

**Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba**

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO ESTADO  
QUASE-ESTACIONÁRIO NAS  
CARACTERÍSTICAS DE CORDÕES  
INTERMITENTES**

**Glauber Augusto Matheus Gomes Ontiveros**

**Pindamonhangaba - SP  
2018**

**Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba**

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO ESTADO  
QUASE-ESTACIONÁRIO NAS  
CARACTERÍSTICAS DE CORDÕES  
INTERMITENTES**

**Glauber Augusto Matheus Gomes Ontiveros**

Monografia apresentada à Faculdade de  
Tecnologia de Pindamonhangaba para  
graduação, no Curso Superior de Tecnologia em  
Mecânica – Processos em Soldagem.

Área de Concentração: Metalurgia da Soldagem

Orientadora: Maria Cristina Carrupt Ferreira Borges  
Co-orientadora: Gisélia Alves de Souza

**Pindamonhangaba – SP  
2018**

**Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba**

**AVALIAÇÃO DA INFLUENCIA DO ESTADO  
QUASE ESTACIONÁRIO NAS  
CARACTERÍSTICAS DE CORDÕES  
INTERMITENTES**

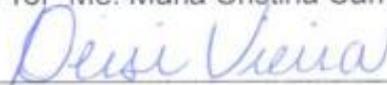
**Glauber Augusto Matheus Gomes Ontiveros**

Monografia apresentada à Faculdade de  
Tecnologia de Pindamonhangaba para  
graduação, no Curso Superior de  
Tecnologia em Mecânica: Processos de  
Soldagem.

Comissão Examinadora



Orientadora – Prof<sup>ª</sup> Me. Maria Cristina Carrupt Ferreira Borges



Membro – Prof<sup>ª</sup>. Me. Deisi Vieira



Membro - Eng. Marcelo Augusto de Campos

**Pindamonhangaba, 14 de dezembro de 2018.**

On89a      Ontiveros, Glauber Augusto Matheus Gomes.  
Avaliação da influência do estado quase-estacionário nas  
características de cordões intermitentes / Glauber Augusto Matheus  
Gomes Ontiveros / FATEC Pindamonhangaba, 2018.  
48f.; il.

Orientadora: Professora Maria Cristina Carrupt Ferreira Borges  
Co-orientadora: Professora Msc. Gisélia Alves de Souza  
Monografia (Graduação) – FATEC – Faculdade de Tecnologia  
de Pindamonhangaba. 2018

1. Estado quase-estacionário. 2. AISI 304. 3.  
Macroestrutura 4. Cordões intermitentes. I. Ontiveros, Glauber  
Augusto Matheus Gomes. II. Borges, Maria Cristina Carrupt Ferreira. III.  
Souza, Gisélia Alves de. IV. Título.

CDD 671

*Dedico aos professores, amigos e familiares, de modo especial, à minha mãe.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, pelo dom da vida.

Agradeço a minha família, a base de tudo.

Agradeço aos amigos, pelo o apoio e carinho.

Agradeço a minha namorada, pela cumplicidade e companheirismo.

Agradeço a Professora Maria Cristina, por todo conhecimento transmitido e por toda orientação na elaboração deste trabalho.

Agradeço aos Técnicos da Faculdade, Danilo, Edilon e Flávio, por todo suporte na parte pratica do trabalho.

Agradeço aos monitores dos laboratórios de Metalografia, Química e Soldagem, por toda ajuda na preparação dos ensaios.

“O sucesso nasce do querer, da determinação e persistência em se chegar a um objetivo. Mesmo não atingindo o alvo, quem busca e vence obstáculos, no mínimo fará coisas admiráveis.”

*José de Alencar*

ONTIVEROS, G. A. M. G.; **Avaliação da influência do estado quase-estacionário nas características de cordões intermitentes**. Trabalho de graduação. Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba. Pindamonhangaba. 2018.

## RESUMO

Na soldagem a arco-elétrico, muitas vezes não é possível realizar um cordão do início ao fim, com uma única abertura do arco, devido alguns empecilhos encontrados nos processos e procedimentos. Um exemplo é o processo Shielded Metal Arc Welding (SMAW), popularmente chamado de eletrodo revestido, que se limita a um certo comprimento de cordão devido ao pequeno tamanho do consumível. Então, em casos de soldas de grande comprimento, é necessário a realização de cordões intermitentes, onde o início de um cordão se sobrepõem ao final do cordão anterior. Quando o arco elétrico é aberto, leva um tempo para que o fluxo de calor através do metal base se estabilize. Quando essa estabilidade é alcançada, dizemos que o material atingiu o estado quase-estacionário de condução de calor. O estado quase-estacionário é caracterizado por uma distribuição uniforme de temperatura, no metal de base, para um observador posicionado sobre a fonte móvel de calor. Antes desse estado ser atingido, a distribuição não uniforme de temperatura influencia nas propriedades físicas do material, alternando a transferência de calor, a geometria da poça de fusão e por consequência a morfologia do cordão e a transformação de fase na Zona Termicamente afetada (ZTA). Este trabalho tem como objetivo verificar se a condição de estado quase-estacionário tem influência sobre o perfil de solda, em cordões intermitentes. O material utilizado foi o aço inoxidável austenítico AISI 304. A distância percorrida até o estado quase-estacionário ser atingido, foi calculada e marcada sobre as chapas. Foram depositados dois cordões intermitentes com procedimentos diferentes. De cada cordão, foram retiradas três amostras para verificar o perfil antes e após o estado quase-estacionário ser atingido. Para avaliar os cordões, foi feita análise metalográfica e perfil de microdureza. Os resultados mostraram pequenas variações nas características geométricas dos cordões, em diferentes situações analisadas.

**Palavras-chaves:** Estado quase-estacionário. AISI 304. Cordões intermitentes. Macroestrutura.

ONTIVEROS, G. A. M. G.; **Evaluation of the influence of the quasi-stationary state on the characteristics of intermittent cords.** Graduation work. Faculty of Technology of Pindamonhangaba. Pindamonhangaba. 2018.

### **ABSTRACT**

In arc-electric welding, it is often not possible to make a bead from start to finish, with a single arc opening, due to some bumps encountered in processes and procedures. An example is the Shielded Metal Arc Welding process (SMAW), popularly called a coated electrode, which is limited to a certain length of cord due to the small size of the consumable. Then, in cases of welds of great length, it is necessary to make intermittent cords, where the beginning of a cord overlaps the end of the previous cord. When the electric arc is opened, it takes a while for the heat flow through the base metal to stabilize. When this stability is achieved, we say that the material has reached the Quasi-stationary state of conduction of heat. The Quasi-stationary state is characterized by a uniform temperature distribution in the base metal for an observer positioned on the mobile heat source. Before this state is reached, the non-uniform temperature distribution influences the thermo-physical properties of the material, alternating the heat transfer, the melt pool geometry and consequently the bead morphology and the phase transformation in the Thermally Affected Zone ). This work aims to verify if the condition of quasi-stationary state has influence on the weld profile, in intermittent cords. The material used was the AISI 304 austenitic stainless steel. The distance traveled until the quasi-stationary state was reached was calculated and marked on the plates. Two intermittent cords were deposited with different procedures. From each strand, three samples were taken to verify the profile before and after the Quasi-stationary state was reached. To evaluate the cords, a metallographic analysis and microhardness profile were performed. The results showed small variations in the geometric characteristics of the cords, in different analyzed situations.

**Keywords:** Quasi-stationary state. Stainless steel. Intermittent strands. Macrographic.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sistema de soldagem a arco com eletrodo de carvão.....	17
Figura 2 - Soldagem por SMAW .....	18
Figura 3 - Equipamento para soldagem SMAW .....	19
Figura 4 - Curva tensão (V) x corrente (i) típica de uma fonte para soldagem SMAW .....	20
Figura 5- Efeito de alterações nos parâmetros de soldagem na geometria de cordões de solda depositados com uma energia de soldagem de aproximadamente 1,8 kJ/mm (esquemático). Condições de soldagem: (a) 800A, 26V e 12mm/s e (b) 125A, 26V e 1,7mm/s. ....	23
Figura 6 - Estado quase-estacionário .....	23
Figura 7 - Amostra de ensaio macrográfico.....	27
Figura 8 - Ensaio de Micrografia .....	27
Figura 9 - Representação esquemática da pirâmide e da imagem da impressão deixada no material testado; "d" é a diagonal da impressão. ....	28
Figura 10 - Chapa de aço inoxidável AISI 304 .....	30
Figura 11 - Diagrama de Schaeffler.....	32
Figura 12 - Pré-aquecimento das barras.....	34
Figura 13 - Acompanhamento da temperatura de pré-aquecimento.....	35
Figura 14 - Situação A: soldagem da primeira chapa (cordões 1 e 2). ....	35
Figura 15 - Situação B: soldagem da segunda chapa. (a) representação do cordão 3 e da região esmerilhada; (b) representação do cordão 4. ....	36
Figura 16 - Chapas cortadas.....	39
Figura 17 - Corpos de Provas de cada parte soldada da chapa.....	40
Figura 18 - Estereoscópio.....	40
Figura 19 - Macrografias das situações de início (A e B) .....	41
Figura 20 - Macrografia das situações intermitentes (A e B) .....	43

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Intensidade da fonte de calor para diferentes processos de soldagem.....	21
Tabela 2 - Rendimento Térmico para alguns processos de soldagem.....	22
Tabela 3 - Composição Química do aço inoxidável AISI 304.....	30
Tabela 4 - Composição Química do Eletrodo AWS E308L – 16.....	31
Tabela 5 - Parâmetros de soldagem .....	34
Tabela 6 - Propriedades Físicas do Aço Inoxidável AISI 304.....	37
Tabela 7 - velocidade de soldagem de cada cordão .....	38
Tabela 8 - Tempo para início do Estado Quase-estacionário.....	38
Tabela 9 - Região calculada para início do estado quase-estacionário .....	39
Tabela 10 - Dados do cdp1 e cdp3.....	42
Tabela 11 - Dados do cdp1 e cdp3.....	44

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

SMAW – Shielded Metal Arc Welding

AWS – American Welding Society

ASTM – American Society for Testing and Materials

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

IIW – International Institute of Welding

ZAC – Zona Afetada pelo Calor

ZTA – Zona Termicamente Afetada

CC – Corrente Continua

CA – Corrente Alternada

I – Corrente

J – Joule

m – metro

cm – Centímetro

mm – milímetro

µm – micrometro

V – Volts

Fe – Ferro

C – Carbono

Cr – Cromo

Ni – Níquel

eq – equivalente

HV – Dureza Vickers

W – Watts

Kgf - Quilograma-força

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	14
2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA.....	16
2.1 SOLDAGEM .....	16
2.1.1 Histórico da soldagem.....	16
2.1.2 Processo de soldagem (SMAW) .....	18
2.2 TRANSFERÊNCIA DE CALOR NA SOLDAGEM .....	20
2.2.1 Estado quase-estacionário.....	23
2.3 AÇOS INOXIDÁVEIS .....	24
2.3.1 Aço inoxidável austenítico.....	25
2.4 ENSAIOS METALOGRAFICOS E DE DUREZA .....	26
2.4.1 Macrografia.....	27
2.4.2 Micrografia .....	27
2.4.3 Ensaio de Microdureza Vickers.....	28
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	30
3.1 MATERIAIS.....	30
3.2 DETERMINAÇÃO DO CONSUMIVEL E PARÂMETROS.....	31
3.2.1 Diagrama de Schaeffler .....	31
3.3 PROCEDIMENTOS DE SOLDAGEM .....	32
3.3.1 Cálculo da temperatura de pré-aquecimento .....	32
3.3.2 Parâmetros de soldagem .....	34
3.3.3 Soldagem dos corpos de prova.....	34
3.4 DETERMINAÇÃO DO ESTADO QUASE-ESTACIONÁRIO.....	37
3.5 CORTE DAS CHAPAS E CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA.....	39
3.6 ENSAIO DE MACROGRAFIA.....	40
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	41
5 CONCLUSÃO .....	46
REFERÊNCIAS .....	47

## 1 INTRODUÇÃO

A soldagem envolve muitos fenômenos metalúrgicos como, por exemplo, fusão, solidificação, transformações no estado sólido, deformações causadas pelo calor e tensões de contração, que podem causar muitos problemas práticos. Os problemas podem ser evitados ou resolvidos aplicando-se princípios metalúrgicos apropriados ao processo de soldagem.

É comum em certos casos na área da soldagem o uso de chapas de sacrifício no começo e no fim do metal de base afim de eliminar a região transiente que é o início e o final da solda, e são as partes mais prejudiciais de um cordão de solda, pois pela alta taxa de corrente no momento em que se abre o arco elétrico pode haver a formação de descontinuidades, prejudiciais à junta soldada e, com isso, o resultado esperado para o projeto pode não ser atendido. Da mesma forma, com a extinção do arco, também pode haver a formação de descontinuidades. Com base nisso, usam-se chapas no início e no final da solda para que não se abra e nem se extingue o arco na solda e sim em chapas que serão descartadas ao final do processo de soldagem (CARVALHO, 2014).

Para isso existe um cálculo para determinar a distância em que a o material base entrará no regime quase-estacionário, onde já se tem uma distribuição uniforme de temperatura, prevenindo descontinuidades efetuando uma solda de boa qualidade.

O estado quase-estacionário é a região que se inicia após a distância “r”, e é caracterizada por ter uma distribuição de temperatura homogênea para um observador situado sobre uma fonte móvel (MODENESI, 2007).

Porem essa técnica só é válida para pequenos cordões de solda ou cordões contínuos, sem a interrupção do arco elétrico, mas não é sempre que se tem esses tipos de cordões, muitas vezes é preciso fazer uma solda com cordões intermitentes devido a limitação do processo, como no caso do processo eletrodo revestido que o tamanho do cordão é limitado pelo tamanho do consumível.

Soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido, em Inglês, Shielded Metal Arc Welding (SMAW), também conhecida como soldagem manual a arco elétrico (MMA), é um processo manual de soldagem que é realizado com o calor de um arco elétrico mantido entre a extremidade de um eletrodo metálico revestido e a peça de trabalho.

Com a abertura do arco, há uma irregularidade na distribuição de calor devido ao aumento da corrente elétrica, com isso a distribuição não uniforme de temperatura influencia nas propriedades termo físicas do material, alternando a transferência de calor, a geometria da poça de fusão, a morfologia do cordão e a transformação de fase na Zona Termicamente afetada (ZTA). Após um determinado espaço percorrido, quando o material atinge o estado quase-estacionário, é esperado melhores propriedades e características do cordão de solda.

Com base nesse conhecimento o presente trabalho tem como objetivo avaliar a influência do estado quase-estacionário nas características morfológicas e macroestruturais de cordões intermitentes, onde a soldagem é interrompida pela ausência do arco elétrico, que em seguida é reaberto no mesmo ponto de parada e executado até atingir novamente a região quase-estável.

O aço utilizado no estudo foi o inoxidável austenítico AISI 304, por ser um tipo de aço inoxidável mais popular no mercado. Sua aplicação abrange diversas áreas da indústria, como utensílios de cozinha, hospitais, indústrias farmacêuticas, químicas e petroquímicas.

A justificativa é garantir a qualidade do material através de um procedimento adequado de soldagem, aumentando sua vida útil. E aprofundar o estudo sobre o fenômeno estado quase-estacionário que ocorre durante o processo de soldagem, uma vez que é notável a ausência de estudos e pesquisas relacionados ao assunto.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA**

### **2.1 SOLDAGEM**

A soldagem é o mais importante processo industrial de fabricação de peças metálicas. Processos de soldagem e processos afins são também utilizados na recuperação de peças desgastadas, para a aplicação de revestimentos de características especiais sobre superfícies metálicas e para corte. O sucesso da soldagem está associado a diversos fatores e, em particular, com a sua relativa simplicidade operacional. Por outro lado, apesar desta simplicidade, não se pode esquecer que a soldagem pode ser muitas vezes um processo “traumático” para o material, envolvendo, em geral, a aplicação de uma elevada densidade de energia em um pequeno volume do material, o que pode levar a importantes alterações estruturais e de propriedades dentro e próximo da região da solda (MODENESI, MARQUES, SANTOS, 2012).

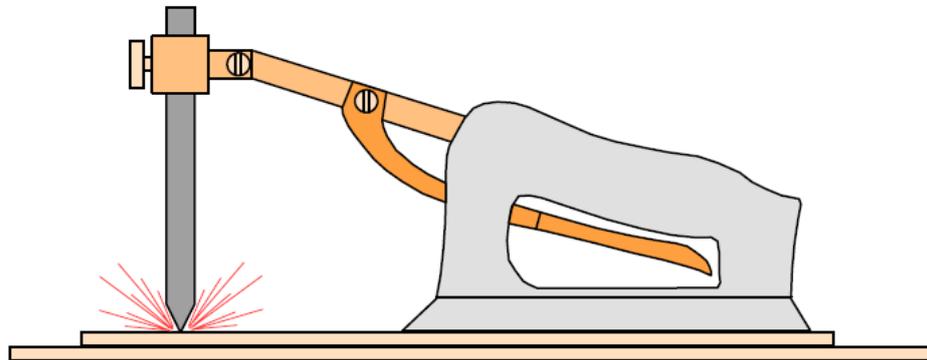
O desconhecimento ou a simples desconsideração das implicações desta característica fundamental pode resultar em problemas inesperados e, em alguns casos, graves. Estes problemas podem se refletir tanto em atrasos na fabricação ou em gastos inesperados, quando o problema é prontamente detectado, ou mesmo em perdas materiais e, eventualmente, de vidas, quando o problema é levado às suas últimas consequências (MODENESI, MARQUES, SANTOS, 2012).

#### **2.1.1 Histórico da soldagem**

A primeira patente de um processo de soldagem, obtida na Inglaterra por Nikolas Bernados e Stanislav Olszewsky em 1885, foi baseada em um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo de carvão e a peça a ser soldada. Este processo é ilustrado na figura 1. Por volta de 1890, N. G. Slavianoff, na Rússia, e Charles Coffin, nos Estados Unidos, desenvolveram independentemente a soldagem a arco com eletrodo metálico nu (isto é, que não possui um revestimento capaz de estabilizar o arco e fornecer um meio de proteção contra o ar atmosférico) (MODENESI, MARQUES, SANTOS, 2012).

Até o final do século XIX, os processos de soldagem por resistência, por aluminotermia e a gás foram desenvolvidos. Em 1907, Oscar Kjellberg (Suécia) patenteia o processo de soldagem a arco com eletrodo revestido. Em sua forma original, este revestimento era constituído de uma camada de cal, cuja função era unicamente estabilizar o arco. Desenvolvimentos posteriores tornaram este processo o mais utilizado no mundo (MODENESI, MARQUES, SANTOS, 2012).

Figura 1 - Sistema de soldagem a arco com eletrodo de carvão



Fonte: Modenesi (2012)

Nesta nova fase, a soldagem teve inicialmente pouca utilização, estando restrita principalmente à execução de reparos de emergência, até a eclosão da 1ª grande guerra, quando, devido às necessidades da época, a soldagem passou a ser utilizada mais intensamente como processo de fabricação (MODENESI, MARQUES, SANTOS, 2012).

A partir daí a soldagem se desenvolveu rapidamente. Os processos usados até então foram aperfeiçoados, novos processos foram desenvolvidos e novos equipamentos e tecnologias foram incorporados à soldagem. Paralelamente, desenvolvimentos em outras áreas, como a eletrotécnica, a eletrônica e a metalurgia também contribuíram para o avanço da soldagem (MODENESI, MARQUES, SANTOS, 2012).

Nos últimos anos, técnicas modernas de instrumentação e controle também foram absorvidas pela soldagem, juntamente com os desenvolvimentos na área de robótica e informática. Modelos teóricos e principalmente empíricos têm sido usados para uma melhor compreensão dos fenômenos associados à soldagem. Tudo isto possibilitou o desenvolvimento de sistemas com maior grau de mecanização e automação e, até mesmo, capacidade de tomada de decisão e alteração dos parâmetros de soldagem, durante o processo, independentemente do operador. Estes novos equipamentos se tornaram menores e mais eficientes, com menor custo de fabricação e manutenção (MODENESI, MARQUES, SANTOS, 2012).

Os consumíveis para soldagem também evoluíram, sendo adaptados para aplicação aos novos materiais e equipamentos, de forma cada vez mais rápida e eficiente, contribuindo para uma diminuição nos tempos e custos das operações de soldagem. O resultado final é um grande aumento na qualidade e produtividade com menor dependência de habilidade manual do soldador (MODENESI, MARQUES, SANTOS, 2012).

Atualmente, mais de 50 diferentes processos de soldagem têm alguma utilização industrial e a soldagem é o mais importante método para a união permanente de metais. Esta importância é ainda mais evidenciada pela presença de processos de soldagem e afins nas

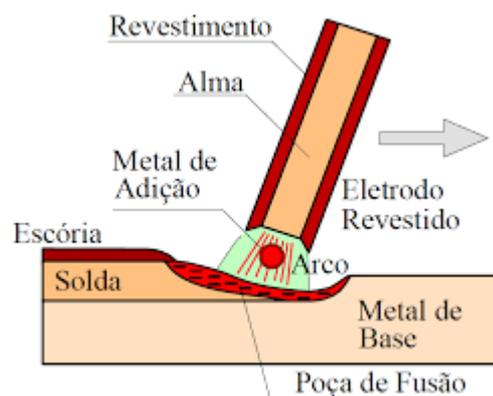
mais diferentes atividades industriais, incluindo desde segmentos de baixa tecnologia (a indústria serralheira, por exemplo) até aqueles de elevada tecnologia e complexidade (as indústrias nuclear e aeroespacial, por exemplo). Como consequência, tem-se observado, ao longo das últimas décadas, uma necessidade constante por novos tipos de aço e de outras ligas metálicas com uma soldabilidade adequada para novas e mais exigentes aplicações (MODENESI, MARQUES, SANTOS, 2012).

### 2.1.2 Processo de soldagem (SMAW)

A soldagem com eletrodo revestido (SMAW – Shielded Metal Arc Welding) é um processo predominantemente manual, que tem como maior benefício a facilidade de controle da microestrutura e da composição química do cordão de solda devido à possibilidade de se variar a formulação do revestimento. Esse processo oferece vantagens em relação a outros processos de soldagem a arco elétrico, uma vez que é menos sensível a correntes de ar e é mais apropriado para a maioria dos metais e ligas comumente usadas (LIMA, BRACARENSE, 2007).

A SMAW obtém a união das peças pelo seu aquecimento localizado com um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo metálico consumível, recoberto com um fluxo (eletrodo revestido) e as peças, conforme figura 2. O revestimento é consumido junto com o eletrodo pelo calor do arco desempenhando uma série de funções fundamentais ao processo de soldagem como, por exemplo, a estabilização do arco, a proteção do metal fundido pela formação de escória e de gases e a adição de elementos de liga e de desoxidantes à poça de fusão (MODENESI, 2011).

Figura 2 - Soldagem por SMAW



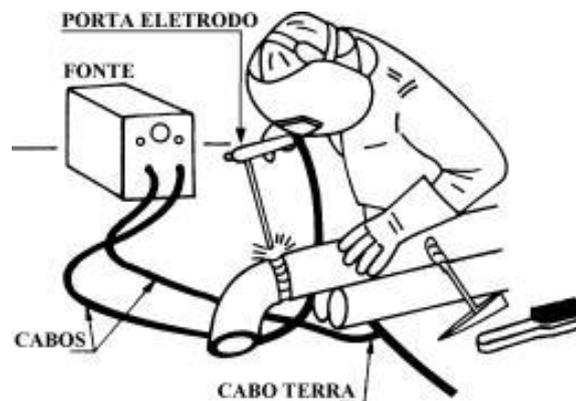
Fonte: MODENESI (2011)

O processo de soldagem com eletrodo revestido é, dentre todos os processos de soldagem a arco, o mais simples em termos de equipamentos, regulagem e aplicação. É aplicado em manutenção, construção e outras atividades que necessitam de soldagem. Além disso, é o processo mais utilizado em soldagem subaquática (LIMA, BRACARENSE, 2007).

Os equipamentos e materiais de um posto de soldagem com eletrodos revestidos compreendem, em geral: mesa de soldagem, fonte de energia de corrente contínua ou alternada (CC ou CA) com controle do nível de corrente de soldagem, cabos, porta-eletrodo, eletrodos, ferramentas e material de segurança, conforme figura 3. A fonte de energia pode apresentar diversas variações, em termos de projeto e características operacionais, de acordo com o seu fabricante e capacidade (MODENESI, 2011).

Como o comprimento do arco é controlado manualmente, é natural que ocorram variações durante a realização do cordão. Por essa razão, as fontes de energia utilizadas são do tipo “corrente constante”. Nesse tipo de fonte, a corrente de soldagem fornecida pela máquina é aproximadamente constante, sofrendo pouca influência da variação do comprimento do arco. Contudo, mesmo utilizando máquinas de corrente constante, um ponto crítico para se obter uma solda de qualidade é o controle do comprimento do arco elétrico (LIMA, BRACARENSE, 2007).

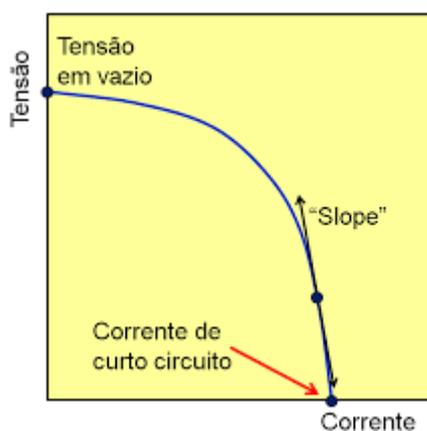
Figura 3 - Equipamento para soldagem SMAW



Fonte: MODENESI (2011)

A fonte de energia pode apresentar diversas variações, em termos de projeto e características operacionais, de acordo com o seu fabricante e capacidade. A curva do tipo corrente constante com capacidade e tipo de corrente adequados para os eletrodos utilizados, é a mais comum, como mostra a figura 4. Os cabos, o porta-eletrodo e a lente de proteção também devem ser adequados para o nível de corrente utilizado (MODENESI, 2011).

Figura 4 - Curva tensão (V) x corrente (i) típica de uma fonte para soldagem SMAW



Fonte: MODENESI (2011)

A correta seleção dos parâmetros de soldagem é essencial para a obtenção de uma junta soldada de qualidade. O termo parâmetro de soldagem abrangerá todas as características do processo de soldagem necessárias para a execução de uma junta soldada de tamanho, forma e qualidade desejados que são selecionadas pelo responsável pela especificação do procedimento de soldagem. Na soldagem manual com eletrodos revestidos, estas características compreendem, entre outras, o tipo e diâmetro do eletrodo, o tipo, a polaridade e o valor da corrente de soldagem, a tensão e o comprimento do arco, a velocidade de soldagem e a técnica de manipulação do eletrodo (MODENESI, 2011).

## 2.2 TRANSFERÊNCIA DE CALOR NA SOLDAGEM

Na maioria dos processos de soldagem, a junta precisa ser aquecida até uma temperatura adequada. Na soldagem por fusão, particularmente, trabalha-se com fontes de calor (o arco elétrico ou uma chama, por exemplo) de elevada temperatura (1.000 a 20.000°C), concentradas (superfície de contato com a junta de poucos milímetros quadrados) e, portanto, de elevada intensidade conforme a tabela 1, as quais, ao serem deslocadas ao longo da junta, resultam na formação da solda pela fusão e solidificação localizadas da junta (MODENESI, 2003).

Tabela 1 - Intensidade da fonte de calor para diferentes processos de soldagem

Processo de Soldagem	Intensidade da Fonte (GW/m <sup>2</sup> )
Eletrodo Revestido (SMAW)	0,005 – 0,5
MIG/MAG (GMAW)	0,005 – 0,5
Plasma (PAW)	0,005 - 50
Feixe de Eletrons / Laser (EBW / LBW)	50 - 5000

Obs.: 1 GW = 1x10<sup>9</sup>W

Fonte: MODENESI (2003)

Esta transferência de calor da fonte para a junta causa alterações de temperatura na solda e nas regiões adjacentes do metal base, que dependem da forma com que o calor é difundido para o restante do material sendo soldado (MODENESI, 2003).

Por sua vez, estas variações de temperatura causam, além da fusão e solidificação do cordão de solda, variações dimensionais e alterações microestruturais localizadas que podem resultar em efeitos indesejáveis, tais como: Tensões residuais e distorção; Deterioração de propriedades mecânicas (ductilidade, tenacidade, resistência mecânica, etc); Formação de trincas; Deterioração de propriedades físicas, químicas, etc (MODENESI, 2003).

De acordo com Modenesi (2003), em condições práticas, a intensidade de uma fonte de calor em soldagem não pode ser facilmente medida. Um parâmetro alternativo, de uso mais comum, é a **Energia de Soldagem**, ou **Aporte Térmico (H)**, que é a quantidade de energia gerada pela fonte de calor por unidade de comprimento da junta. Essa energia de soldagem pode ser calculada aplicando-se a equação (1).

$$H = \frac{q}{L} = \frac{q/t}{L/t} = \frac{P}{v} \quad (1)$$

Onde, **q** é a calor gerado pela fonte, **L** é o comprimento da junta, **t** é o tempo de soldagem, **P** é a potência (energia/tempo) gerada e **v** é a velocidade de soldagem. **H** é expressa, em geral, em kJ/mm ou kJ/cm. Na soldagem a arco, **H** é dada pela equação (2):

$$H = \frac{P}{v} = \frac{VI}{v} \quad (2)$$

Onde, **V** é a tensão do arco e **I** é a corrente de soldagem.

Ainda segundo Modenesi (2003), somente uma parte desta energia é transferida para a peça sendo soldada. Considerando este aspecto, pode-se definir a **Energia Líquida de Soldagem** ( $H_L$ ) como sendo uma porção da energia de soldagem gerada, definida pelo rendimento térmico do processo de soldagem, como mostrado na equação (3), onde  $\eta$  é o **rendimento térmico** do processo ( $\eta < 1$ ).

$$H_L = \eta H \quad (3)$$

O restante da energia,  $(1 - \eta)H$ , é a quantidade de energia por comprimento de solda que não foi transferida para a peça e representa as perdas do processo. O valor do rendimento térmico depende do processo e das condições de soldagem.

A tabela 2 mostra as faixas usuais de  $\eta$  para diferentes processos de soldagem. O rendimento térmico é, em geral, medido através de métodos calorimétricos. Uma pequena discussão sobre estes métodos, conforme Christensen (1965) apud Modenesi (2003).

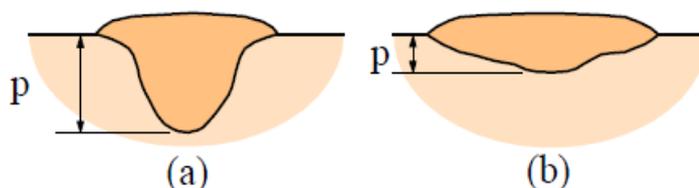
Tabela 2 - Rendimento Térmico para alguns processos de soldagem

Processo	Rendimento Térmico ( $\eta$ )
Arco Submerso (SAW)	0,85-0,98
MIG/MAG (GMAW)	0,75-0,95
Eletrodo Revestido (SMAW)	0,70-0,90
TIG (CC-) (GTAW)	0,50-0,80
TIG (CC+) (GTAW)	0,20-0,50
Laser (LBW)	0,005-0,70

Fonte: CHRISTENSEN (1965 apud MODENESI, 2003)

A energia de soldagem é um parâmetro cuja medida é simples, sendo utilizado em normas e trabalhos técnicos para especificar as condições de soldagem. Contudo, sua utilização deve ser feita com alguma cautela. Nem sempre existe uma relação direta entre a energia de soldagem e seus efeitos na peça, pois os parâmetros de soldagem (corrente, tensão e velocidade de deslocamento) afetam de modo diferente a intensidade do arco de acordo com a tabela 1 e o rendimento térmico do processo conforme tabela 2. Assim, embora utilizando o mesmo processo e energia de soldagem, é possível obter soldas de formatos completamente diferentes pela variação individual dos parâmetros de soldagem, conforme a figura 5 (MODENESI, 2003).

Figura 5- Efeito de alterações nos parâmetros de soldagem na geometria de cordões de solda depositados com uma energia de soldagem de aproximadamente 1,8 kJ/mm (esquemático). Condições de soldagem: (a) 800A, 26V e 12mm/s e (b) 125A, 26V e 1,7mm/s.



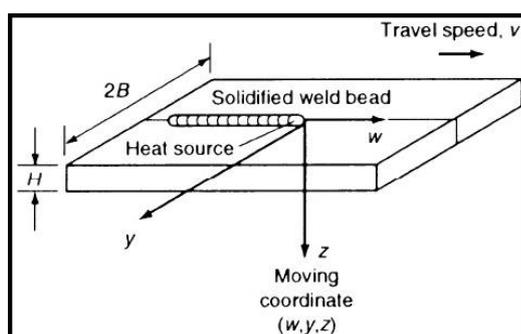
Fonte: MODENESI (2003)

### 2.2.1 Estado quase-estacionário

Segundo Quites (2008), no início da soldagem, o arco, com velocidade constante, faz o campo de temperaturas se intensificar e se expandir. No entanto, logo que a quantidade de calor absorvida se iguala à quantidade dissipada, o campo de temperaturas se torna praticamente constante, com isso o regime quase-estacionário foi alcançado.

Segundo Kou (2002), quando o estado quase-estacionário é atingido, para um observador movendo-se com a fonte de calor, a distribuição de temperatura e a geometria da poça de fusão não mudam com o tempo, como ilustra a Figura 6.

Figura 6 - Estado quase-estacionário



Fonte: METALS HANDBOOK (1993 apud CARVALHO, 2014)

Segundo Modenesi (2013) apud Carvalho (2014), o estado quase-estacionário ocorre após um tempo suficientemente longo de soldagem. Em várias situações reais, condições em que este estado pode ser uma suposição razoável são obtidas para soldas relativamente curtas. Em particular, esta suposição é razoável para soldas realizadas a uma velocidade aproximadamente constante, sem movimento de tecimento, em peças relativamente grandes

e de baixa difusividade térmica desde que os instantes iniciais (quando as temperaturas em torno do eletrodo aumentam) e final (após a extinção do arco) da soldagem sejam desprezados.

Segundo Wainer *et al.* (2004) apud Carvalho (2014), na ocorrência da condução de calor em corpos metálicos, é de grande importância do fenômeno de constante de tempo, onde se pode determinar o tempo necessário para que se atinja o regime quase estacionário. Essa definição permite avaliar o intervalo de tempo decorrido desde o início do processo até o instante em que a distribuição de temperaturas através do corpo passa a ser permanente para um observador situado sobre uma fonte móvel.

Segundo Carvalho (2014), com as equações (4) e (5) pode-se calcular, respectivamente, o tempo necessário e o espaço percorrido para o início do estado quase-estacionário:

$$t = \frac{16 \cdot k}{v_s^2} \quad (4)$$

$$r = v_s \cdot t \quad (5)$$

Onde:

$r$  = distância até o qual o calor se propaga no instante  $t$  (mm)

$t$  = tempo (s)

$K$  = difusividade térmica do material (m<sup>2</sup>/s)

$v_s$  = velocidade de soldagem (mm/s)

### 2.3 AÇOS INOXIDÁVEIS

Os aços inoxidáveis são ligas de ferro (Fe), carbono (C) e cromo (Cr) com um mínimo de 10,50% de Cr. Outros elementos metálicos também integram estas ligas, mas o Cr é considerado o elemento mais importante porque é o que dá aos aços inoxidáveis uma elevada resistência à corrosão (CARBÓ, 2008).

Os aços inoxidáveis surgiram de estudos realizados em 1912, tanto na Inglaterra como na Alemanha. O aço estudado na Inglaterra era uma liga Fe-Cr, com cerca de 13% de Cr. Na Alemanha, tratou-se de uma liga que, além de Fe e Cr, continha também níquel (Ni). No primeiro caso, era um aço inoxidável muito próximo ao que hoje chamamos de 420 e, o outro bastante parecido com o que hoje conhecemos como 302 (CARBÓ, 2008).

Já foi comentado que os aços inoxidáveis são ligas Fe-Cr com um mínimo de 10,50% de Cr. A adição de outros elementos permite formar um extenso conjunto de materiais. Nos aços inoxidáveis, dois elementos se destacam: o cromo, sempre presente, por seu importante papel na resistência à corrosão, e o níquel, por sua contribuição na melhoria das propriedades mecânicas (CARBÓ, 2008).

Em princípio, os aços inoxidáveis são divididos em dois grandes grupos: a série 400 e a série 300. A série 400 é a dos aços inoxidáveis ferríticos, aços magnéticos com estrutura cúbica de corpo centrado, basicamente ligas Fe-Cr. A série 300 é a dos aços inoxidáveis austeníticos, aços não magnéticos com estrutura cúbica de faces centradas, basicamente ligas Fe-Cr-Ni. Em todos os aços inoxidáveis, estão também sempre presentes o carbono e outros elementos que se encontram em todos os aços, como o silício (Si), manganês (Mn), fósforo (P) e enxofre(S) (CARBÓ, 2008).

Os aços inoxidáveis não são como Ouro(Au) e Prata (Pt), metais nobres que não reagem com o meio ambiente. Os metais que constituem os aços inoxidáveis reagem com bastante facilidade. Um deles, em particular o Cr, possibilita a formação de filmes que protegem essas ligas de ataques subsequentes. Este fenômeno, pelo qual o metal ou a liga deixam de ser corroídos, quando termodinamicamente deveríamos esperar o contrário, é conhecido como passividade (CARBÓ, 2008).

### **2.3.1 Aço inoxidável austenítico**

Os aços inoxidáveis austeníticos, dos quais o 304 (18%Cr-8%Ni) é o mais popular, têm excelente resistência à corrosão, excelente ductilidade (existe aqui uma grande mudança nas propriedades mecânicas se os comparamos com os ferríticos) e excelente soldabilidade (CARBÓ, 2008).

Os inoxidáveis austeníticos são utilizados em aplicações em temperatura ambiente, em altas o temperaturas (até 1.150° C) e em baixíssimas temperaturas (condições criogênicas), uma série de alternativas que dificilmente são conseguidas com outros materiais. O aço 304 é um material com grandes possibilidades em suas aplicações, a tal ponto que podemos encontrá-lo em nossas casas (em um garfo ou em uma panela, por exemplo) e também na indústria, em aplicações de grande responsabilidade (CARBÓ, 2008).

Um dos problemas enfrentado pelo 304 (e o mesmo ocorre com outros aços inoxidáveis) é o da ação corrosiva provocada pelo ânion cloreto, Cl(-). Dependendo da concentração de cloretos no meio, da temperatura e do pH, três formas de corrosão podem ocorrer: por pites, por frestas e sob tensão. Dessas três formas de corrosão, os ferríticos também são propensos às duas primeiras e podemos dizer que, em geral, os austeníticos possuem melhor resistência que os ferríticos às corrosões por pites e em frestas (devido à ação do níquel, que favorece a repassivação do material nas regiões onde o filme passivo foi quebrado por estas formas de corrosão) (CARBÓ, 2008).

A adição de molibdênio (cerca de 2%) transforma o 304 no aço inoxidável 316, um material muito mais resistente à corrosão por pites e por frestas. Podemos mencionar, como exemplo, que o 304 é recomendado para trabalhar, em temperatura ambiente, com águas que contêm, no máximo, 200 ppm (partes por milhão) de cloreto (CARBÓ, 2008).

## 2.4 ENSAIOS METALOGRAFICOS E DE DUREZA

Segundo Rohde (2010), controle de qualidade de um produto metalúrgico pode ser estrutural e dimensional. O segundo preocupa-se em controlar as dimensões físicas de um determinado produto, denominado Metrologia. O primeiro preocupa-se com o material que forma a peça, sua composição, propriedade, estrutura, aplicação, etc.

A propriedade mecânica denominada dureza é largamente utilizada na especificação de materiais, nos estudos e pesquisas que analisam propriedades mecânicas e na comparação de diversos materiais. Entretanto, a dureza de um material não tem o mesmo significado em todas as áreas que lidam com essa propriedade. Na área metalúrgica, dureza significa a resistência à deformação plástica permanente; na engenharia mecânica, a dureza é definida como a resistência à penetração de um material duro no outro; para um projetista, a dureza é considerada uma base de medida que está relacionada com o conhecimento da resistência e do tratamento térmico (ou mecânico) de um metal e da sua resistência ao desgaste; em usinagem de metais, um técnico sabe que a dureza fornece uma medida da resistência ao corte do metal; e na mineralogia, a dureza tem um significado ainda diferente, ou seja, o de medir a resistência ao risco que um material pode fazer em outro (SOUZA, 1982 apud RATTICHERE, 2004).

A propriedade mecânica denominada dureza é largamente utilizada na especificação de materiais, nos estudos e pesquisas que analisam propriedades mecânicas e na comparação de diversos materiais. Entretanto, a dureza de um material não tem o mesmo significado em todas as áreas que lidam com essa propriedade. Na área metalúrgica, dureza significa a resistência à deformação plástica permanente; na engenharia mecânica, a dureza é definida como a resistência à penetração de um material duro no outro; para um projetista, a dureza é considerada uma base de medida que está relacionada com o conhecimento da resistência e do tratamento térmico (ou mecânico) de um metal e da sua resistência ao desgaste; em usinagem de metais, um técnico sabe que a dureza fornece uma medida da resistência ao corte do metal; e na mineralogia, a dureza tem um significado ainda diferente, ou seja, o de medir a resistência ao risco que um material pode fazer em outro (SOUZA, 1982 apud RATTICHERE, 2004).

Assim, não é possível encontrar uma definição única de dureza abrangente a todos os conceitos acima mencionados, mesmo porquê, para cada um desses significados de dureza existem um ou mais tipos adequados de mensuração. Sob esse ponto de vista, pode-se dividir o ensaio de dureza em três tipos principais, que dependem da maneira com que o ensaio pode ser conduzido, a saber: por penetração, por choque e por risco. De todos os ensaios existentes, aqueles por penetração são mais utilizados no estudo de vários tipos de material (SOUZA, 1982 apud RATTICHERE, 2004).

O ensaio metalográfico procura relacionar a estrutura íntima do material com as suas propriedades físicas, com o processo de fabricação, com o desempenho de suas funções e outros. Este tipo de ensaio pode ser: Macrográfico ou Micrográfico (ROHDE, 2010).

#### 2.4.1 Macrografia

Examina-se a olho nu ou com pouca ampliação (até 50X) o aspecto de uma superfície após devidamente polida e atacada por um reagente adequado. Por seu intermédio tem-se uma ideia do conjunto, referente à homogeneidade do material, a distribuição e natureza das falhas, impureza e ao processo de fabricação, qualidade de solda profundidade de tratamentos térmicos entre outras características, conforme figura 7 (ROHDE, 2010).

Figura 7 - Amostra de ensaio macrográfico

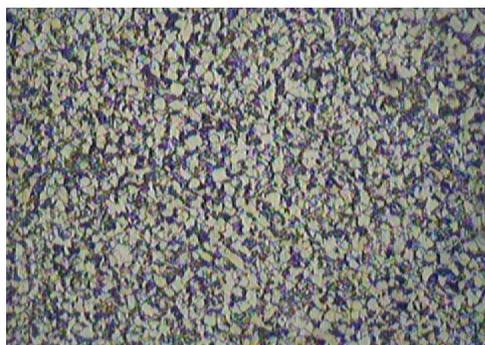


Fonte: RIZZUTO (2009)

#### 2.4.2 Micrografia

Consiste no estudo dos produtos metalúrgicos, com o auxílio do microscópio, onde se pode observar as fases presentes e identificar a granulação do material (tamanho de grão), o teor aproximado de carbono no aço, a natureza, a forma, a quantidade, e a distribuição dos diversos constituintes ou de certas inclusões, como ilustra a figura 8 (ROHDE, 2010).

Figura 8 - Ensaio de Micrografia



Fonte: ROHDE (2010)

### 2.4.3 Ensaio de Microdureza Vickers

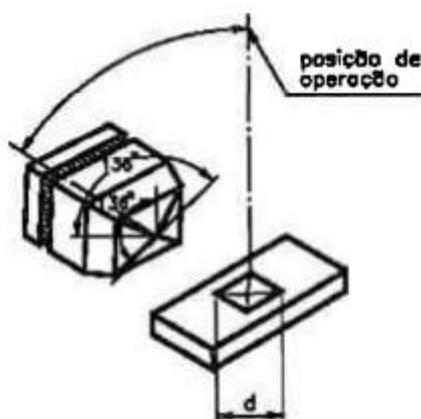
Segundo Souza (1982) apud Rattichiere (2004), em 1925, Smith e Sandland desenvolveram o método que ficou conhecido como ensaio de dureza Vickers. Este método utiliza um tipo de penetrador (uma ponta de diamante em forma de pirâmide de base quadrada e ângulo entre as faces de  $136^\circ$ ) que possibilita medir qualquer valor de dureza, dos materiais mais duros até os mais moles, e possui grandes vantagens sobre os ensaios Brinell e Rockwell, pois fornece uma escala contínua de dureza, medindo toda uma gama de valores numa única escala, não inutiliza os corpos de prova e pode ser usado para medir durezas superficiais.

O ensaio de dureza Vickers baseia-se na relação entre a força aplicada no indentador e a área da marca deixada pelo mesmo. Geralmente, o ensaio se dá com o uso de cargas variando de 1 a 120 kgf. A imagem formada é um losango regular e a dimensão da dureza Vickers é expressa em  $\text{kgf}/\text{mm}^2$  ou VHN (Vickers Hardness Number) (SOUZA, 1982 apud RATTICHERE, 2004).

A dureza Vickers baseia-se na resistência que o material oferece à penetração de uma pirâmide de diamante de base quadrada e ângulo entre faces de  $136^\circ$ , sob uma determinada carga, conforme a figura 9 (SOUZA, 1982 apud RATTICHERE, 2004).

A carga utilizada pode variar, assim como o tempo de indentação, porém apenas a carga é considerada no cálculo da microdureza. O tempo maior ou menor, será determinado pela resiliência do material analisado (SOUZA, 1982 apud RATTICHERE, 2004).

Figura 9 - Representação esquemática da pirâmide e da imagem da impressão deixada no material testado; "d" é a diagonal da impressão.



Fonte: SOUZA (1982 apud RATTICHERE, 2004)

De acordo com Rattichiere (2004), o valor de dureza Vickers (HV) é o quociente da carga aplicada (F) pela área de impressão (A) deixada no corpo ensaiado, como mostra a equação 6:

$$HV = \frac{F}{A} \quad (6)$$

Embora esta relação seja semelhante à equação de pressão, os conceitos são diferentes, pois a pressão sobre a estrutura testada e a resistência da mesma à penetração, é que determinarão o tamanho da diagonal (d) da impressão e, portanto, o valor da microdureza (RYGE, 1961 apud RATTICHERE, 2004).

A dureza Vickers é representada pelo valor de dureza, seguido do símbolo HV e de um número que indica o valor da carga aplicada. A representação 440 HV 30 indica que o valor da dureza Vickers é 440 e que a carga aplicada foi de 30 kgf. O tempo normal de aplicação da carga varia de 10 a 15 segundos. Quando a duração da aplicação da carga é diferente, indica-se o tempo de aplicação após a carga. Por exemplo, na representação 440 HV 30/20, o último número indica que a carga foi aplicada por 20 segundos (RYGE, 1961 apud RATTICHERE, 2004).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 MATERIAIS

O material utilizado no trabalho foi o aço inoxidável austenítico, classificado pela American Society for Testing and Materials (ASTM) como sendo da série 304. Foram confeccionadas duas barras, ambas com as dimensões de 5x50x200mm, conforme Figura 1, fornecidas pela empresa ATRAMETAL de Tremembé, São Paulo. A tabela 3 apresenta a composição química do aço inoxidável.

Figura 10 - Chapa de aço inoxidável AISI 304



Fonte: Produção do próprio autor

As chapas foram fornecidas pela empresa ATRAMETAL de Tremembé, São Paulo. E através do certificado de qualidade, foi coletado os dados necessários para a execução deste trabalho, a tabela 3 apresenta a composição química do aço inoxidável, fornecido pela empresa.

Tabela 3 - Composição Química do aço inoxidável AISI 304 (% em massa)

<b>C</b>	<b>Cr</b>	<b>Mn</b>	<b>N</b>	<b>Ni</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Si</b>
0,022	18,12	1,57	0,044	8,06	0,043	0,005	0,43

Fonte: Elinox – Aços Inoxidáveis (2013)

### 3.2 DETERMINAÇÃO DO CONSUMIVEL E PARÂMETROS

Conforme a norma AWS 5.4 que diz sobre a soldagem de aços inoxidáveis, o eletrodo selecionado foi o AWS E 308L-16 de bitola 2,5mm, garantindo boa soldabilidade no metal de base. A tabela 4 mostra a composição química do eletrodo:

Tabela 4 - Composição Química do Eletrodo AWS E308L – 16 (% em massa)

<b>Mn</b>	<b>Mo</b>	<b>Cu</b>	<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Ni</b>	<b>Cr</b>
1,7	0,1	0,1	0,03	0,5	10	20

Fonte: ESAB (2011)

#### 3.2.1 Diagrama de Schaeffler

O Diagrama de Schaeffler foi utilizado para determinar os parâmetros de soldagem mais adequado em relação ao metal de base e o metal de adição, para uma união livre de descontinuidades e fases indesejadas. Para isso, foi necessário o cálculo do Cromo equivalente e Níquel equivalente, como mostram as Equações (7) e (8), do Metal de base e Metal de adição, através da composição química destes.

$$Cr_{eq} = Cr + Mo + 1,5 Si + 0,5 Nb \quad (7)$$

$$Ni_{eq} = Ni + 30 C + 0,5 Mn \quad (8)$$

#### **Metal Base**

$$Cr_{eq} = 18,12 + 0 + 1,5 \times 0,43 + 0,5 \times 0 = \mathbf{18,7}$$

$$Ni_{eq} = 8,06 + 30 \times 0,022 + 0,5 \times 1,57 = \mathbf{9,5}$$

#### **Metal Adição**

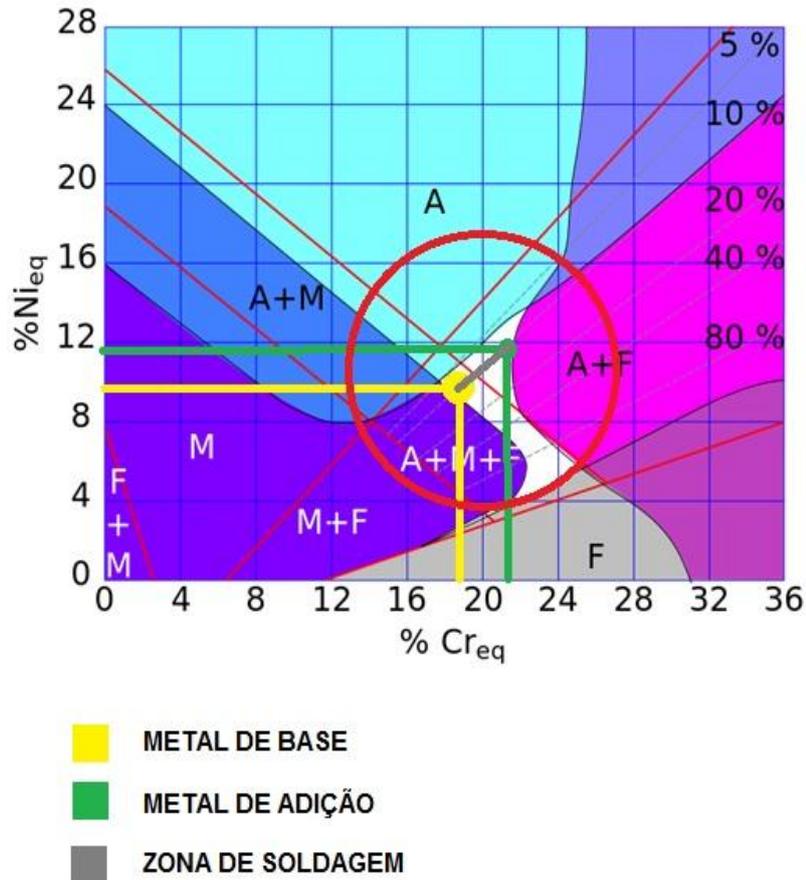
$$Cr_{eq} = 20 + 0,1 + 1,5 \times 0,5 + 0,5 \times 0 = \mathbf{20,8}$$

$$Ni_{eq} = 10 + 30 \times 0,03 + 0,5 \times 1,7 = \mathbf{11,7}$$

Os valores obtidos através dos cálculos foram marcados no diagrama de Schaeffler e

com base no resultado, foi possível determinar a zona de soldagem, esta que ficou dentro da região livre de discontinuidades e fases indesejadas, como mostra a figura 11, possibilitando a melhor escolha dos parâmetros de soldagem respeitando a especificação do fabricante do consumível.

Figura 11 - Diagrama de Schaeffler



Fonte: Produção do próprio autor

### 3.3 PROCEDIMENTOS DE SOLDAGEM

#### 3.3.1 Cálculo da temperatura de pré-aquecimento

Primeiramente, foi realizado o cálculo do Carbono Equivalente ( $C_{eq}$ ), conforme a fórmula (9), dada pelo International Institute of Welding (IIW), utilizando os dados da composição química do material.

$$C_{eq} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \% \quad (9)$$

$$C_{eq} = 0,022 + \frac{1,57}{6} + \frac{18,12 + 0 + 0}{5} + \frac{8,06 + 0}{15} \%$$

$$C_{eq} = 0,022 + \frac{1,57}{6} + \frac{18,12}{5} + \frac{8,06}{15} \%$$

$$C_{eq} = 0,022 + 0,261 + 3,624 + 0,537\%$$

$$C_{eq} = 0,022 + 0,261 + 3,624 + 0,537\%$$

$$\mathbf{C_{eq} = 4,44\%}$$

Em seguida, foi calculado o Carbono Equivalente Total ( $C_{eqtotal}$ ), através da equação (10).

$$C_{eqtotal} = 1 - [0,005 \times C_{eq} \times Espessura(mm)] \quad (10)$$

$$C_{eqtotal} = 1 - [0,005 \times 4,44 \times 5]$$

$$C_{eqtotal} = 1 - 0,1$$

$$\mathbf{C_{eqtotal} = 0,9}$$

E por último, foi utilizada a equação (11) para determinar o real valor da temperatura de pré-aquecimento.

$$T_{P-aq} = 350 \times \sqrt{C_{eqtotal} - 0,25} \quad (11)$$

$$T_{P-aq} = 350 \times \sqrt{0,9 - 0,25}$$

$$T_{P-aq} = 350 \times \sqrt{0,65}$$

$$T_{P-aq} = 350 \times 0,80$$

$$\mathbf{T_{P-aq} = 280^\circ C}$$

### 3.3.2 Parâmetros de soldagem

O processo de soldagem utilizado foi o SMAW. A Tabela 5 mostra os parâmetros de soldagem empregados. A fonte de soldagem utilizada foi uma Lincoln Elétric, modelo LF45.

Tabela 5 - Parâmetros de soldagem

	Ø Eletrodo	Polaridade	Corrente	Tensão	Velocidade	Pré-aquecimento
<b>Cordão 1</b>	2,5mm	CC+	90 A	34 V	4,16 mm/s	280° C
<b>Cordão 2</b>	2,5mm	CC+	90 A	33 V	4,17 mm/s	280° C
<b>Cordão 3</b>	2,5mm	CC+	90 A	34 V	5,88 mm/s	280° C
<b>Cordão 4</b>	2,5mm	CC+	90 A	32 V	4,54mm/s	280° C

Fonte: Produção do próprio autor

### 3.3.3 Soldagem dos corpos de prova

Antes da soldagem, foi necessário o uso do maçarico para pré-aquecimento das barras, alcançando a temperatura acima de 280°C. Para medição da temperatura, foi utilizado um pirômetro infravermelho digital portátil, da marca INSTRUTHERM, modelo TI-890.

A Figura 12 mostra o início do pré-aquecimento das barras, utilizando o maçarico. A Figura 3, mostra a utilização do pirômetro infravermelho para o acompanhamento da temperatura, sendo 3(a) o início do aquecimento e 3(b) a chapa na temperatura final do pré-aquecimento.

Figura 12 - Pré-aquecimento das barras



Fonte: Produção do próprio autor

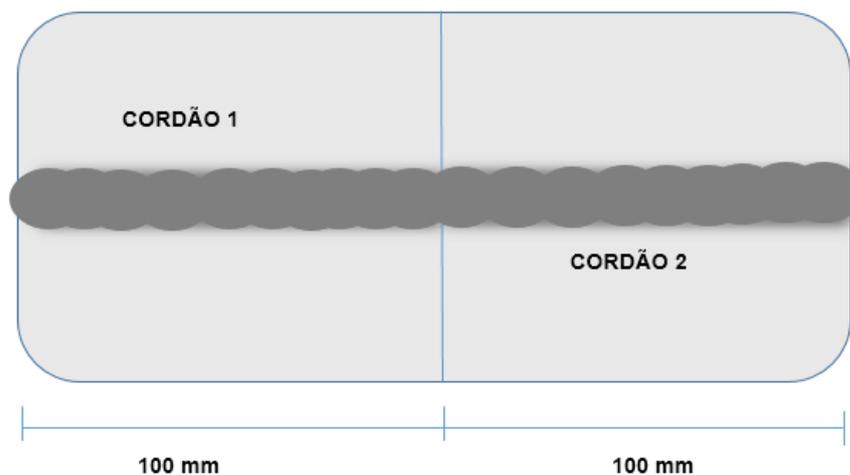
Figura 13 - Acompanhamento da temperatura de pré-aquecimento



Fonte: Produção do próprio autor

Após o pré-aquecimento, cada chapa teve um procedimento de soldagem específico. Na primeira chapa, foram realizados dois cordões. O primeiro cordão teve início em uma das extremidades da chapa e terminou no centro da mesma. O segundo cordão começou no final do primeiro cordão e foi até o final da chapa. Os dois cordões tiveram um comprimento de 100mm. A figura 14 mostra uma representação esquemática dessa situação.

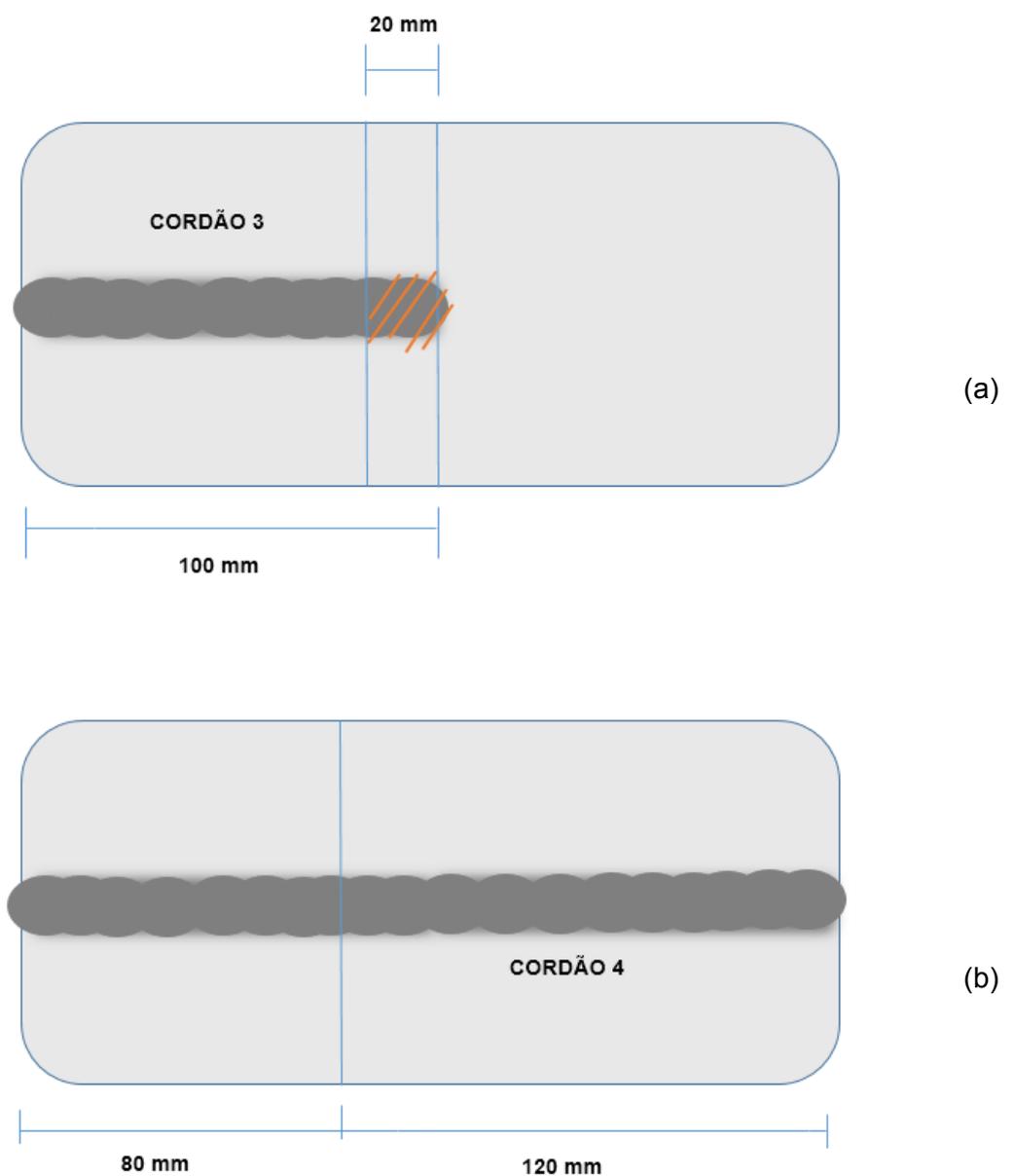
Figura 14 - Situação A: soldagem da primeira chapa (cordões 1 e 2).



Fonte: Produção do próprio autor

Na segunda chapa, o primeiro cordão teve início em uma das extremidades e terminou no centro da chapa, obtendo um comprimento de 100mm. Porém, 20mm do final desse primeiro cordão foi removido utilizando-se um esmeril. O segundo cordão começou sobre a parte removida do primeiro cordão, e foi até a extremidade oposta da chapa, obtendo um comprimento de 120mm, como mostram as representações esquemáticas apresentadas nas Figuras 15(a) e 15(b).

Figura 15 - Situação B: soldagem da segunda chapa. (a) representação do cordão 3 e da região esmerilhada; (b) representação do cordão 4.



Fonte: Produção do próprio autor

### 3.4 DETERMINAÇÃO DO ESTADO QUASE-ESTACIONÁRIO

O estado quase-estacionário é influenciado pela difusividade térmica do material. A difusividade térmica é uma propriedade termofísica, que relaciona a capacidade que o material tem de conduzir energia térmica, em relação a sua capacidade de armazenar essa energia. Logo, para se calcular o início do estado quase-estacionário, é necessário determinar a difusividade térmica do material. Para isso, aplicamos a equação (12), com base nos dados apresentados na Tabela 6.

$$K = \frac{k}{\rho \cdot Cp} \quad (12)$$

Onde:

- $K$  é a difusividade Térmica ( $m^2/s$ )
- $k$  é condutividade térmica ( $W/(m \cdot K)$ )
- $\rho$  é densidade ( $g/cm^3$ )
- $Cp$  é capacidade de calor específica ( $J/(kg \cdot K)$ )

Tabela 6 - Propriedades Físicas do Aço Inoxidável 304

Densidade (20 °C) $g/cm^3$	Calor Específico (20 °C) $J/(g \cdot K)$	Condutividade Térmica (20 °C) $W/(K \cdot m)$	Resistência Eléctrica (20 °C) $.mm^2/m$	Módulo de Elasticidade (20 °C) $kN/mm^2$	Magnético
7,9	0,5	15	0,73	200	Não

Fonte: Produção do próprio autor

Substituindo os valores da Tabela 6, na equação (12), encontramos o valor da difusividade térmica.

$$K = \frac{15,9}{7,9 \times 0,50} \quad K = \frac{15,9}{3,96} \quad K = 4,01 \, m^2/s$$

Uma vez determinado o valor da difusividade térmica, é possível determinar o tempo necessário para o início do estado quase-estacionário, aplicando-se a equação (13).

$$t = \frac{16 \cdot K}{V_s^2} \quad (13)$$

Para o cálculo do tempo necessário para o início do estado quase-estacionário, é necessário conhecer também a velocidade de soldagem ( $v_s$ ). Nesse trabalho, a velocidade de soldagem foi obtida por meio da equação (14), onde  $S$  é o deslocamento total da tocha (100 mm para todos os cordões) e  $t$  foi o tempo medido durante o deslocamento.

$$V = \frac{\Delta S}{\Delta t} \quad (14)$$

A Tabela 7, mostra os valores calculados para a velocidade de soldagem, para cada cordão de solda.

Tabela 7 - velocidade de soldagem de cada cordão

<b>Cordão</b>	<b>Tempo medido (s)</b>	<b>Velocidade calculada</b>
Nº 01	24,01 s	4,16 mm/s
Nº 02	23,98 s	4,17 mm/s
Nº 03	17,04 s	5,88 mm/s
Nº 04	22,11 s	4,54mm/s

Fonte: Produção do próprio autor

Aplicando-se, na equação (13), os valores obtidos para a velocidade de soldagem (Tabela 7) e o valor calculado para a difusividade térmica do material ( $k = 4,01 \text{ mm}^2/\text{s}$ ), encontramos o tempo necessário para cada cordão entrar no regime quase-estacionário. A Tabela 8 mostra os valores dos tempos, para cada cordão.

Tabela 8 - Tempo para início do Estado Quase-estacionário

<b>Cordão</b>	<b>Tempo para início do estado quase-estacionário</b>
Nº 01	3,70 s
Nº 02	3,71 s
Nº 03	1,85 s
Nº 04	3,11 s

Fonte: Produção do próprio autor

Com os tempos necessários para o início do estado quase-estacionário e as velocidades de soldagem, para cada um dos cordões, chegamos aos valores do espaço ( $r$ )

percorrido pela tocha até o início do estado quase-estacionário, utilizando a equação (15). Os valores obtidos para  $r$  são apresentados na Tabela 9.

$$r = t \times v_s \quad (15)$$

Tabela 9 - Região calculada para início do estado quase-estacionário

<b>Cordão</b>	<b>Espaço percorrido até o início do estado quase-estacionário</b>
Nº 01	15,4 mm
Nº 02	15,5 mm
Nº 03	10,9 mm
Nº 04	14,1 mm

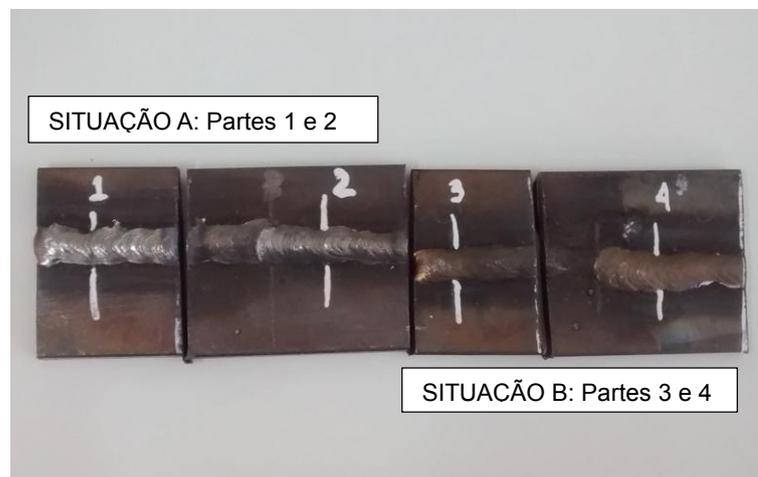
Fonte: Produção do próprio autor

Após o cálculo do espaço percorrido para início do estado quase-estacionário, as distâncias foram marcadas sobre cada cordão, para a confecção dos corpos de provas.

### 3.5 CORTE DAS CHAPAS E CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

As chapas foram cortadas de maneira que todos os cordões de solda tivesse as mesmas regiões a serem analisadas, como ilustra a figura 16, ou seja, a região do início do estado quase-estacionário, a região antes do início do estado quase-estacionário e a região após o início do estado quase estacionário.

Figura 16 - Chapas cortadas



Fonte: Produção do próprio autor

Depois de definir as partes a serem analisadas, foram confeccionados 3 corpos de prova para cada parte, totalizando 12 corpos de prova, como ilustra a figura 17.

Figura 17 - Corpos de Provas de cada parte soldada da chapa



Fonte: Produção Próprio Autor

### 3.6 ENSAIO DE MACROGRAFIA

O ensaio foi realizado no laboratório de metalografia da FATEC Pindamonhangaba. Para a análise macrográfica, cada corpo de prova foi lixado com as lixas 180, 220, 300, 400 e 600 mesh. O ataque químico foi realizado logo após o lixamento com a lixa 600 e o reagente utilizado foi o marble's.

Após o ataque, os corpos de prova foram levados ao Estereoscópio, conforme Figura 18, onde foram feitas as fotografias com aumento 10x. Sobre as imagens obtidas, foram feitas as seguintes medições: profundidade de penetração e largura do cordão.

Figura 18 - Estereoscópio

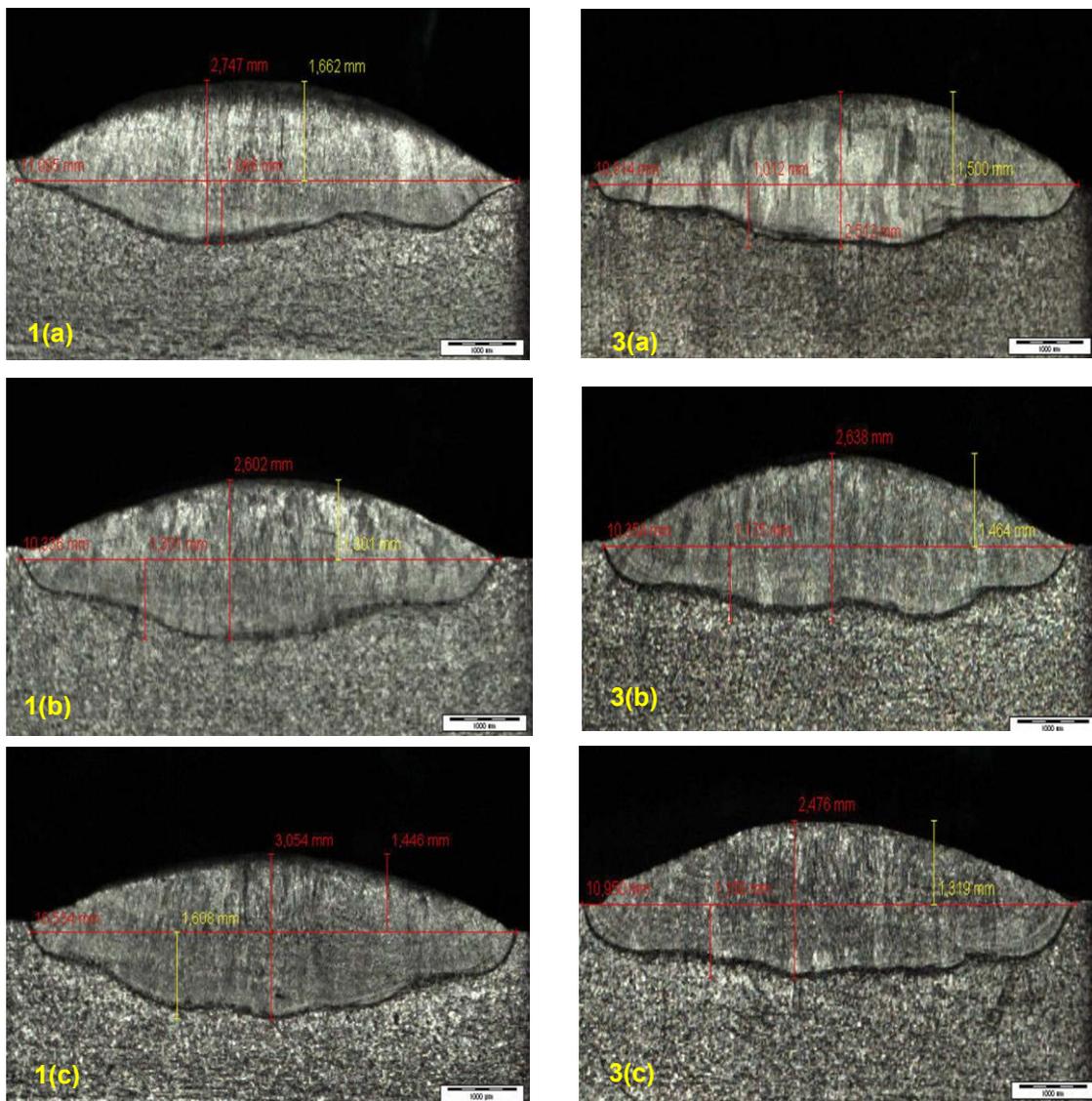


Fonte: Produção do próprio autor

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados da análise macrográfica permitiram comparar a geometria dos cordões de solda e observar as variações na geometria de cada um deles. Foi possível notar pequenas diferenças na extensão, altura, penetração e concavidade. A Figura 19 apresenta as fotos do início da soldagem das duas chapas, identificadas da seguinte forma: N° 1 – indica situação A; N° 3 – indica a situação B; (a) Antes do estado quase-estacionário; (b) Próximo ao início do estado quase-estacionário; (c) Distante do início do estado quase-estacionário.

Figura 19 - Macrografias das situações de início (A e B)



Fonte: Produção do próprio autor

As dimensões obtidas nas partes 1 e 3, são apresentadas na Tabela 10. A parte 1, como dito anteriormente, é referente a Situação A de soldagem, enquanto a parte 3 é referente a Situação B de soldagem, como mostrado anteriormente na Figura 16. As amostras estão identificadas como 1(a) e 3(a) – antes do estado quase-estacionário; 1(b) e 3(b) – imediatamente após o estado quase-estacionário; 1(c) e 3(c) – mais afastado do início do estado quase-estacionário.

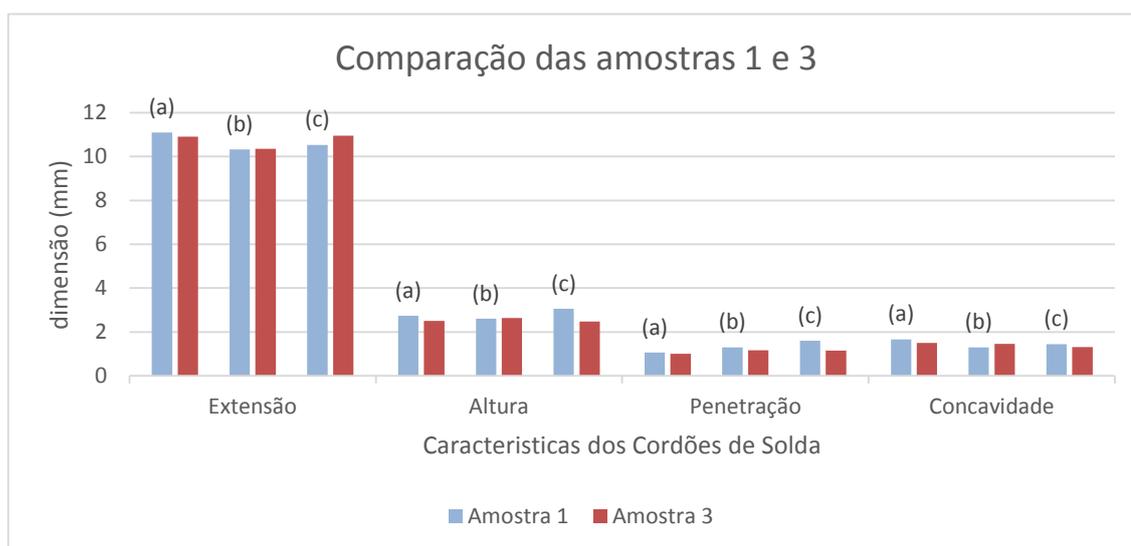
Tabela 10 - Dados do cdp1 e cdp3

Amostras	Extensão (mm)	Altura (mm)	Penetração (mm)	Concavidade (mm)
1(a)	11,09	2,74	1,06	1,66
3(a)	10,91	2,51	1,01	1,50
1(b)	10,33	2,60	1,30	1,30
3(b)	10,35	2,63	1,17	1,46
1(c)	10,53	3,05	1,60	1,44
3(c)	10,95	2,47	1,15	1,31

Fonte: Produção do próprio autor

Os resultados apresentados na Tabela 10 estão representados no Gráfico 1. De modo, que visualmente fique mais claro a comparação dos diferentes resultados.

Gráfico 1 – Comparação das dimensões dos cordões 1 e 3



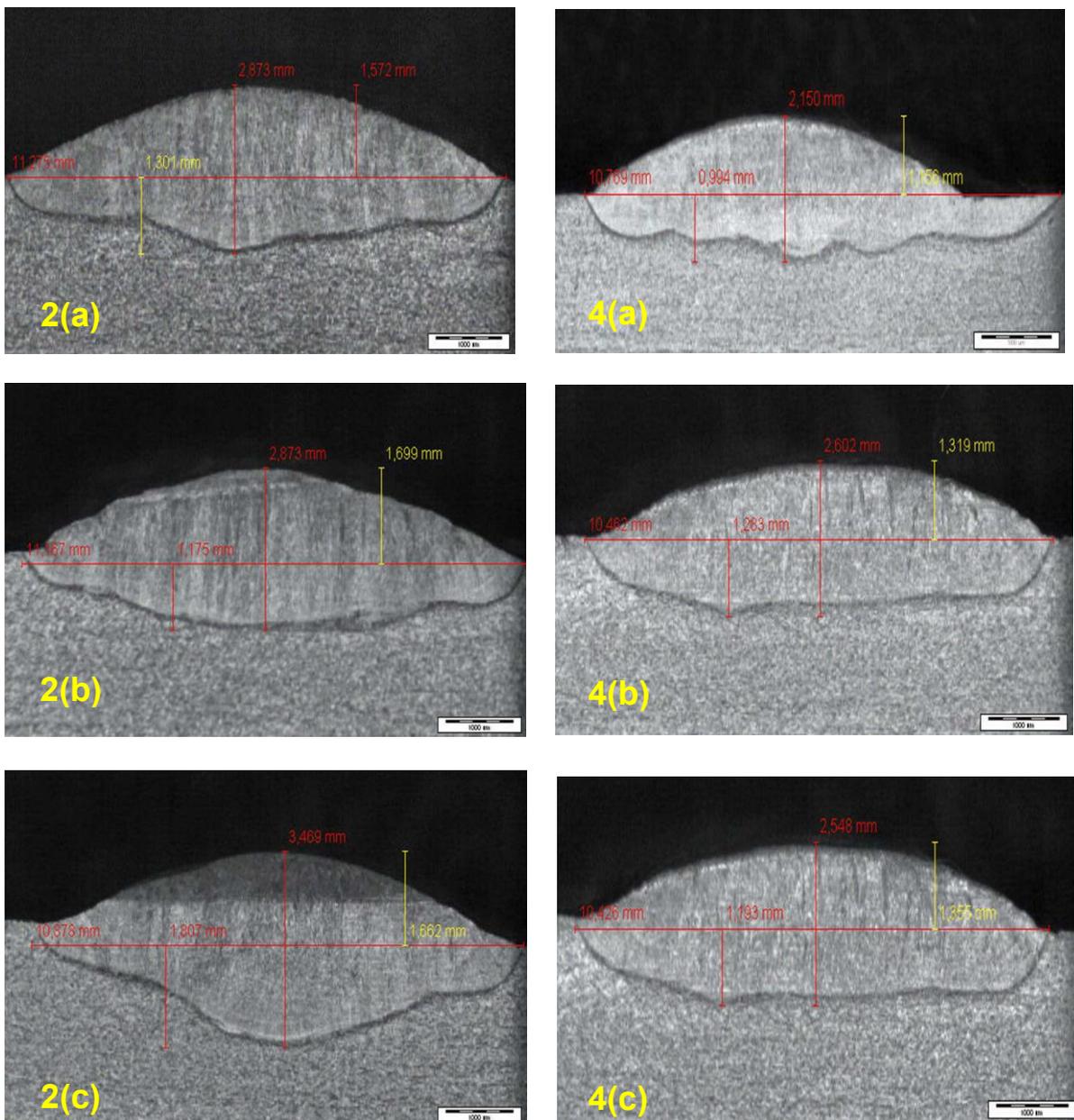
Fonte: Produção do próprio autor

A partir das medições feitas sobre as imagens, foi possível comparar o efeito do estado quase-estacionário para as situações estudadas. Em relação a extensão, a amostra 1 apresenta maior extensão antes do estado quase-estacionário. Para a amostra 3, os valores

medidos antes e após o estado quase-estacionário são praticamente os mesmos. A extensão medida imediatamente após o estado quase-estacionário ser atingido, foi praticamente igual para os dois cordões. Após o estado quase-estacionário é possível notar que a altura da amostra 1 foi maior que a amostra 3, conseqüentemente a penetração também foi maior. Já a concavidade ficou bem próxima em relação as amostras 1 e 3, das diferentes situações

A Figura 20 apresenta, as fotos do ponto de emenda dos cordões de soldagem das duas chapas (situação A e B).

Figura 20 - Macrografia das situações intermitentes (A e B)



Fonte: Produção do próprio autor

As dimensões obtidas nas partes 2 e 4, são apresentadas na Tabela 11. A parte 2 é referente a Situação A de soldagem, enquanto a parte 4 é referente a Situação B de soldagem, como mostrado anteriormente, na Figura 17. As amostras estão identificadas como 2(a) e 4(a) – antes do estado quase-estacionário; 2(b) e 4(b) – imediatamente após o estado quase-estacionário; 2(c) e 4(c) – mais afastado do início do estado quase-estacionário.

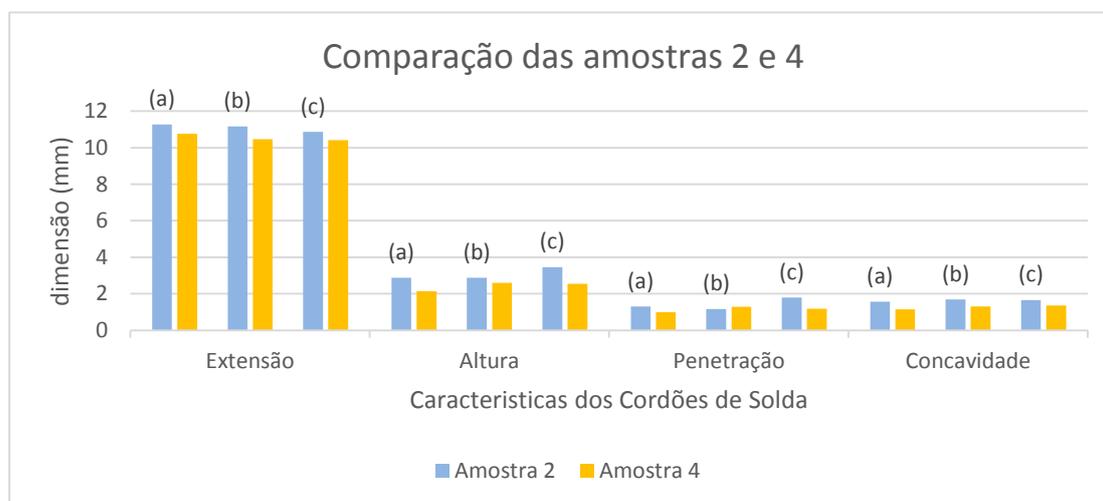
Tabela 11 - Dados do cdp1 e cdp3

Amostras 2	Extensão (mm)	Altura (mm)	Penetração (mm)	Concavidade (mm)
2(a)	11,27	2,87	1,30	1,57
4(a)	10,76	2,15	0,99	1,15
2(b)	11,16	2,87	1,17	1,69
4(b)	10,76	2,15	0,99	1,15
2(c)	10,87	3,46	1,80	1,66
4(c)	10,42	2,54	1,19	1,35

Fonte: Produção do próprio autor

Avaliando os valores obtidos das dimensões das características de cada cordão foi notado que antes do estado quase-estacionário não houve grandes diferenças nas características dos cordões, já na região bem próxima do início do estado quase estacionário os cordões apresentaram algumas características praticamente iguais e após o regime quase-estacionário os cordões apresentaram maior altura e penetração. Os resultados apresentados na Tabela 11 estão representados no Gráfico 2. De modo, que visualmente fique mais claro a comparação dos diferentes resultados.

Gráfico 2 – Comparação das dimensões dos cdp 2 e 4



Fonte: Produção do próprio autor

A partir das medições feitas sobre as imagens, foi possível comparar o efeito do estado quase-estacionário para as situações estudadas. Em relação a extensão, a amostra 2 apresentou maior extensão antes, imediatamente após e após a região do estado quase-estacionário. Em relação a altura a amostra 2, também apresentou as maiores dimensões em todas situações analisadas, ainda é possível observar que após o estado quase-estacionário a altura ficou bem distante da amostra 4. Em consequência, observou-se uma diferença considerável em relação a amostra 2 com a amostra 4 na característica de penetração após o estado quase-estacionário, já próximo a região de início do estado quase-estacionário a penetração foi praticamente as mesmas. E, a concavidade das amostras 2 ficaram maiores em relação as amostras 4, nas diferentes situações analisadas. Foi possível notar também que os valores da situação (b) e (c) das amostra 4, foram praticamente iguais. Ou seja, após ter atingindo o estado quase-estacionário nessa situação as características do cordão se mantiveram iguais até um certo espaço.

## 5 CONCLUSÃO

- a. Através deste trabalho, foi possível notar que o material tem boa soldabilidade, e visualmente a morfologia de todos cordões ficaram livres de defeitos.
- b. Houve dificuldade em encontrar um ataque ideal para a análise macrográfica do material. Não houve revelação da ZTA (Zona Termicamente Afetada)
- c. Antes do estado quase-estacionário, os cordão apresentaram baixa penetração.
- d. Na região logo após o início do estado quase estacionário os cordões, apresentaram maior penetração.
- e. Após uma distância do início do estado quase estacionário os cordões apresentaram um melhor geometria dos cordões.
- f. Contudo, a situação B apresentou o melhor resultado. Devido, a homogeneidade do cordão nas diferentes distâncias analisadas após o início do estado quase estacionário. Estas, garantiu a maior penetração, e uma boa relação entre a altura e extensão.

## REFERÊNCIAS

- BARRA, S. R. **Fundamentos da transferência de calor aplicados à soldagem**. Apostila. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal. 2006.
- CALLISTER, W. D., **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 7ª ed. Belo Horizonte: LTC, 2002.
- CARBÓ, H. M. **Aços Inoxidáveis: Aplicações e especificações**. Catálogo. ArcelorMittal Inox Brasil. São Paulo. 2008.
- CARVALHO, R. L. **Influência da energia quase-estacionária sobre a morfologia do cordão de solda. 2014**. Monografia. Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba. Pindamonhangaba. 2014.
- COLPAERT, H. **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns**. 4ª ed. São Paulo: Edgard Blusher, 1974.
- KOU, S. **Welding metallurgy**. 2ª ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2002.
- LIMA, E. J.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem robotizada com eletrodo revestido utilizando controle de comprimento do arco elétrico com compensação da temperatura do eletrodo**. Monografia. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2007.
- MACHADO, I. G. **Soldagem e técnicas conexas: processos**. Porto Alegre: Editado pelo Autor, 1996.
- MARQUES, P. V.; MODENESI P. J.; BRACARENSE A. Q. **Soldagem: fundamentos e tecnologia**. 3ª ed. Belo Horizonte: UFMG, 2009.
- MODENESI, P. J. **Fluxo de calor em soldagem**. Monografia. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2003.
- MODENESI, P. J.; **Técnica Operatória da Soldagem SMAW**. Monografia. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2011.
- MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V.; SANTOS, D. B. **Introdução à Metalurgia da Soldagem**. Monografia. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2012.
- MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V. **Introdução aos Processos de Soldagem**. Monografia. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2006.
- MODENESI, P. J. **Introdução à física do arco elétrico e sua aplicação na soldagem dos Metais**. Monografia. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2007.
- NUNES, L. de P.; KREISCHER, A. T. **Introdução à metalurgia e aos materiais metálicos**. 1ª ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2010.
- PAREDES, R. S. C. **Introdução a metalurgia de soldagem**. Apostila. Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 2009.
- QUITES, A. M. **Metalurgia na Soldagem dos aços**. 1ª ed. Florianópolis: Soldasoft, 2008.

QUITES, A. M. **Tecnologia da soldagem a arco voltaico**. 1ª ed. Florianópolis: Edeme, 1979.

RATTICHERI F. **Avaliação da microdureza superficial do esmalte dentário irradiado com laser de diodo 960 nm**. Monografia. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2004.

RIBEIRO, A. I. S.; JUNIOR, M. J. F. **Análise Morfológica do Processo de Usinagem por Fresamento da Liga de Alumínio AA 7050 Sob a Ótica da Anisotropia**. Monografia. Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba. Pindamonhangaba. 2016.

ROHDE, R. A. **Metalografia preparação de amostras**. Apostila. Escola da URI. Santo Ângelo. 2010.

SILVA, R. J. **Noções básicas de Processos de Soldagem e Corte**. Apostila. Senai. Vitória, 1996.

VOORT, G. F. V. **Metallography: Principles and practice**. 2ª ed. New York: ASM International, 2000.

ZEEMANN, A. **Energia de Soldagem**. Informativo. Infosolda. [s.d.]. Disponível em <<http://www.infosolda.com.br/images/Downloads/Artigos/metal/energia-de-soldagem.pdf>> Acesso em : 24/03/2017.