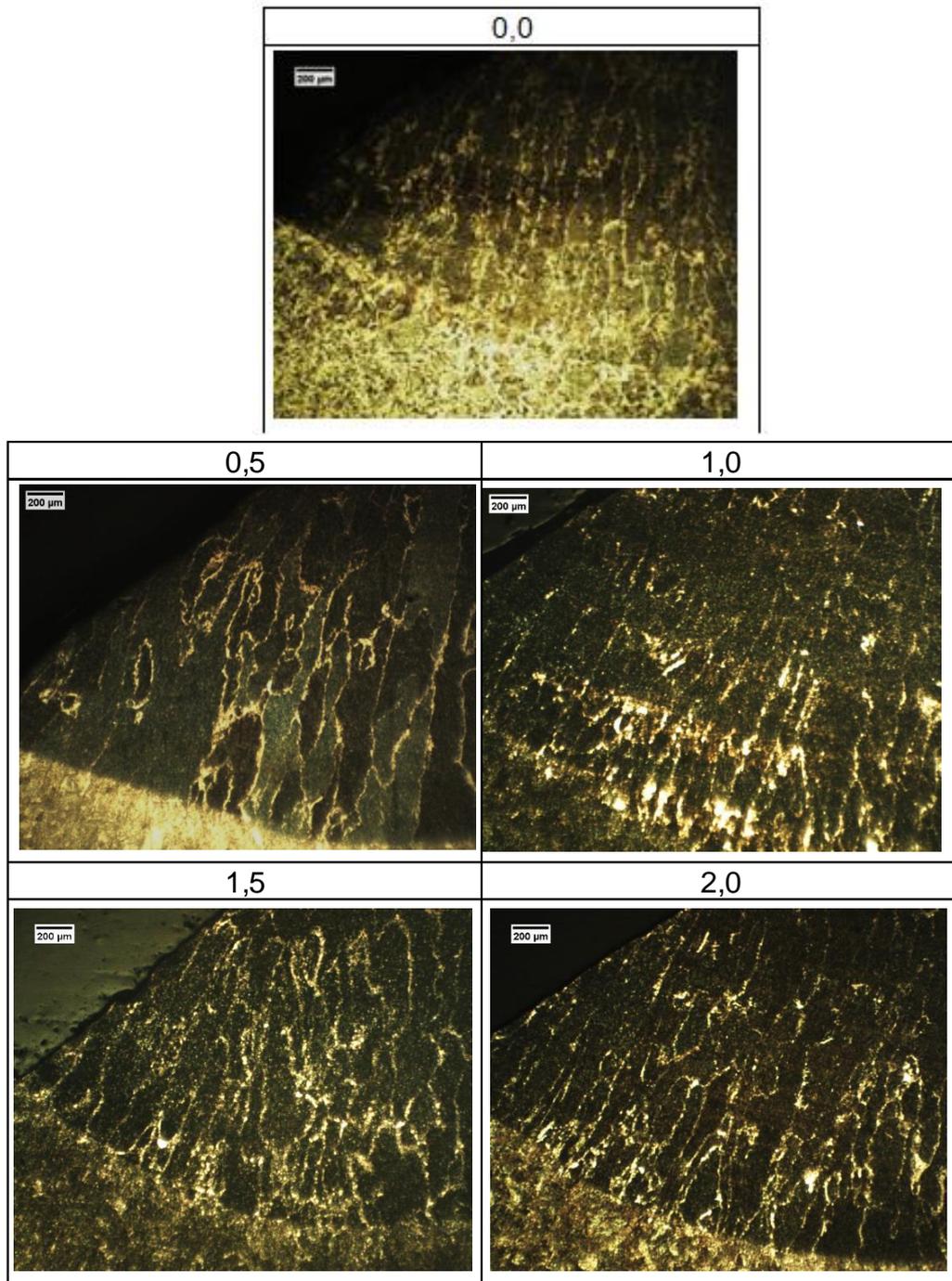
## APÊNDICE A – Micrografias obtidas das amostras

Micrografia da região direita dos cordões de solda obtidos com velocidade de soldagem de 18 cm/min



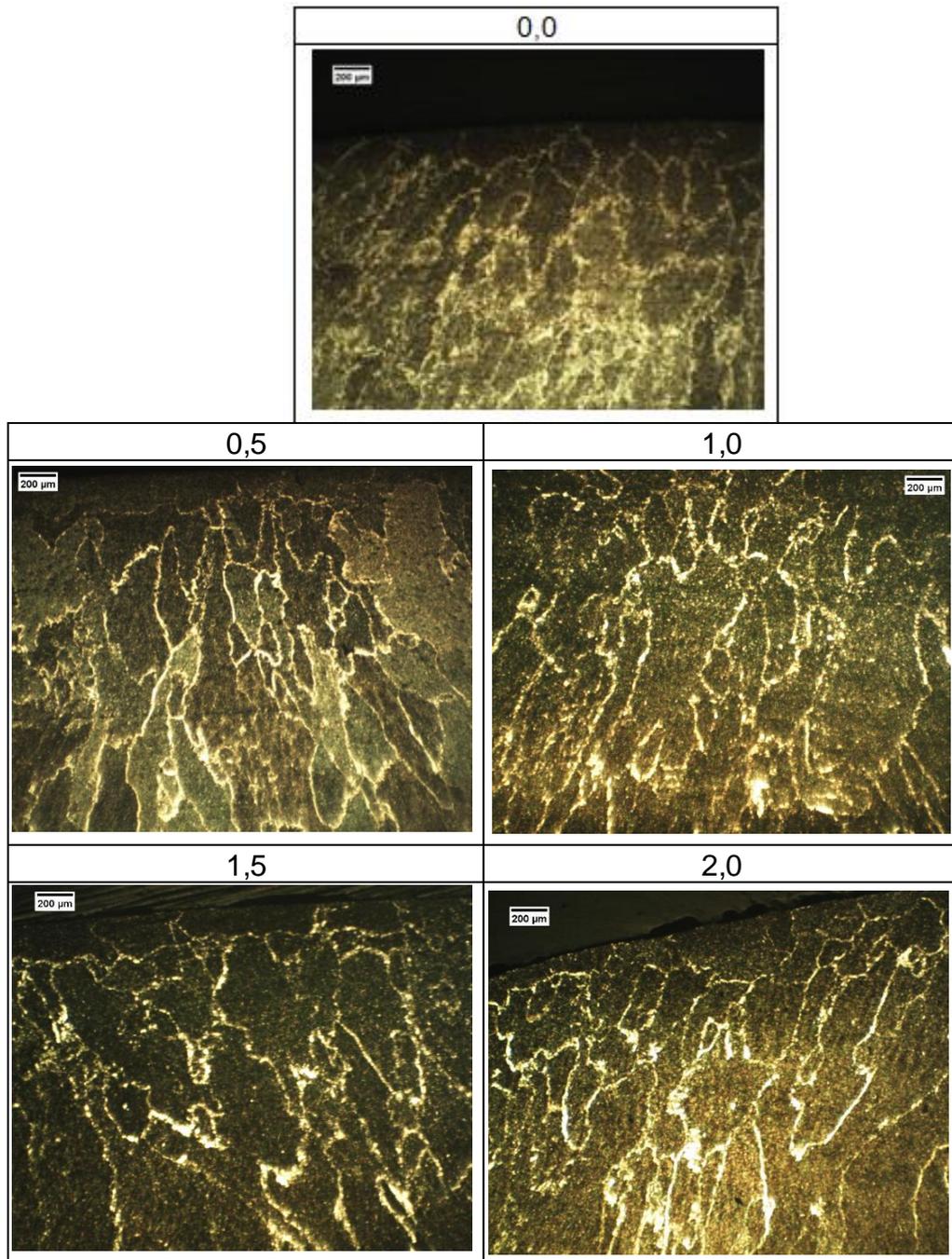
Fonte: Autor (2018)

Micrografia da região esquerda dos cordões de solda obtidos com velocidade de soldagem de 18 cm/min



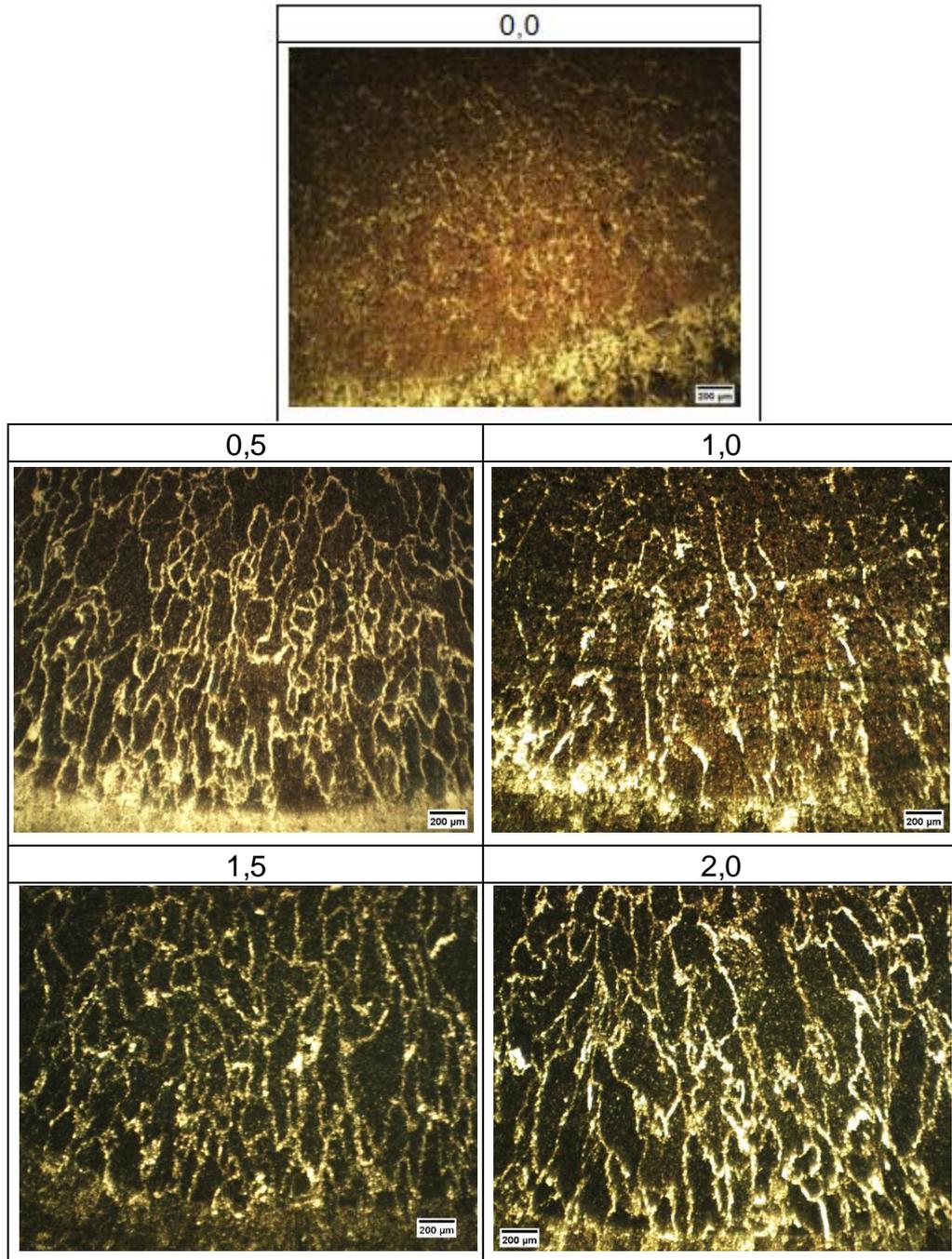
Fonte: Autor (2018)

Micrografia da região do topo dos cordões de solda obtidos com velocidade de soldagem de 18 cm/min



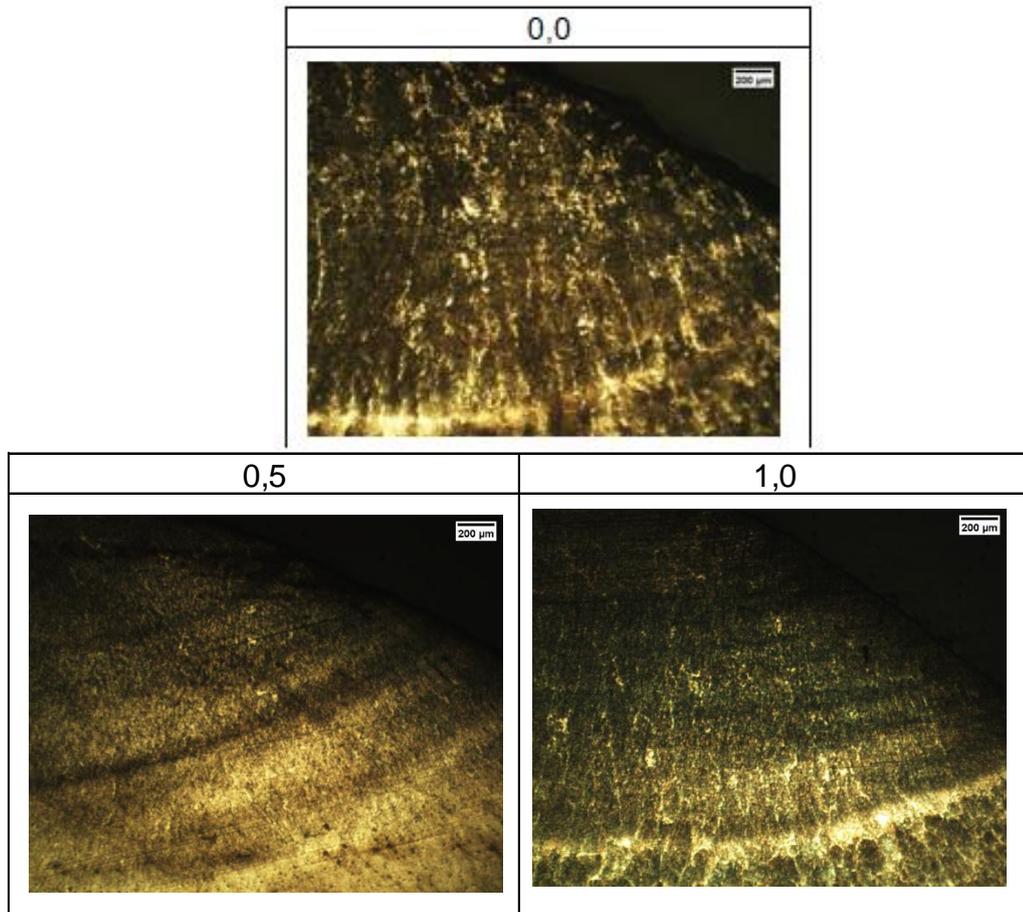
Fonte: Autor (2018)

Micrografia da região da raiz dos cordões de solda obtidos com velocidade de soldagem de 18 cm/min



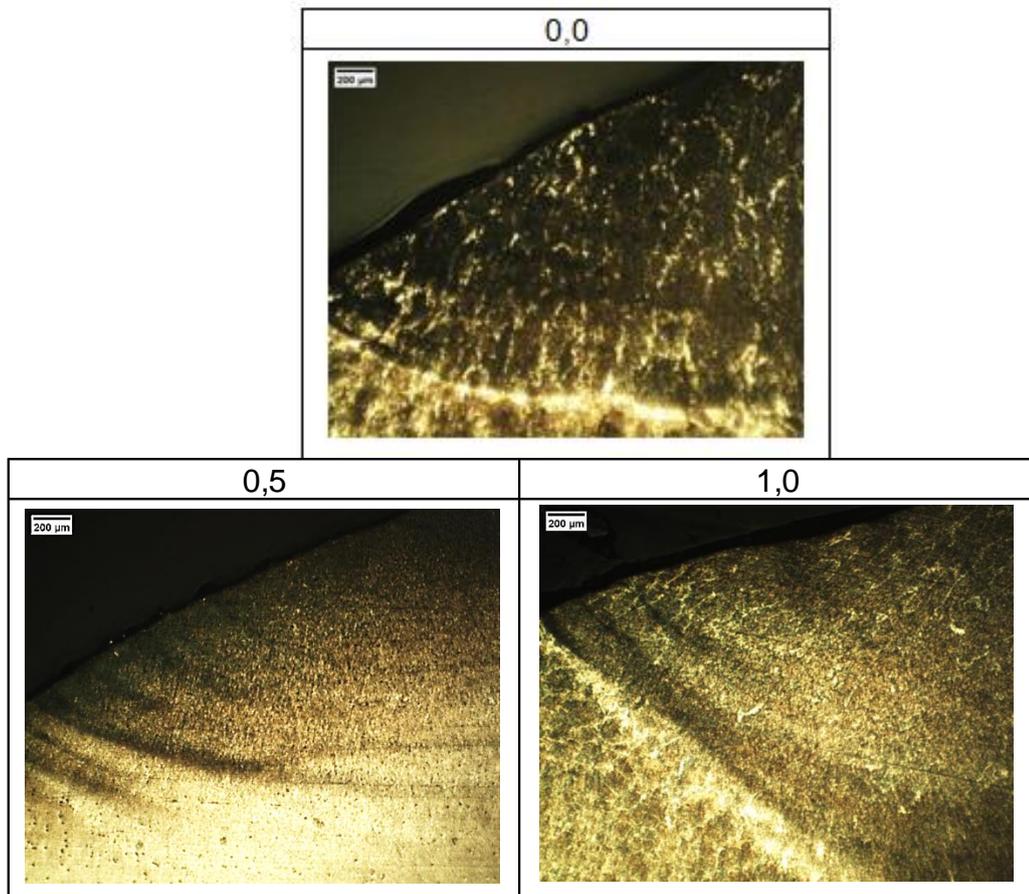
Fonte: Autor (2018)

Micrografia da região direita dos cordões de solda obtidos com velocidade de soldagem de 36 cm/min



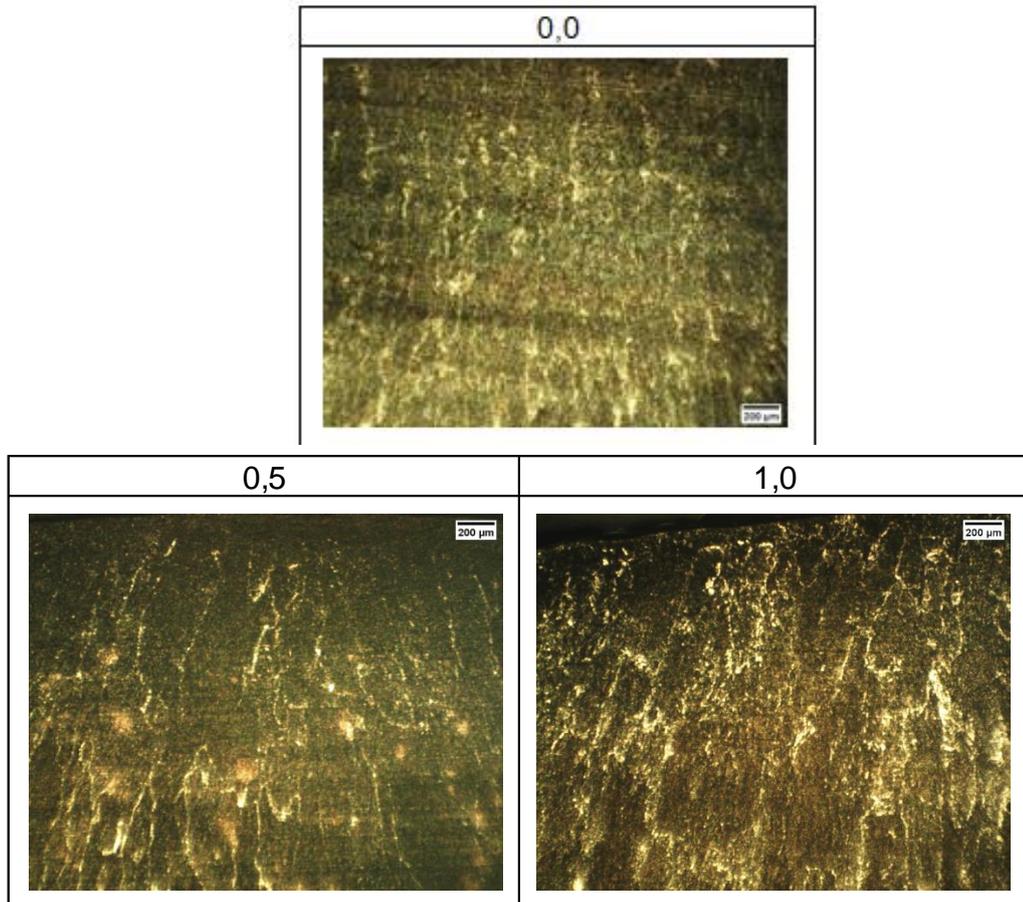
Fonte: Autor (2018)

Micrografia da região esquerda dos cordões de solda obtidos com velocidade de soldagem de 36 cm/min



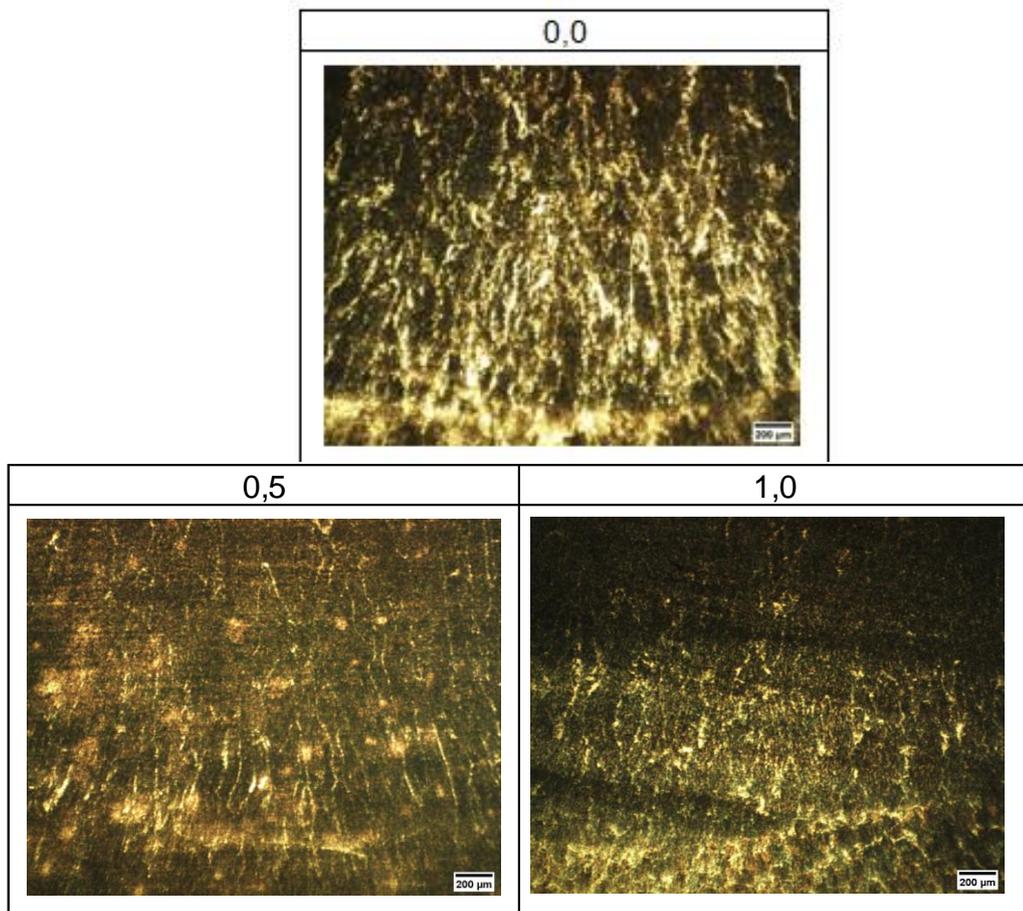
Fonte: Autor (2018)

Micrografia da região do topo dos cordões de solda obtidos com velocidade de soldagem de 36 cm/min



Fonte: Autor (2018)

Micrografia da região da raiz dos cordões de solda obtidos com velocidade de soldagem de 36 cm/min



Fonte: Autor (2018)