

**UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ
ROBSON LOPES DE CARVALHO**

**INFLUÊNCIA DO ESTADO QUASE-ESTACIONÁRIO
SOBRE A MORFOLOGIA DO CORDÃO DE SOLDA**

**Taubaté - SP
2018**

ROBSON LOPES DE CARVALHO

**INFLUÊNCIA DO ESTADO QUASE-ESTACIONÁRIO
SOBRE A MORFOLOGIA DO CORDÃO DE SOLDA**

Trabalho de Graduação apresentado para
obtenção do Certificado de Graduação do
curso de Engenharia Mecânica do
Departamento de Engenharia Mecânica da
Universidade de Taubaté.

Orientador(a): Msc. Leandro Maia Nogueira

**Taubaté – SP
2018**

SIBi – Sistema Integrado de Bibliotecas / UNITAU

C331i Carvalho, Robson Lopes de
Influência do estado quase-estacionário sobre a morfologia do cordão de solda / Robson Lopes de Carvalho. -- 2018.
50 f. : il.

Monografia (graduação) – Universidade de Taubaté, Departamento de Engenharia Mecânica e Elétrica, 2018.

Orientação: Prof. Me. Leandro Maia Nogueira, Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Estado quase-estacionário. 2. Morfologia do cordão de solda. 3. ZTA.
I. Título. II. Graduação em Engenharia Mecânica.

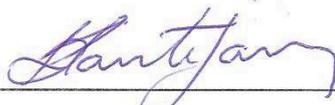
CDD – 671.56

ROBSON LOPES DE CARVALHO

INFLUÊNCIA DA ENERGIA QUASE-ESTACIONÁRIA SOBRE A MORFOLOGIA
DO CORDÃO DE SOLDA

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO APROVADO COMO PARTE
DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE **GRADUADO EM**
ENGENHARIA MECANICA

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO COORDENADOR DE CURSO DE
GRADUAÇÃO DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA



Prof. Msc. FABIO HENRIQUE FONSECA SANTEJANI

Coordenador de Trabalho de Graduação

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Msc. LEANDRO MAIA NOGUEIRA
UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ



Prof. Msc. IVAIR ALVES DOS SANTOS
UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ

18, Outubro de 2018

Dedico este trabalho aos meus pais Wanderlei de Carvalho e
Célia Lopes e a todos que estiveram ao meu lado ao longo
desses cinco anos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos Profs. Msc. Ivair Alves e Msc. Leandro Maia Nogueira. Aos alunos Francisco, do curso de Tecnologia em Manutenção Industrial, da Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba, pela ajuda na soldagem dos corpos de prova e Rayana Izidoro, do curso de Tecnologia Mecânica – Processos em Soldagem, por sempre estar disponível para solucionar minhas dúvidas.

Ao técnico de usinagem da Universidade de Taubaté, o Sr. Lamarino, pela confecção dos corpos de prova, aos técnicos da Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba, Srs. Flávio e Odilon, por sempre estarem dispostos a ajudar e solucionar problemas e a todos que me ajudaram e se dispuseram de seu tempo para que eu pudesse estar avançando com meus estudos.

RESUMO

O presente trabalho apresenta um estudo sobre a morfologia do cordão de solda, no início da soldagem, antes e depois do estado quase-estacionário ser atingido. O estado quase-estacionário é caracterizado por uma distribuição uniforme de temperatura, através do 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 termofísicas do material, alternando a transferência de calor e, por consequência, as transformações de fase na zona termicamente afetada (ZTA). Para o desenvolvimento, primeiramente foi calculado o espaço percorrido pela fonte de calor, desde a abertura do arco até atingir o estado quase-estacionário. Para garantir a velocidade constante utilizou-se o processo de soldagem por arco submerso (SAW). O material utilizado foi o aço SAE 1045, em três placas de 100 x 200 x 25,4mm. Em cada placa foram depositados dois cordões. O aporte térmico foi diferente para cada placa, variando-se a tensão e mantendo-se constante a corrente e a velocidade de soldagem. Para avaliar a morfologia do cordão e da ZTA, foram feitas macrografias e perfil de dureza. Os resultados mostram que antes do estado quase-estacionário ser atingido o material apresenta um comportamento diferente, que influenciou na penetração e na altura do cordão. A dureza do material antes do estado quase-estacionário ser atingido é maior que a dureza do material após o estado quase-estacionário. A fórmula apresentada nas literaturas mostrou-se eficiente para se determinar o início do estado quase-estacionário e pode ser usada, por exemplo, no dimensionamento das chapas de sacrifício.

Palavras-chaves: Estado quase-estacionário. Morfologia do cordão de solda. ZTA.

ABSTRACT

The present work presents a study on the morphology of the weld bead, at the outset of the welding, before and after the quasi-stationary state is reached. The quasi-stationary state is characterized by a uniform temperature distribution across the base metal to an watcher positioned on the mobile heat source. Before this state is reached, the uneven distribution of temperature influences the thermophysical properties of the material, alternating the heat transfer and, consequently, the phase transformations in the Heat affected zone (HAZ). For development, we first calculated the space traveled by the heat source, from the opening of the arc to the quasi-stationary state. To ensure constant speed, the submerged arc welding (SAW) process was used. The material used was SAE 1045 steel, in three 100 x 200 x 25.4 mm plates. Two bead were deposited on each plate. The thermal input was different for each plate, by varying the voltage and keeping the current and the welding speed constant. In order to evaluate the morphology of the cord and the HAZ, macrographs and hardness profile were made. The results show that before the quasi-stationary state is reached the material presents a different behavior, which influenced the penetration and the height of the bead. The hardness of the material before the quasi-stationary state is reached is greater than the hardness of the material after quasi-stationary state. The formula presented in the literatures proved to be efficient in determining the onset of the quasi-stationary state and can be used, for example, in the design of the sacrificial plates.

KEYWORDS: Quasi-stationary state. Morphology of the weld bead. HAZ.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação esquemática do efeito dos parâmetros de soldagem na geometria dos cordões de solda.	19
Figura 2 - Ciclo térmico na soldagem	20
Figura 3 - Representação esquemática da distribuição de temperatura no material.	20
Figura 4 - Influência do material (a esquerda) e da velocidade de soldagem (a direita) na distribuição de temperaturas.	21
Figura 5 - Representação esquemática da condução de calor 2D e 3D.....	22
Figura 6 - Esquema da Zona Termicamente Afetada	22
Figura 7 - Distribuição da temperatura máxima e formação de diferentes regiões na ZTA.....	23
Figura 8 - Diagrama esquemático das várias sub-regiões da ZTA de um aço baixa liga	23
Figura 9 - Estado quase-estacionário	25
Figura 10 - Esquema do processo de soldagem com arco submerso.	27
Figura 11- Máquina de solda do processo SAW usada para soldar os corpos de prova.....	37
Figura 12 - Estereoscópio do laboratório de metalografia do FATEC	39
Figura 13 - Representação esquemática dos pontos de medição de dureza.....	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Vantagens, limitações e aplicações principais do processo SAW.....	28
Tabela 2 - Composição química do aço SAE 1045 (em %).....	31
Tabela 3 - Propriedades Mecânicas do aço SAE 1045.....	31
Tabela 4 - Composição química do eletrodo AWS EM12K.....	37
Tabela 5 - Composição química do fluxo AWS F7P2.	38
Tabela 6 - Corpos de prova soldados com voltagem de 22 V. Aumento de 8x.....	41
Tabela 7 - Corpos de prova soldados com voltagem de 25V. Aumento de 8x.....	43
Tabela 8 - Corpos de prova soldados com voltagem de 25V. Aumento de 8x.....	44
Tabela 9 - Tabela comparativa entre altura e largura do cordão de solda e altura da ZTA.....	45
Tabela 10 - Tabela com valores de microdureza.....	46

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

°C	Graus Celsius
A	Amperes
AWS	<i>American Welding Society</i>
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
C	Carbono
Cu	Cobre
HV	<i>Highness Vickers (Dureza Vickers)</i>
Kgf	Kilograma-força
KJ	Kilo Jaulo
min	Minuto
mm	Milímetro
Mn	Manganês
MPa	Mega Pascal
P	Fósforo
s	segundos
S	Enxofre
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
SAW	<i>Submerged Arc Welding</i>
Si	Silício
V	Volts
ZTA	Zona Termicamente Afetada

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1 Soldagem	17
2.2 Energia De Soldagem	17
2.2.1 Ciclos Térmicos	19
2.2.2 Condições em Chapas Finas e Grossas	21
2.3 Zona Termicamente Afetada (Zta).....	22
2.4 Estado Quase-Estacionário	25
2.5 Arco Submerso.....	26
2.5.1 Vantagens e Limitações do Processo SAW	28
2.5.2 Variáveis do Processo SAW.....	29
2.6 O Aço SAE 1045	30
2.6.1 Propriedades Mecânicas do Aço 1045.....	31
2.7 Metalografia.....	32
2.7.1 Macrografia	32
2.8 Microdureza Vickers	33
3 METODOLOGIA	34
3.1 Classificação Dos Métodos De Pesquisa	34
3.2 De Acordo Com A Abordagem	34
3.3 De Acordo Com O Objetivo	34
3.4 De Acordo Com Os Procedimentos Técnicos	35
4 DESENVOLVIMENTO	36
4.1 Material.....	36
4.2 Soldagem	36
4.2.1 Equipamento de Soldagem	36
4.2.2 Consumíveis utilizados.....	37
4.3 Cálculo Do Espaço Percorrido Até O Início Do Estado Quase-Estacionário.....	38
4.4 Preparação Das Amostras	38
4.5 Metalografia.....	39
4.6 Ensaio De Microdureza Vickers	39
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	41
5.1 Macrografia	41
4.2 Microdureza Vickers	45
6 CONCLUSÃO	47
REFERÊNCIAS.....	48

1 INTRODUÇÃO

É de conhecimento de pessoas envolvidas na área da soldagem que o início e o final da solda 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.

Para se chegar a essas características finais, é comum utilizar no início e no final da solda chapas de sacrifício que serão descartadas ao final da solda para que descontinuidades, como poros, falta de penetração, mordeduras, etc., provenientes da abertura e extinção do arco elétrico não estejam presentes na solda final.

A técnica de emprego de chapas de sacrifício é totalmente leiga, empregando apenas retalhos de materiais que iriam para descarte e assim não usando tamanhos ideais, para garantir que a solda estará no regime quase-estacionário quando a tocha de soldagem passar da chapa de sacrifício para o material a ser soldado.

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

Com a abertura do arco, há um aumento da corrente elétrica, com isso há um aumento do aporte térmico, causando um aumento da taxa de resfriamento, onde pode estar provocando uma formação de fases frágeis, no caso de aços.

Em normas para ensaios destrutivos, como no caso das normas AISI e SAE, é necessário o descarte do início e do final da solda. É normatizado que se descarte 25 mm do início do cordão de solda, porém dependendo do tipo de material e a velocidade de soldagem, não fica garantido que a soldagem entrou no estado quase-estacionário antes dos 25 mm que serão descartados por norma, podendo gerar falsos resultados ou resultados mascarados. O correto seria calcular a distância percorrida até o material entrar no estado quase-estacionário e cortar os corpos de prova depois do mesmo.

O estado quase-estacionário é a distância percorrida até o material ter uma distribuição de temperatura homogênea para um observador situado sobre uma fonte móvel.

No regime quase-estacionário a distribuição de temperatura e a geometria do cordão de solda não mudam com o passar do tempo.

Com o cálculo do estado quase-estacionário feito pôde-se comprovar a diferença entre o início do cordão de solda e após o corpo de prova entrar no regime quase-estacionário e comprovar que o cálculo teórico está correto e deve-se descartar o material antes da chapa entrar no regime quase-estacionário.

Na revisão bibliográfica serão apresentados tópicos relevantes do entendimento do assunto abordado e ao desenvolvimento trabalho.

Para o desenvolvimento, foi utilizado o processo de soldagem por arco submerso, a escolha desse processo foi devido a sua aplicabilidade industrial, pois se trata de um processo automático de alta produtividade, pois alia alta taxa de deposição, velocidade constante e uma solda final de alta qualidade. O material utilizado foi o aço SAE 1045 de 200 mm x 100mm e 25,4mm de espessura. Para analisar a morfologia do cordão foi feita macrografia e foram feitos ensaios de microdureza Vickers na ZTA e no metal de solda.

Os resultados mostraram que as fórmulas descritas na literatura são eficazes para determinar o início do estado quase-estacionário e que há grande diferença entre ambas as partes da solda, antes e após entrar no regime quase-estacionário, tendo o material apresentado um comportamento diferente que influenciou na morfologia do cordão e na dureza, maior antes do estado quase-estacionário ser atingido.

Com isso, conclui-se que antes de ser atingido o regime quase-estacionário o material deve ser descartado, pois a soldagem não é uniforme, tendo uma geometria do cordão não homogênea e uma distribuição de temperatura heterogênea. O cálculo do regime quase-estacionário acaba sendo válido para a fabricação de chapas de sacrifício tendo uma qualidade mais técnica, garantindo uma solda de qualidade. Ainda se verificou que o aporte térmico influencia nas propriedades mecânicas, por ter uma diferença na extensão da ZTA e morfologia do cordão de solda.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Soldagem

Segundo Nunes; Kreischer (2010), o termo soldagem abrange um grande número de diferentes processos utilizados na fabricação e recuperação de peças, equipamentos e estruturas metálicas.

A soldagem é um dos métodos de fabricação mais empregados nos dias de hoje. Na soldagem duas peças são unidas dando continuidade metálica como se fosse uma única. Dessa forma essa técnica é exaustivamente utilizada na indústria em geral (NUNES; KREISCHER, 2010).

Segundo a Modenesi (2012), a soldagem é a operação que visa obter a coalescência localizada produzida pelo aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem aplicação de pressão e de metal de adição.

Na soldagem quanto melhor a qualidade da junta soldada mais as características e propriedades se aproximam do metal de base. Aliás, na soldagem é comum chamar o material das peças de metal de base e o material adicionado à junta soldada de metal de adição (NUNES; KREISCHER, 2010).

2.2 Energia De Soldagem

Energia de soldagem ou aporte térmico é a quantidade de calor em um ciclo térmico. O aporte de calor influencia diretamente o tempo de resfriamento e, portanto, a microestrutura da solda (FONSECA *et al.*, 2004)

Segundo Modenesi (2012) o *Heat Input* ou aporte térmico, é uma variável que depende de tensão, corrente e velocidade de soldagem, sobre a largura da Zona Termicamente Afetada (ZTA) que é a porção do material que sofreu com as transformações de temperatura e onde está a porção mais crítica da junta da soldada.

Na microestrutura da zona de fusão Fonseca *et al.* (2004) com menores taxas de aporte térmico observa-se a presença de menor de ferrita pró-eutetóide e maior teor de ferrita acicular. Já com maiores taxas de aporte térmico, maiores teores de ferrita pró-eutetóide e menores teores de ferrita acicular.

Com relação ao ciclo térmico, quanto maior for a energia de soldagem mais grosseira será a granulação desta região e maior a sua extensão (AZEVEDO, 2002).

Segundo Quites (2008), a energia de soldagem, pode ser calculada pela Fórmula 1.

$$E = \frac{0,06 \cdot U \cdot I}{V} \quad (1)$$

Onde,

E = energia fornecida (kJ/cm)

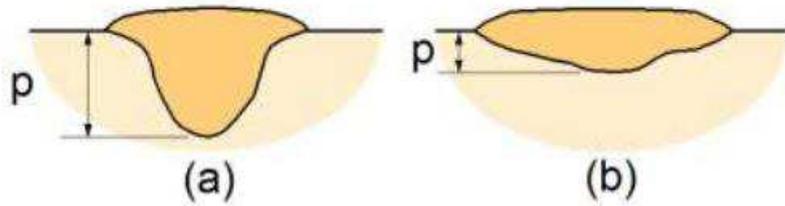
U = tensão do arco (V)

I = corrente efetiva de soldagem (A)

V = velocidade de soldagem (cm/min)

Segundo Modenesi (2012), 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 e o rendimento térmico do processo. 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, Figura 1 apresenta 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) 800 A, 26 V e 12 mm/s e (b) 125 A, 26 V e 1,7 mm/s.

Figura 1 - Representação esquemática do efeito dos parâmetros de soldagem na geometria dos cordões de solda.



Fonte: Modenesi, 2013.

Segundo Quites (2008), o fluxo térmico é a transferência de calor que ocorre entre duas regiões de um material ou entre duas substâncias em contato, sempre que houver uma diferença de temperatura.

Gradiente de temperatura, como descrito por Quites (2008), é uma diferença de temperatura entre dois pontos estabelecidos a uma unidade de distância estabelecida.

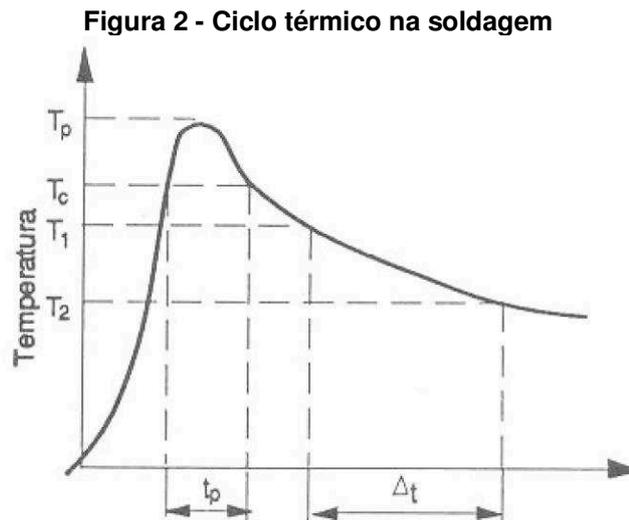
Modenesi (2013) descreve que na maioria dos processos de soldagem, a junta precisa ser aquecida até uma temperatura adequada. Na soldagem por fusão, particularmente, trabalha-se com fontes de calor de elevada temperatura (1.000° a 20.000° C), concentradas e, portanto, de elevada intensidade, as quais, ao serem deslocadas ao longo da junta, resultam na formação da solda pela fusão e solidificação localizadas da junta.

Esta transferência de calor da fonte para a junta, segundo Modenesi (2013), 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.

2.2.1 Ciclos Térmicos

Quando o arco voltaico de soldagem passa ao longo da junta, a temperatura de qualquer ponto próximo se eleva e depois baixa mais lentamente até o valor inicial, segundo Quites (2008) isso é chamado de ciclo térmico.

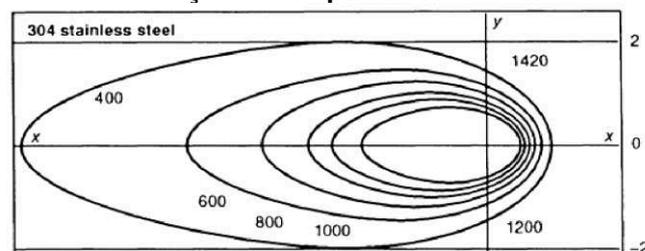
Conforme Modenesi (2013), cada ponto é submetido a um ciclo térmico particular que depende, entre outros fatores, da localização deste ponto em relação à solda. Os principais parâmetros que descrevem o ciclo térmico são: temperatura de pico (temperatura máxima atingida em um dado ponto), tempo de permanência acima de uma temperatura crítica e velocidade de resfriamento.



Fonte: Wainer (2004)

De acordo com o Metals Handbook, (1993), a determinação dos ciclos térmicos permite a obtenção de linha isotérmicas, isto é, o conjunto dos pontos do sólido com a mesma temperatura em um dado instante do processo.

Figura 3 - Representação esquemática da distribuição de temperatura no material

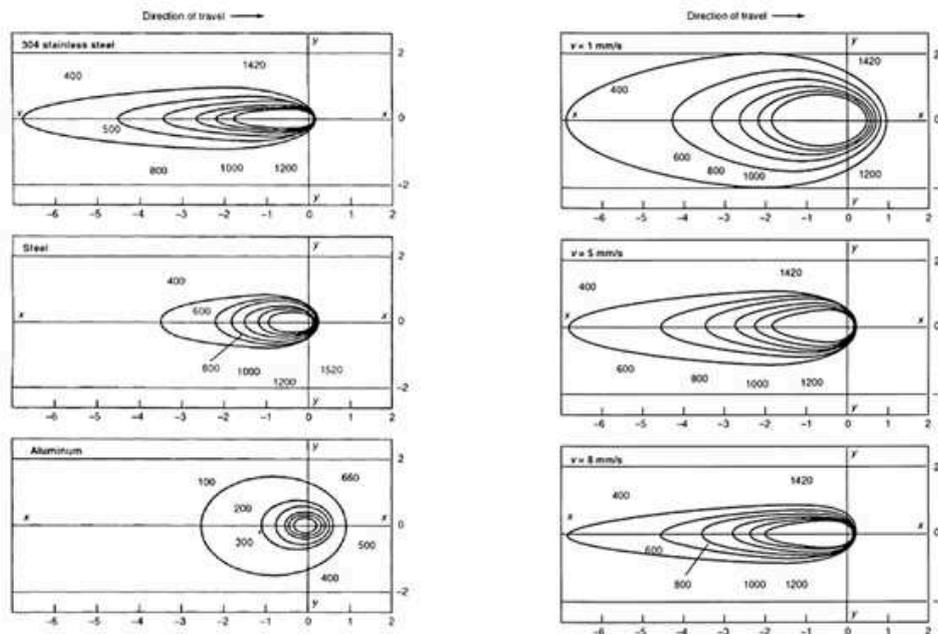


Fonte: ASM Metals Handbook (1993)

Modenesi (2013) descreve que as diversas variáveis de uma operação de soldagem podem afetar o fluxo de calor na peça e, portanto, os ciclos térmicos

associados, como: condutividade térmica da peça e velocidade de soldagem (Figura 4), espessura da junta e geometria da junta, energia de soldagem e temperatura de pré-aquecimento.

Figura 4 - Influência do material (a esquerda) e da velocidade de soldagem (a direita) na distribuição de temperaturas.



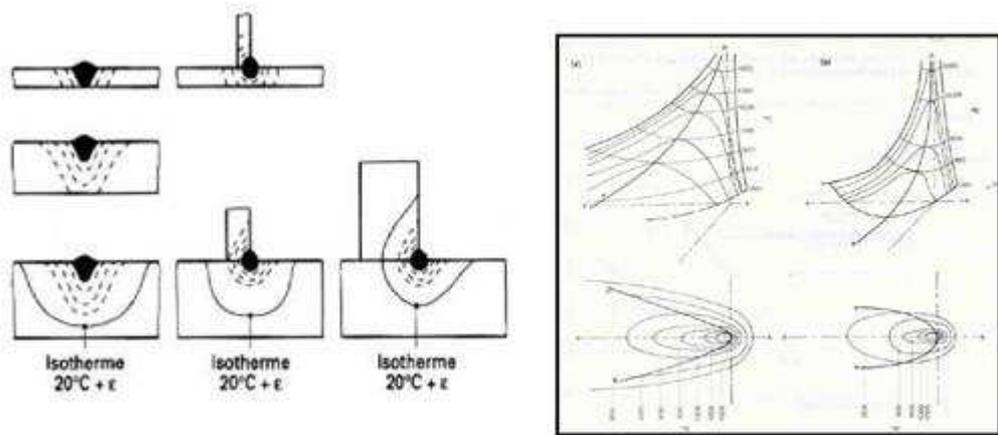
Fonte: Metals Handbook (1993)

2.2.2 Condições em Chapas Finas e Grossas

Segundo Quites (2008), costuma-se classificar as placas soldadas em finas e grossas. Placas finas são aquelas em que a espessura influi no ciclo térmico e o fluxo de calor ocorre em duas direções, não considerando a espessura. Nas chapas grossas, o fluxo de calor se dá em três direções.

Segundo Wainer *et al.* (2004) o problema para chapas grossas consiste em encontrar a solução da equação de Fourier para o caso tridimensional. Para as chapas finas também se admite o regime quase-estacionário, considerando-se que não há fluxo na direção da espessura da chapa, caracterizando um fluxo bidirecional, com a fonte de calor do tipo linear, conforme ilustrado pela Figura 5.

Figura 5 - Representação esquemática da condução de calor 2D e 3D

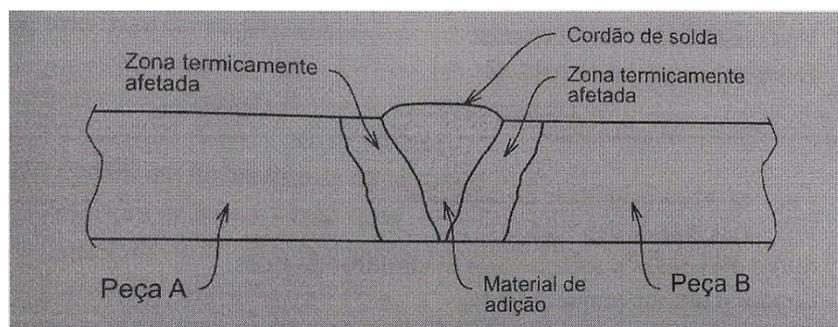


Fonte: Wainer *et al* (2004)

2.3 Zona Termicamente Afetada (ZTA)

Conforme relata Wainer *et al.* (2004), a ZTA é uma parte da junta soldada que não foi fundida, porém foi submetida a altos picos de temperaturas, suficientes para produzir mudanças na microestrutura do material durante a solidificação do cordão de solda. É considerada por muitas literaturas a região mais crítica da solda. As características microestruturais e as propriedades mecânicas da ZTA são em função da composição química e espessura do metal base, tipo de resfriamento da junta e do aporte térmico aplicado. A Figura 6 mostra a localização da ZTA na peça.

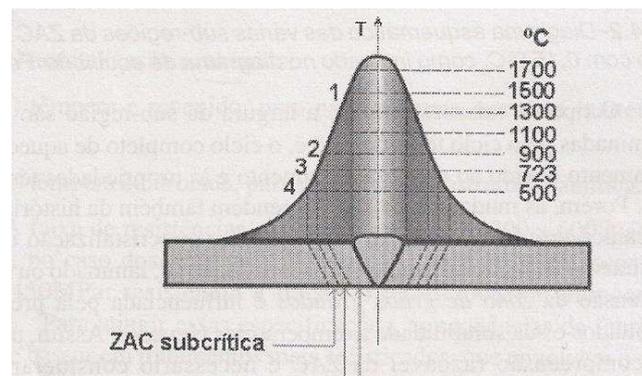
Figura 6 - Esquema da Zona Termicamente Afetada



Fonte - Nunes; Kreischer, 2010

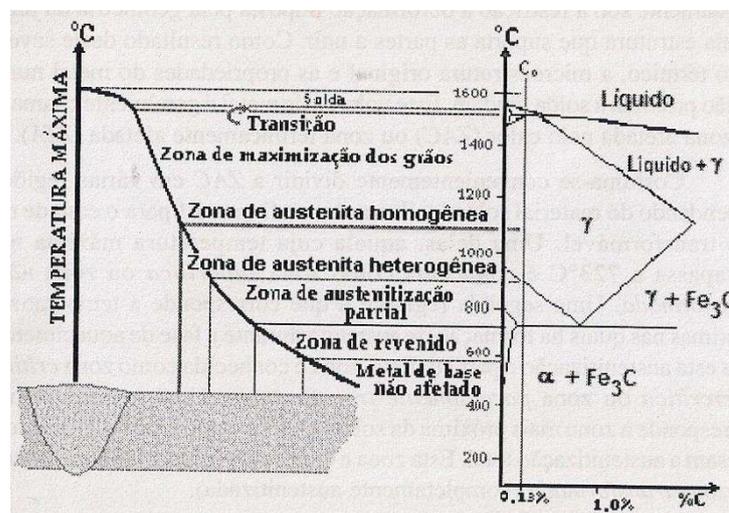
Segundo Quites (2008), é habitual dividir a ZTA em três regiões, conforme mostra a Figura 7. A zona que não ultrapassa a temperatura de 723°C é conhecido com zona subcrítica ou zona não-transformada, essa região apresenta uma pequena esfeirodização da perlita. Acima dessa temperatura até a temperatura máxima da formação da austenita, há uma segunda zona comumente chamada de zona crítica, intercrítica ou zona parcialmente transformada, onde essa austenita pode ser transformada em martensita em função de sua velocidade de resfriamento. Na terceira região, onde está localizada mais próxima à solda, sofre as maiores temperaturas, causando austenitização total, é chamada de zona supercrítica ou zona transformada.

Figura 7 - Distribuição da temperatura máxima e formação de diferentes regiões na ZTA



Fonte – QUITES, A. (2008)

Figura 8 - Diagrama esquemático das várias sub-regiões da ZTA de um aço baixa liga



Fonte – QUITES, A. (2008)

Essas zonas ainda podem ser divididas em sub-regiões, conforme mostra a Figura 8.

Para a determinação da largura da ZTA, é comumente usada a Fórmula 2 descrita por Adams.

$$\frac{1}{T_p - T_0} = \frac{4.13\rho C_p t Y}{H_l} + \frac{1}{T_m - T_0} \quad (2)$$

Onde: Y = largura da ZTA (mm).

T_p = Temperatura de Pico ($^{\circ}\text{C}$).

T_0 = Temperatura inicial do metal de base ($^{\circ}\text{C}$)

T_m = Temperatura de fusão ($^{\circ}\text{C}$)

ρC_p = calor específico volumétrico ($\text{J}/\text{mm}^3 \cdot ^{\circ}\text{C}$)

t = espessura (mm)

H_l = Energia de Soldagem (J/mm)

Segundo Nunes; Kreisler (2010), a zona termicamente afetada apresenta em geral características e propriedades diferentes do metal de base pelas seguintes razões:

- a) O metal de adição quase sempre é ligeiramente diferente do metal de base.
- b) A fusão e a solidificação introduzem tensões.
- c) Ocorrem alterações na microestrutura do material de base.

Na zona termicamente afetada pode ocorrer aumento da dureza e de resistência mecânica, devido às precipitações de fases; pode ocorrer ainda a formação de carbonetos que precipitam nos contornos de grãos e outras transformações nocivas às características e propriedades (NUNES; KREISLER,2010).

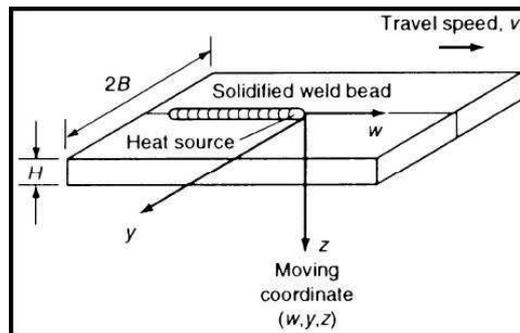
Fonseca *et al.* (2004) relata que com o aumento do aporte térmico aumenta a largura da ZTA e aumento da área da zona de fusão.

2.4 Estado Quase-Estacionário

Estado quase-estacionário, ou regime quase-estável, segundo Quides (2008) no início, 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 ilustrado pela Figura 9.

Figura 9 - Estado quase-estacionário



Fonte: Metals Handbook, Vol. 6 (1993)

Segundo Modenesi (2013), 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), 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.

Com as fórmulas (3) e (4), pode-se calcular, respectivamente, o tempo necessário para que o estado quase-estacionário e o espaço percorrido até o fim desse estado:

$$t = \frac{16 \cdot k}{v_s^2} \quad (3)$$

$$r = v_s \cdot t \quad (4)$$

Onde:

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

t = tempo (s)

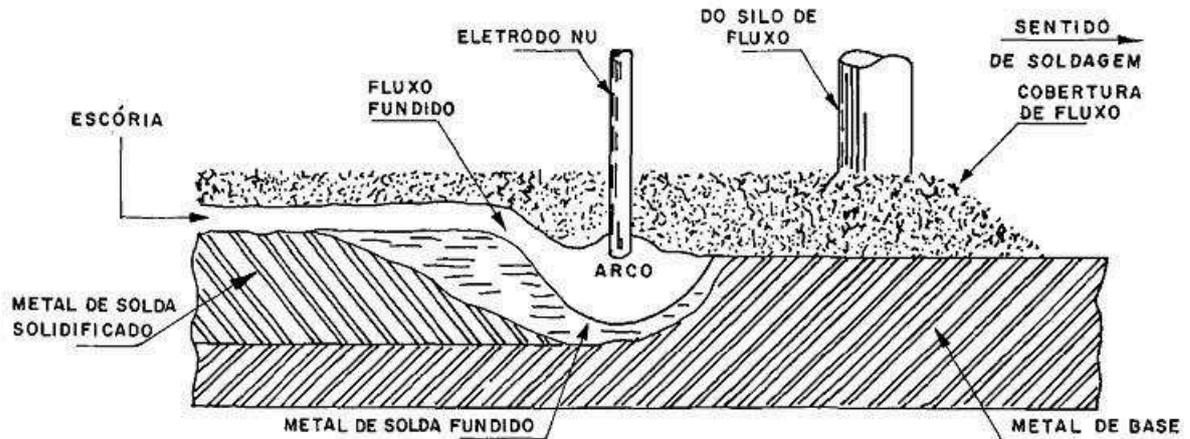
k = difusividade térmica do material (cm²/s)

v_s = velocidade de soldagem (cm/s)

2.5 Arco Submerso

Segundo Wainer *et al.* (2004) o processo de soldagem por arco submerso (SAW – Submerged Arc Welding) promove a união dos metais através da fusão destes por um arco elétrico, estabelecido entre um eletrodo metálico e a peça de trabalho, conforme mostra a Figura 10. O arco ocorre sob uma camada de material granular fusível chamada de “fluxo”, que, dentre outras funções, protege a região da solda contra a contaminação atmosférica. Por essa razão, o arco elétrico não é visível e não há ocorrência de respingos ou fumos durante o processo de soldagem.

Figura 10 - Esquema do processo de soldagem com arco submerso.



Fonte: Wainer et al., 2004

O processo permite alto grau de automatização, sendo o arame-eletrodo continuamente alimentado no cabeçote ou pistola de soldagem conferindo a esse tipo de processo rapidez e economia, quando comparado aos demais processos de soldagem a arco elétrico (WAINER et al., 2004).

Segundo Marques *et al.* (2009) o processo de soldagem por arco submerso é um processo que a união entre os metais é obtida pelo aquecimento e fusão destes por um arco elétrico entre um eletrodo metálico nu e a peça de trabalho. O arco trabalha sob uma camada de fluxo, protegendo-o da contaminação da atmosfera.

Wainer *et al.* (2004) nos diz que o processo de soldagem com arco submerso pode ser semi ou totalmente automático, e em ambos os casos o eletrodo é alimentado mecanicamente a partir de um rolo para a pistola ou cabeçote de soldagem, à medida que vai sendo fundido ou depositado. O fluxo é alimentado independente, caindo por gravidade imediatamente à frente do eletrodo ou de forma concêntrica em relação a ele. Assim, tanto o fluxo como o eletrodo podem ser alterados a qualquer momento.

Outra característica da soldagem ao arco submerso observado por Wainer *et al.* (2004), está no seu elevado rendimento, pois praticamente não há perdas de metal por projeção. Permite ainda o uso de correntes elevadas de intensidades acima de 2000 A – que, aliado às altas densidades de corrente encontradas, 60 a 100 A/mm² – oferecem ao processo elevada taxa de deposição, muitas vezes

superiores às encontradas em outros processos de soldagem. Essas características tornam a soldagem com arco submerso um processo econômico e rápido. Em média, se gasta em arco submerso 1/3 do tempo de soldagem requisitado por eletrodos revestidos.

Segundo Marques *et al.* (2009), o processo SAW tem altas aplicações industriais. Soldas de alta qualidade, altas taxas de deposição, penetração profunda e adaptação à automação tornam o processo adequado para a fabricação em larga escala.

2.5.1 Vantagens e Limitações do Processo SAW

Tabela 1 - Vantagens, limitações e aplicações principais do processo SAW.

Vantagens e Limitações	Aplicações
Altas velocidades de soldagem e taxas de deposição	Soldagem de aços carbonos e ligados
Produz soldas uniformes e de bom acabamento superficial	Soldagem de níquel e suas ligas
Ausência de respingos e fumos	Soldagem de membros estruturais e tubos de grande diâmetro
Dispensa proteção contra radiação devido ao arco não visível	Soldagem em fabricação de peças pesadas de aço
Facilmente mecanizado	Recobrimento, manutenção e reparo
Elevada produtividade	
Soldagem limitada às posições plana e filete horizontal	
Aporte térmico elevado pode prejudicar propriedades da junta em alguns casos	
Necessário retirar a escória entre passos	

Fonte - MODENESI; MARQUES, 2006. – Adaptado pelo autor

As vantagens desse processo como descreve Wainer *et al.* (2004) são altas velocidades de soldagem, altas taxas de deposição, boa integridade do metal de solda, processo de fácil uso, melhor ambiente de trabalho e maior segurança devido ao arco está protegido pelo fluxo. Suas limitações são soldagem somente nas

posições plana e horizontal e normalmente limitado a juntas em linha, a seguir a Tabela 1 contendo as vantagens e limitações do processo SAW.

Segundo Marques *et al.* (2009), sua principal limitação do arco submerso é sua posição de soldagem. Como o processo normalmente utiliza alta intensidade de corrente, o volume da poça de fusão é grande e o metal líquido tende a escorrer para fora da junta. Por isso, a soldagem fica limitada a posição plana e horizontal.

Segundo Marques *et al.* (2008) o processo SAW é usado para soldagem de peças com espessuras de 1,5 mm até chapas com 300 mm de espessura, porém não é aplicável para todos os metais e ligas. Tem grande utilização em aços carbono, aços estruturais de baixa liga e aços inoxidáveis e ainda alguns aços estruturais de alta resistência, aços de alto carbono e ligas de níquel.

2.5.2 Variáveis do Processo SAW

A corrente elétrica determina a taxa de deposição, a profundidade de penetração da poça de fusão no metal de base e a quantidade de metal de base fundido (WAINER *et al.*, 2004).

A tensão do arco influencia a forma da seção transversal do cordão e a aparência externa da solda. Com o aumento da tensão, tem-se um cordão mais plano e mais largo, um aumento do consumo de fluxo, aumento da resistência à porosidade e aumento do teor de liga proveniente do fluxo.

Como aumento do diâmetro do eletrodo aumenta a largura do cordão e diminui a densidade da corrente, a penetração e a taxa de deposição. Com um eletrodo mais grosso, aumenta-se a capacidade de suportar corrente, podendo-se usar maiores intensidades e obter-se taxas mais elevadas (WAINER *et al.*, 2004).

A velocidade de soldagem controla o tamanho do cordão e a penetração (WAINER *et al.*, 2004).

2.6 O Aço SAE 1045

Conforme Chiaverini (2004), pela grande variedade de tipos de aço, sistemas de classificações foram criados.

Os grupos em que os aços são classificados, segundo Chiaverini (2004), como:

- a) composição, como aços-carbonos e aços-liga;
- b) processo de acabamento, como aços laminados a quente ou aços laminados a frio;
- c) forma do produto acabado, como barras, chapas grossas, chapas finas, tiras, tubos ou perfis estruturais.

Há ulteriormente subdivisões desses grupos, como aços carbonos de baixo, médio ou alto teor de carbono. Os aços-ligas são frequentemente classificados de acordo com o principal, ou com os principais elementos de liga presentes (CHIAVERINI, 2004).

No Brasil, segundo Chiaverini (2004), a norma utilizada é baseada na norma SAE (Society of Automotive Engineers) e AISI (American Iron and Steel Institute). Essas normas consideram a composição química dos aços.

Conforme Chiaverini (2004), na norma SAE os dois últimos dígitos correspondem ao teor de carbono, no caso do Aço SAE 1045 significa aço-carbono com 0,45% de carbono. Na norma SAE, os dois primeiros dígitos diferenciam os tipos de aço-carbono, pela presença ou somente de carbono como principal elemento de liga ou de outros elementos de liga, como níquel, cromo, etc., além de carbono (CHIAVERINI, 2004).

Assim, quando os dois primeiros algarismos são 10, os aços são simplesmente ao carbono; quando são 11, os aços são de usinagem fácil com alto teor de enxofre; quando são 40, os aços são ao molibdênio, com 0,25% de molibdênio em média e assim em seguida (CHIAVERINI, 2004).

De acordo com a norma NBR NM 87/2000, que aborda a designação e composição química dos aços carbonos e ligados para construção mecânica, o aço SAE 1045 deve apresentar a composição química conforme a tabela 2.

Tabela 2 - Composição química do aço SAE 1045 (em %)

C	Mn	P(máx.)	S(máx.)	Si
0,43 – 0,50	0,60 – 0,90	0,04	0,05	0,10 – 0,60

Fonte – NBR NM 87/2000 – Adaptado pelo autor

Segundo a NBR NM 172/2000 o aço SAE 1045 é classificado como aço para construção mecânica, ao carbono e especial. Esses aços contêm como característica principal a sua aplicação na fabricação de peças ou componentes mecânicos, utilizados geralmente após tratamento térmico. A produção desse aço é feita, dependendo de sua finalidade, com rigorosos controles quanto à qualidade de superfície, tolerâncias dimensionais e condições metalúrgicas, sendo designados e classificados pela norma específica.

Os aços SAE 1045 são classificados como especial pelas exigências referentes às propriedades de ensaio de impacto no estado temperado e revenido, conforme a norma NBR NM 172/2000.

2.6.1 Propriedades Mecânicas do Aço 1045

Segundo Azevedo (2002), o aço SAE 1045, dentre outras aplicações, são empregados nas refinarias da indústria de petróleo e gás onde existe um ambiente agressivo, podendo causar desgastes nos devido à exposição a esse ambiente.

Devido ao aço ABNT 1045 apresentar entre 0,43 a 0,50% de carbono, quando submetido a ciclos térmicos de soldagem desenvolve elevada dureza na zona afetada pelo calor (ZAC) (também conhecido como zona termicamente afetada ZTA) e apresenta baixa resistência ao revenimento (AZEVEDO, 2002), conforme mostra a tabela 3.

Tabela 3 - Propriedades Mecânicas do aço SAE 1045

Temperatura de Revenido °C	Limite de resistência à tração (MPa)	Alongamento em 50mm (%)	Estricção (%)	Dureza Brinell (HB)
205	1132	9	33	363
260	1111	11	35	352
315	1070	9	39	341
370	1029	15	43	331
425	967	8	47	311
480	906	18	50	293
540	823	20	52	277
595	768	22	55	255
650	720	24	57	241

Fonte – AZEVEDO (2002) – adaptado pelo autor

2.7 Metalografia

Segundo Voort (2000), a metalografia provou ser uma excepcional ferramenta metalúrgica para ambos, produção e trabalho de pesquisa. Desde que se iniciaram, os trabalhos de Scorby há 120 anos, centenas de técnicas tem sido desenvolvidas e aplicadas para quase todos os materiais possíveis.

Entre os tipos de metalografia, há a micrografia e a macrografia. Micrografia é de grande importância para a caracterização de sua composição, estrutura e as propriedades do material.

2.7.1 Macrografia

Segundo Colpaert (2008), a Macrografia é a avaliação de uma peça ou amostra metálica, após seu lixamento, polimento e atacada por um reagente. O resultado dá-se o nome de macroestrutura, com sua avaliação sendo feita a olho nu ou com auxílio de uma lupa.

A técnica de macrografia, como é dito por Colpaert (2008), consiste na escolha e localização da seção a ser estudada, preparação de uma superfície plana e polida

no lugar escolhido e por último ataca-se a amostra por um reagente químico adequado.

2.8 Microdureza Vickers

Segundo Souza (1982) esse ensaio consiste em um penetrador que é uma pirâmide de diamante de base quadrada, com um ângulo de 136° entre as faces opostas.

Como o penetrador é um diamante, ele é praticamente indeformável e como todas as impressões são semelhantes entre si, não importando o seu tamanho, a dureza Vickers (HV) é independente da carga, isso é, o número de dureza obtido é o mesmo qualquer que seja a carga usada para materiais homogêneos (SOUZA, 1982).

Como descrito por Souza (1982), a carga usada na dureza Vickers pode variar de 1 a 100 kgf. Sua forma de impressão é um losango regular, e pela média das medidas(L) das suas diagonais, tem-se, conforme a equação 5, a dureza Vickers.

$$HV = \frac{1,8544F}{d^2} \quad (5)$$

Segundo Souza (1982), na dureza Vickers fornece uma escala contínua de dureza (de HV = 5 até HV = 1000 kgf/mm²) para cada carga usada. Será necessário informar a carga usada, quando essa for muito pequena, pois, ela pode variar de uma carga para outra. Como que para se medir as diagonais precisa de uma grande precisão, existe um microscópio acoplado a máquina para a determinação das diagonais, L. Sua carga é mantida por 18 segundos, onde a carga é levemente aplicada, onde após é focalizado com o microscópio para que se determinem as diagonais.

A microdureza Vickers usa o mesmo procedimento do de dureza Vickers, conforme Souza (1982) porém produz uma impressão microscópica no corpo de prova, também se usa um penetrador de diamante e com cargas de até 1 kgf.

3. METODOLOGIA

3.1 Classificação Dos Métodos De Pesquisa

De acordo com Gil (1991), podemos definir um estudo científico como um método racional e sistemático que tem como finalidade agregar conhecimento as dificuldades a serem investigadas. Em virtude da falta de conhecimento que te credencie para a resolução de algum problema ou uma melhor esquematização das informações existentes, dá-se início a uma nova pesquisa.

Segundo Silva e Menezes (2005) várias fases definem uma pesquisa, começando pela concepção do objeto de estudo a ser abordado e finalizando com a elucidação dos resultados e conclusões.

3.2 De Acordo Com A Abordagem

De acordo com Gil (1991) após ser elucidado o objeto de análise, deve ser feito em sequencia a escolha da forma de estudo que guiará através das pesquisas, sendo essa forma de estudo sendo classificado como qualitativo ou quantitativo.

Consideramos a pesquisa como quantitativa, onde os problemas podem ser mensuráveis em busca de análises e soluções, através da utilização de técnicas estatísticas e ferramentas da qualidade (SILVA; MENEZES, 2005).

3.3 De Acordo Com O Objetivo

De acordo com os objetivos, as pesquisas podem ser classificadas em Pesquisa Exploratória, Pesquisa Descritiva e Pesquisa Explicativa (GIL, 1991).

Conforme relatado por Gil (1991) as pesquisas exploratórias têm em seu escopo permitir uma maior proximidade com o objeto de estudo e fazer o tema abordado ter uma mais simples interpretação, pois este tipo de pesquisa tende a

levantar hipóteses ou intuições, adquiridas através de levantamento bibliográfico, citações, entrevistas com pessoas que vivenciaram o tema, além de exemplos que elucidem o entendimento do leitor. Trabalhos bibliográficos e estudos de caso são muito usados nas pesquisas exploratórias, uma vez que utilizam muito a intuição do pesquisador.

A Pesquisa Descritiva tem como princípio descrever minuciosamente o objeto de estudo (população, fenômeno, problema) utilizando coleta e levantamento de dados qualitativos, mas principalmente quantitativos (GIL, 1991).

A pesquisa explicativa, por seu lado, usa-se do argumento para identificar e explicar, as causas de alguma adversidade, mostrando a realidade ao elucidar o motivo dos problemas encontrados.

3.4 De Acordo Com Os Procedimentos Técnicos

De acordo com Gil (1991), os procedimentos técnicos podem ser categorizados em:

- a) Pesquisa Bibliográfica onde essa é elaborada de acordo com bibliografias já publicadas, composto principalmente por livros e artigos científicos;
- b) Pesquisa Documental, equivalente a anterior, porém baseia-se de materiais que ainda não foram avaliados criticamente;
- c) Pesquisa Experimental, consiste em determinar meios de controle e de observação dos resultados que a variável origina.

4 DESENVOLVIMENTO

4.1 Material

O aço usado para a fabricação dos copos de prova foi o aço SAE 1045, cedido pela instituição FATEC Pindamonhangaba. Suas dimensões são de 200 mm x 100 mm com uma espessura de 25,4 mm.

4.2 Soldagem

As chapas foram soldadas pela técnica de arco submerso (*SAW*). A máquina usada esta alocada na instituição FATEC Pindamonhangaba, todos os procedimentos para as boas práticas de soldagem foram respeitadas.

Para a definição dos parâmetros, foram feitos passes de revestimento em duas chapas com as mesmas dimensões daquelas utilizadas no trabalho, para que fossem testados e escolhidos os parâmetros que proporcionassem um cordão com bom aspecto e acabamento.

Foram soldadas três chapas. Em cada uma delas foram depositados dois cordões. Cada uma das chapas foi soldada com um determinado valor de tensão, como segue: No primeiro corpo de prova, foi utilizada uma voltagem de 22V; no segundo corpo de prova, foi utilizada uma voltagem de 25V, e; no terceiro corpo de prova, foi utilizada uma voltagem de 28V. Todos os três corpos de prova foram soldados com amperagem e velocidade de soldagem constante, 400A e 280 mm/min respectivamente.

4.2.1 Equipamento de Soldagem

O equipamento utilizado nessa operação de soldagem foi a máquina de arco submerso LT-7 Trator (Figura 11) e com inversor de frequência *Power Wave 1000*,

ambos fabricados pela empresa *Lincoln Eletric* e alocados na instituição FATEC Pindamonhangaba.

Figura 11- Máquina de solda do processo SAW usada para soldar os corpos de prova



Fonte – Próprio Autor (2018)

4.2.2 Consumíveis utilizados

O arame-eletrodo utilizado na operação de soldagem a arco submerso foi o Eletrodo AWS EM12K de 3,2mm de diâmetro. Esse arame, fabricado pela empresa Lincoln Eletric tem a designação BX 865, com composição química, fornecida pelo fabricante (Tabela 4):

Tabela 4 - Composição química do eletrodo AWS EM12K

Eletrodo	C	Mn	Si	S	P	Cu
EM12K	0,06 – 0,15	1,5 – 2,0	0,25 – 0,65	0,025	0,025	0,35

Fonte – Lincoln Eletric (2018)

Arame de médio teor de manganês e baixo teor de carbono e silício em sua composição química, ampla faixa de utilização e excelentes resultados mecânicos.

O fluxo AWS F7P2, também fabricado pela empresa *Lincoln Eletric*, tem um limite mínimo de ruptura de 70 ksi, onde foram obtidas essas propriedades

mecânicas após um tratamento térmico de alívio de tensões. As propriedades mecânicas estão na tabela 5, fornecida pelo fabricante.

Tabela 5 - Composição química do fluxo AWS F7P2.

Fluxo	Limite de Ruptura		Limite de Escoamento		Alongamento (%)
	Ksi	MPa	Ksi	MPa	
F7P2	70 – 95	430 – 660	58	400	22

Fonte – Lincoln Eletric, 2018

O fluxo neutro F7P2, como descrito pela fabricante, garante uma excelente soldabilidade, uma ótima aparência do cordão e uma fácil remoção da escória.

4.3 Cálculo Do Espaço Percorrido Até O Início Do Estado Quase-Estacionário

Para determinar a distância até o início do estado quase-estacionário, para cada placa, foi utilizada as fórmulas 3 e 4, proposta por Wainer et al (2004):

$$t = \frac{16 \cdot k}{v_s^2} \quad (3)$$

$$r = v_s \cdot t \quad (4)$$

4.4 Preparação Das Amostras

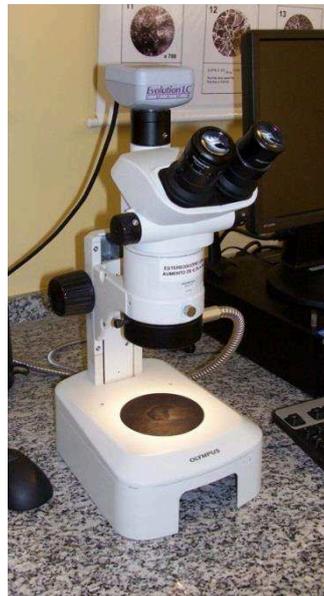
Foram feitos cortes transversais à solda no início da solda e depois da solda atingir o uma distribuição de temperatura homogênea, ou seja, atingir o estado quase-estacionário, respeitando-se as distâncias calculadas com a fórmula apresentada no item anterior.

4.5 Metalografia

Os ensaios metalográficos foram feitos no Laboratório de Metalografia da instituição FATEC Pindamonhangaba. Para a preparação foi usada uma sequência de lixas de 180, 220, 300, 400, 600 mesh. O ataque químico para a macrografia foi feito com o reagente Nital com 10% de concentração, as amostras foram deixadas submersas no reagente por cerca de 10s, assim revelando a macroestrutura do material.

Após o ataque os corpos de prova foram levados ao Estereoscópio (Figura 12) para que fossem feitas as fotografias com aumentos de 6.7x, 8x e 10x. Por meio das fotografias foram feitas as seguintes medições: extensão da ZTA; profundidade de penetração e altura do cordão.

Figura 12 - Estereoscópio do laboratório de metalografia do FATEC



Fonte – Próprio autor (2018)

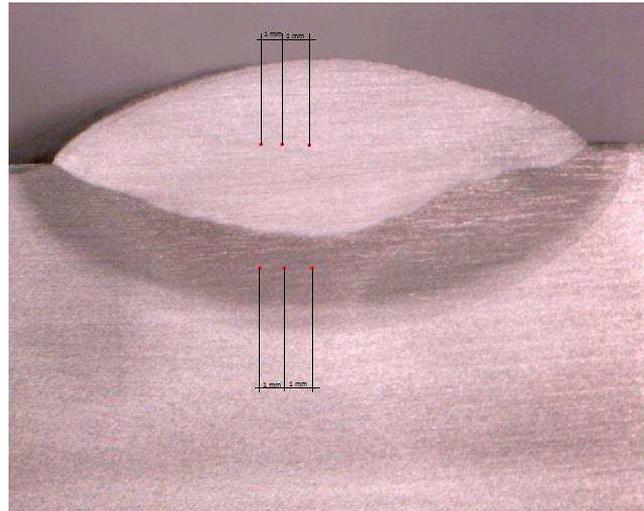
4.6 Ensaio De Microdureza Vickers

Para o ensaio de microdureza Vickers foi utilizado o microdurômetro fabricado pela empresa Mitutoyo, alocadas na instituição de ensino FATEC

Pindamonhangaba. As impressões foram realizadas sobre as amostras já atacadas e com a região da junta soldada reveladas, conforme a representação esquemática da Figura 13.

A carga utilizada foi de 1kgf, por 5 segundos, espaçadas em 1mm em cada penetração.

Figura 13 - Representação esquemática dos pontos de medição de dureza



Fonte: Autor (2018)

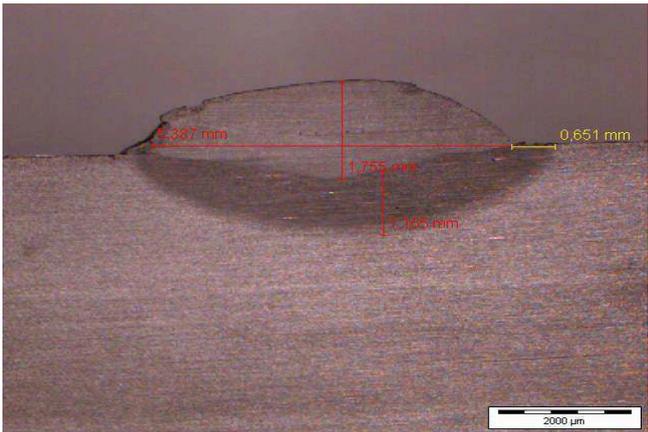
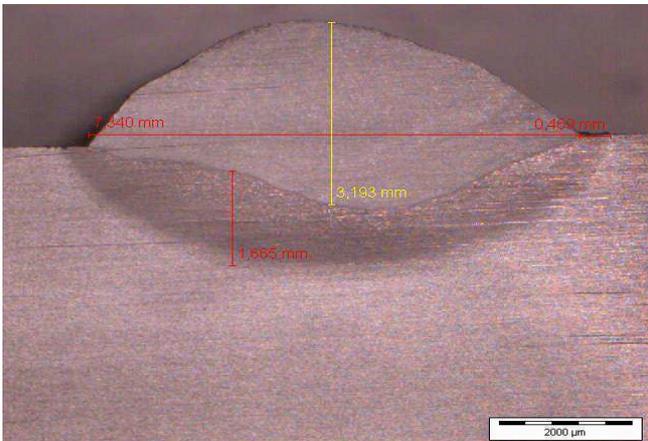
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Macrografia

Os resultados macrográficos nos mostram a grande diferença entre o início do cordão de solda e após o cordão entrar no estado quase-estacionário, como sugerem as literaturas pesquisadas.

No corpo de prova 1 (Voltagem 22V), as imagens nos mostram uma diferença grande entre os dois corpos de prova (Tabela 6).

Tabela 6 - Corpos de prova soldados com voltagem de 22 V. Aumento de 8x.

<p>Antes do estado quase-estacionário $V = 22 \text{ V}$ $I = 400 \text{ A}$ $V_s = 28 \text{ mm/min}$</p>		<p>Medidas Ext. ZTA = 1,165 mm Altura do cordão = 1,755 mm Largura do cordão = 5,387</p>
<p>Após entrar no estado quase-estacionário $V = 22 \text{ V}$ $I = 400 \text{ A}$ $V_s = 28 \text{ mm/min}$</p>		<p>Medidas Ext. ZTA = 1,665 mm Altura do cordão = 3,193 mm Largura do cordão = 7,340 mm</p>

Como pode ser notado na imagem, há uma nítida diferença entre ambas as fotos. Na imagem antes do material entrar no estado quase estacionário, a altura do cordão de solda é quase a metade da altura do cordão de solda depois de atingir o estado quase-estacionário, o que pode comprometer a resistência da solda. Também nota-se a diferença entre o metal depositado, que após entrar no estado quase estacionário é maior do que antes de entrar no estado quase-estacionário. A largura dos dois cordões de solda também é diferente uma da outra, no corpo de prova em que a temperatura já está com sua distribuição homogênea tem uma diferença de mais de 2 mm em relação ao corpo de prova do início da solda.

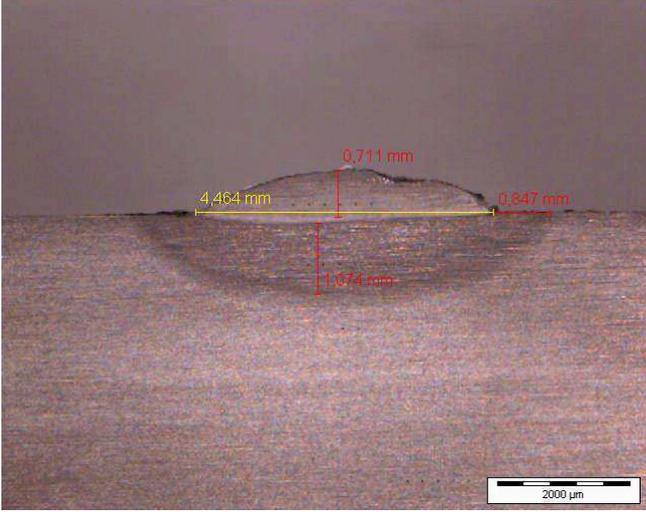
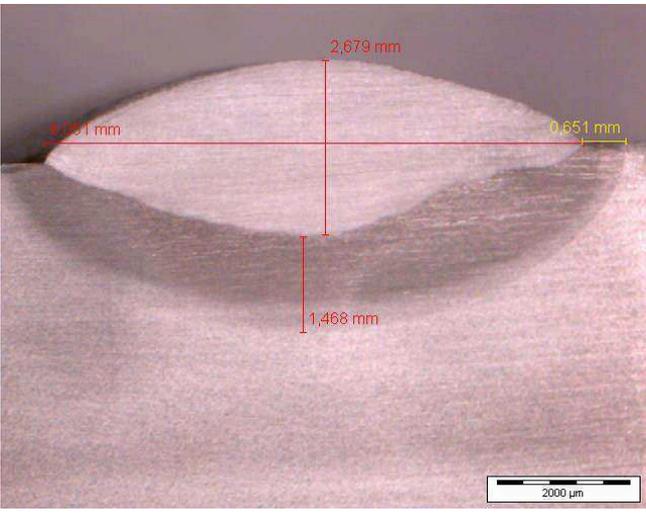
Quanto a ZTA, o corpo de prova que apresenta uma maior extensão é o corpo de prova do início da solda, pelo fato de ter atingido um maior pico de temperatura. Como consequência, apresenta um resfriamento rápido, que tende a deixar a ZTA com uma dureza elevada.

Todas essas diferenças apontadas entre o início do cordão, quando não há uma distribuição não homogênea da temperatura, e quanto a distribuição se torna homogênea (estado quase-estacionário) podem, segundo Modensei (informação verbal), ser explicadas devido as temperaturas mais elevadas que o material experimenta no início do cordão, que faz com que a transferência de calor, antes do estado quase-estacionário ser atingido, seja semelhante à transferência de calor em chapas grossas, ou seja, a temperatura elevada altera as propriedades termofísicas do material, como difusividade térmica, fazendo com que ele mude de comportamento, tendo como resultado baixa penetração, pouca deposição. Quando a distribuição de temperatura se torna uniforme, o material se comporta da maneira esperada e os valores de deposição e penetração se normalizam.

A Tabela 7 apresenta os corpos de prova com a voltagem de 25V. Nessa imagem é ainda mais nítida a diferença entre o início do cordão e após a soldagem no regime quase-estacionário. Tanto a altura do cordão de solda, como sua largura tem o dobro do tamanho do início do cordão de solda em relação ao corpo de prova após atingir o regime quase estacionário. Outro fato que chama a atenção é que a altura do cordão de solda do corpo de prova ao início da solda é pequeno (menor que 0,8 mm), porém sua ZTA é maior que o cordão de solda (mais do que 1mm). Isso pode comprovar que no início da soldagem o material

experimenta temperaturas maiores, porque segundo Quites (2008) quanto maior for a temperatura de pico atingida pelo material, durante a soldagem, maior será a extensão da zona termicamente afetada.

Tabela 7 - Corpos de prova soldados com voltagem de 25V. Aumento de 8x.

<p>Antes do estado quase estacionário $V = 25 \text{ V}$ $I = 400 \text{ A}$ $V_s = 28 \text{ mm/min}$</p>		<p>Medidas Ext. ZTA = 1,074 mm Altura do cordão = 0,711 mm Largura do cordão = 4,464</p>
<p>Antes do estado quase estacionário $V = 25 \text{ V}$ $I = 400 \text{ A}$ $V_s = 28 \text{ mm/min}$</p>		<p>Medidas Ext. ZTA = 1,468 mm Altura do cordão = 2,679 mm Largura do cordão = 8,051</p>

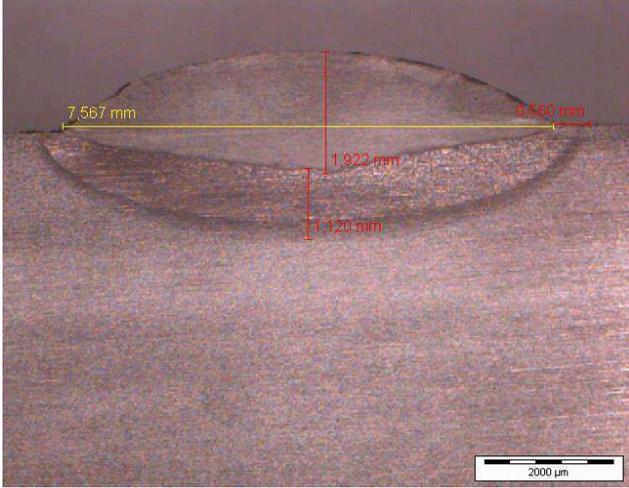
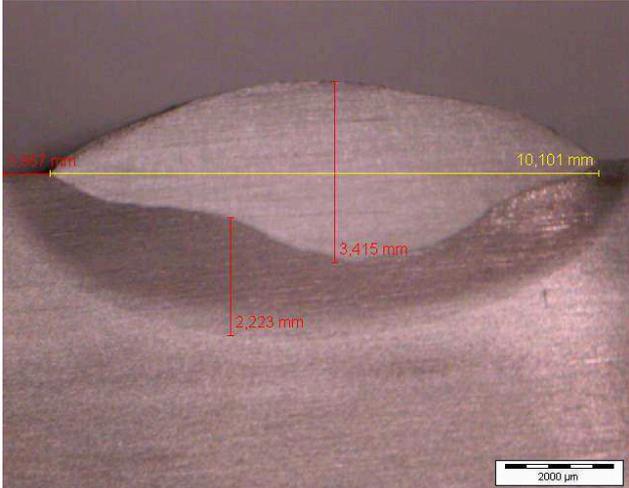
Fonte: Próprio Autor (2018)

Abaixo, os corpos de prova da soldagem feita com a voltagem de 28V (Tabela 8).

Assim como nos outros dois corpos de prova, o corpo de prova com a voltagem de 28V também apresentou uma grande variação na altura e na largura do cordão de solda. Na imagem, antes do material entrar no estado quase estacionário, notou-se que a ZTA tem praticamente a mesma altura que o cordão de solda. Porém, depois de entrar no estado quase-estacionário, o cordão de solda é maior que sua ZTA.

Vale ressaltar também que com uma maior energia de soldagem, aumentou-se proporcionalmente a largura da ZTA, a altura do cordão de solda, a extensão da ZTA, como esperado.

Tabela 8 - Corpos de prova soldados com voltagem de 25V. Aumento de 8x.

<p>Antes do estado quase estacionário $V = 28 \text{ V}$</p> <p>$I = 400 \text{ A}$</p> <p>$V_s = 28 \text{ mm/min}$</p>		<p>Medidas Ext. ZTA = 1,120 mm</p> <p>Altura do cordão = 1,922 mm</p> <p>Largura do cordão = 7,567</p>
<p>Após entrar no estado quase estacionário $V = 28 \text{ V}$</p> <p>$I = 400 \text{ A}$</p> <p>$V_s = 28 \text{ mm/min}$</p>		<p>Medidas Ext. ZTA = 2,223 mm</p> <p>Altura do cordão = 3,415 mm</p> <p>Largura do cordão = 10,101</p>

Fonte: Próprio Autor (2018)

Quanto a aparência da solda, o corpo de prova com a voltagem de 28V tem seu cordão com melhor acabamento e com um melhor visual, do que os outros CP's. Todos os outros fenômenos apontados nos outros corpos de prova se repetiram nesse, baixa penetração e baixa deposição antes do estado quase-estacionário, indicando um comportamento, com relação à transferência de calor, semelhante ao de uma chapa grossa.

Abaixo uma tabela comparando altura e largura do cordão de solda e altura da ZTA dos três cordões de solda (Tabela 9), sendo (a) ao início do cordão de solda e (b) após o cordão de solda entrar no regime quase-estacionário.

Tabela 9 - Tabela comparativa entre altura e largura do cordão de solda e altura da ZTA

	Altura do cordão de solda	Largura do cordão de solda	Altura da ZTA
23V (a)	1,755 mm	5,387 mm	1,165 mm
23V (b)	3,193 mm	7,340 mm	1,665 mm
25V (a)	0,711 mm	4,464 mm	1,074 mm
25V (b)	2,679 mm	8,051 mm	1,468 mm
28V (a)	1,922 mm	7,567 mm	1,120 mm
28V (b)	3,415 mm	10,101 mm	2,223 mm

Fonte: Próprio Autor (2018)

4.2 Microdureza Vickers

Os resultados de microdureza do metal de solda, ZTA estão descritos na tabela a seguir (Tabela 10), sendo (a) ao início do cordão de solda e (b) após o cordão de solda entrar no regime quase-estacionário.

Tabela 10 - Tabela com valores de microdureza

	Metal de Solda	ZTA
CP1 (a)	214,0	277,7
CP1 (b)	212,0	269,3
CP2 (a)	215,7	321,3
CP2 (b)	192,3	246,0
CP3 (a)	225,7	391,7
CP3 (b)	203,0	298,0

Fonte: Próprio Autor (2018)

Os resultados nos mostram que a dureza antes do corpo de prova atingir o estado quase-estacionário é maior que após o corpo de prova atingir o mesmo. Isso se deve ao grande gradiente térmico presente no momento em que se abre o arco, onde há uma enorme diferença de temperaturas entre o metal de base e o arco elétrico, que levam a um resfriamento rápido. Os valores de dureza sugerem a existência de fases frágeis no material, antes desse entrar no estado quase estacionário.

6 CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos, foi constatado que:

- a) Há uma grande influência da distribuição de temperatura no material, antes e após o regime quase-estacionário, sobre a geometria do cordão de solda.
- b) A distribuição não homogênea de temperatura, antes do estado quase-estacionário, afeta as propriedades termofísicas do material, fazendo com o fluxo de calor, da zona fundida para o metal de base, se dissipe como em uma chapa grossa, reduzindo a penetração e a deposição.
- c) A diferença nos valores de dureza medidos antes e após o regime quase-estacionário, sugere que antes do estado quase-estacionário ser atingido, o material experimenta uma temperatura de pico mais elevada, levando à uma taxa de resfriamento maior, o que resulta na formação de fase frágil.
- d) As maiores extensões de ZTA, antes do início do regime quase-estacionário, sustentam a teoria de que nesse momento, o material experimenta maiores temperaturas.
- e) As equações apresentadas nas literaturas mostraram-se eficazes na determinação de espaço percorrido até o início do estado quase-estacionário.

Sugestões para trabalhos futuros

Futuramente, pode-se fazer uma avaliação da microestrutura da junta, desde o início do cordão até que o material tenha atingido o regime quase-estacionário, em intervalos menores.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, M. R. V. **Caracterização microestrutural do metal de solda depositado por arco submerso em chapas de aço – carbono estrutural.** 2006. 118p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira, 2006.

ARAÚJO, M. R. V. *et al.* **Estudo das inclusões não metálicas formadas no metal de solda depositado por arco submerso.** In: Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 17, 2006. Foz do Iguaçu/PR.

ASSELLI, A. C.; GALLEGO, J. **Efeitos da energia de soldagem sobre a microestrutura do metal de solda depositado por arco submerso.** In: 14º Congresso nacional de estudantes de engenharia mecânica, 2007. Uberlândia/MG.

AZEVEDO, A. **Aplicação da técnica da dupla camada na soldagem do aço ABNT 1045.** 2002.108p. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de materiais) – Universidade Federal do Ceará. Departamento de Engenharia Mecânica e Produção. Fortaleza, 2002.

COLPAERT, H. **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns.** 4ª edição revista e atualizada por André Luiz V. da Costa e Silva. São Paulo: Edgard Blucher, 2004. 652p.

CHIAVERINI, V., **Aços e Ferros Fundidos.** 6ª edição, São Paulo. Editora ABM, 2004

FONSECA, M. A. *et al.* **Efeito do insumo de calor na micro estrutura da solda do aço NTU-SAR50 pelo processo a arco submerso.** Minas Gerais: *Centro*

Universitário do Leste de Minas Gerais – UNILESTE, 2004, Revista Online. Volume 2.

GIL, A. C., **Como elaborar projetos de pesquisa**. 3ª edição, São Paulo. Editora Atlas, 1991.

KOU, S. **Welding metallurgy**. 2ª edição. Madison: Wiley-Interscience, 2002. 480p.

MARQUES, P. V. *et al.* **Soldagem: fundamentos e tecnologia**. 3ª edição atualizada. Belo Horizonte: UFMG. 2009. 363 p.

MODENESI, P. J. **Introdução à Metalurgia da Soldagem**. Universidade Federal de Minas Gerais – Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. 2012. Disponível em <<http://demet.eng.ufmg.br/wp-content/uploads/2012/10/metalurgia.pdf>>. Acesso em 20/03/2018.

MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V. **Introdução aos Processos de Soldagem**. Universidade Federal de Minas Gerais - Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. 2006. Disponível em <<http://xa.yimg.com/kq/groups/24841409/1334315251/name/SOLDAGEM+UFMG.pdf>>. Acesso em 20/03/2018.

NUNES, L. P.; KREISCHER, A. T. **Introdução à metalurgia e aos materiais metálicos**. 1ª edição. Rio de Janeiro: Interciência, 2010. 376p.

QUITES, A. M. **Metalurgia na Soldagem dos aços**. 1ª edição. Florianópolis: Soldsoft, 2008.

SILVA E. L., MENEZES E. M., **Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação**. 4ª edição revisada e atualizada, Florianópolis. UFSC, 2005.

VOORT, G. F. V. **Metallography: Principles and practice**. 2ª edição. New York: ASM International, 2000. 752p.

WAINER, E. *et al.* Soldagem: processos e metalurgia. 4ª edição. São Paulo, Edgard Blucher, 2004.

ZEEMANN, A. **Energia de Soldagem**. Disponível em <<http://www.infosolda.com.br/images/Downloads/Artigos/metall/energia-de-soldagem.pdf>>. Acesso em 05/03/2018.