

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

INGRID SILVA DINIZ

**ESTUDO DA SOLDAGEM A ARCO SUBMERSO SOB DIFERENTES CONDIÇÕES
DE CORRENTE APLICADA A UM AÇO COM MÉDIO TEOR DE CARBONO**

BELO HORIZONTE

2013

INGRID SILVA DINIZ

**ESTUDO DA SOLDAGEM A ARCO SUBMERSO SOB DIFERENTES CONDIÇÕES
DE CORRENTE APLICADA A UM AÇO COM MÉDIO TEOR DE CARBONO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção de título de bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Joel Romano Brandão

Co-orientadora: Maria Celeste M. de S. Costa

BELO HORIZONTE

2013

INGRID SILVA DINIZ

**ESTUDO DA SOLDAGEM A ARCO SUBMERSO SOB DIFERENTES CONDIÇÕES
DE CORRENTE APLICADA A UM AÇO COM MÉDIO TEOR DE CARBONO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção de título de bacharel em Engenharia de Materiais

Aprovado em:

BANCA EXAMINADORA

Orientador: Prof. Joel Romano Brandão

Co-orientadora: Maria Celeste M. de S. Costa

Prof. Dr. Elaine Carballo S. Corrêa

AGRADECIMENTOS

Aos Profs. Joel Romano Brandão, Maria Celeste M. de S. Costa e Elaine Carballo S. Corrêa, por terem se disponibilizado na orientação e auxiliado sempre que preciso na elaboração desse trabalho.

Aos meus pais e irmã, por me apoiarem nas escolhas que tenho feito e sempre me incentivarem.

Aos meus avós, Damores e Geraldo pela preocupação e orações..

“I’ll never say never, I’ll fight to forever”

(Bieber, J.; 2010)

RESUMO

A soldagem a arco submerso surgiu no período da Segunda Guerra Mundial, devido às necessidades produtivas da época, pois era um processo rápido (semi-mecanizado) e que conseguia atender a produção de navios e equipamentos pesados. Desde então este processo tem sido aplicado em diversos setores da indústria e por isso tem recebido investimentos para cada vez mais melhorar a performance do equipamento. A soldagem a arco submerso envolve diversos parâmetros de soldagem, sendo que fixando alguns deles e alterando outros pode-se gerar modificações na estrutura e propriedades na junta soldada. Com isso, o objetivo do trabalho é verificar as variações microestruturais, principalmente na zona termicamente afetada da solda, que é a região que sofre a maior influência do ciclo térmico que acontece nos processos de soldagem.

Palavras-chave: Soldagem. Microestrutura. Aço 1045.

ABSTRACT

The submerged arc welding emerged during the Second World War, due to the production needs of the time, because it was a quick process (semi-mechanized) and could meet the production of ships and heavy equipment. Since this process has been applied in many industry sectors and therefore has received investments to increasingly improve the performance of the equipment. The submerged arc welding involves various welding parameters, and setting some of them and changing others can generate changes in the structure and properties of the welded joint. Thus, the objective of this work is to verify microstructural variations, especially in the heat affected zone of the weld, which is the region that suffers the greatest influence of the thermal cycle that happens in welding processes.

Keywords: Welding. Microstructure. 1045 steel.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Formação de uma solda.....	18
Figura 2	Representação esquemática da solda por fusão em a) e macrografia em b).	18
Figura 3	Soldagem por pressão.....	20
Figura 4	Esquema do processo de soldagem a arco submerso.....	23
Figura 5	Aspectos dos grãos de fluxo aglomerado.....	25
Figura 6	Aspectos dos grãos de fluxo fundido.....	26
Figura 7	Par arame/fluxo utilizados na soldagem a arco submerso.....	27
Figura 8	Exemplo 1 de classificação do sistema arame/fluxo.....	28
Figura 9	Exemplo 2 de classificação do sistema arame/fluxo.....	28
Figura 10	Representação esquemática dos componentes básicos do equipamento de soldagem a arco submerso.....	29
Figura 11	Formação de trincas no cordão de solda em forma de chapéu, devido a altas tensões.....	32
Figura 12	Efeito da polaridade do eletrodo sobre o cordão de solda, mantidos constantes os demais parâmetros.....	33
Figura 13	Caminho do fluxo de calor em juntas de tipo e ângulo.....	36
Figura 14	Zonas de uma junta soldada.....	36
Figura 15	Fluxograma da parte experimental.....	38
Figura 16	Materiais utilizados no lixamento a) lixadeira politriz b) materiais para limpeza e secagem.....	40
Figura 17	Materiais utilizados no ataque químico.....	40
Figura 18	Representação da estrutura do SAE 1045 no seu estado inicial a) aumento de 200x b) aumento de 400x.....	41
Figura 19	Corpo de prova antes e depois do lixamento.....	41
Figura 20	Máquina de soldagem a arco submerso utilizada.....	42
Figura 21	Corpos de prova soldados a) chapas enumeradas de 1-9 b) chapas enumeradas de 10-18.....	43
Figura 22	a) representação da máquina de corte e b) algumas peças já cortadas.....	44
Figura 23	Identificação das regiões que sofreram variações térmicas no CP n° 15.....	45
Figura 24	Aparelho de microdureza HMV-2, marca SHIMADZU.....	47
Figura 25	Identificação dos pontos a serem medidos microdureza.....	47

Figura 26	Corpos de prova soldados e atacados por Nital 5%	48
Figura 27	Influência da intensidade da corrente sob a largura do cordão.....	54
Figura 28	Influência da intensidade da corrente sob a penetração do cordão.....	54
Figura 29	Influência da intensidade da corrente sob o reforço do cordão.....	55
Figura 30	Influência da intensidade da corrente na microdureza da ZF.....	55
Figura 31	Influência da intensidade da corrente na microdureza média dos CP's na ZTA.....	56
Figura 32	Influência da intensidade da corrente na microdureza do MB.....	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Histórico da soldagem.....	16
Tabela 2	Principais processos de soldagem por fusão e suas características.....	19
Tabela 3	Relação entre diâmetro e a corrente recomendada.....	32
Tabela 4	Composição do aço SAE 1045 segundo especificação ABNT.....	39
Tabela 5	Valores dos parâmetros fixados.....	42
Tabela 6	Dados dos parâmetros de soldagem.....	46
Tabela 7	Resultados do aspecto do cordão.....	51
Tabela 8	Resultados da microdureza do material de base.....	52
Tabela 9	Resultados da microdureza dos CP's já soldados.....	52

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AWS	<i>Structural Welding Code</i>
CCPR	Corrente contínua de polaridade reversa
CP's	Corpos de prova
DBCP	Distância bico de contato/peça
SAW	Soldagem a arco submerso
ZTA	Zona termicamente afetada
MB	Metal de base
ZF	Zona fundida

SUMÁRIO

1	Introdução	13
2	Objetivos	14
3	Revisão Bibliográfica	15
3.1	Histórico da Soldagem	15
3.2	Soldagem: O que é e quais são os tipos	17
3.3	Soldagem a Arco Submerso	20
3.3.1	Vantagens do Processo	20
3.3.2	Desvantagens do Processo	21
3.3.3	Aplicações do Processo SAW.....	22
3.3.4	Características Gerais do Processo.....	22
3.3.5	Fluxos.....	24
3.3.6	Eletrodos/Arames.....	26
3.3.7	Equipamento.....	29
3.3.7.1	Tipos de Equipamento.....	29
3.3.8	Variáveis do Processo.....	30
3.4	Tratamento Térmico no Aço SAE 1045: Têmpera.....	34
3.5	ZTA.....	35
3.6	Análise Macro e Microestrutural.....	37
4	Parte Experimental	38
4.1	Caracterização do Material.....	38
4.2	Preparação dos CP's Aço SAE 1045 para Soldagem.....	41
4.3	Soldagem dos CP's.....	42
4.4	Preparação dos CP's para metalografia.....	43
4.5	Laboratório de Metalografia (macrografia).....	44
4.6	Efeito dos Parâmetros de Soldagem.....	45
4.7	Avaliação da Microdureza ao Longo da Solda.....	46
5	Resultados do Teste de Soldagem Variando a Intensidade da Corrente	48
5.1	Aspectos do Cordão Soldado.....	48
5.2	Aspectos na Dureza dos CP's.....	52
5.3	Análise da Influência do Aumento da Intensidade da Corrente Sobre as	

	Características dos Cordões de Solda.....	53
5.4	Análise da Microdureza com a variação da corrente aplicada.....	54
6	Conclusão	58
7	Sugestões para Trabalhos Futuros	59
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60

1 Introdução

No período da Segunda Guerra Mundial surgiu o processo de soldagem a arco submerso (SAW), gerando uma revolução no setor produtivo uma vez que era um processo altamente produtivo e que conseguia atender a produção de grandes embarcações e equipamentos pesados, ao contrário de outros processos de soldagem e fabricação.

A técnica da soldagem a arco submerso, de forma simplificada, consiste na alimentação contínua de um arame, o qual vai produzir um arco elétrico ao se aproximar da peça de trabalho, gerando uma poça de fusão com adição de fluxo granular, o qual irá proteger a superfície do material contra contaminações. Os tipos de fluxo e de alimentação do arame (eletrodo) utilizados serão apresentados ao longo do trabalho, assim como outras variáveis do processo de soldagem, como a utilização de corrente adequada, velocidade de soldagem, entre outros.

Pode-se observar que este processo de soldagem tem recebido ultimamente investimentos a fim de melhorar cada vez mais o processo produtivo. Porém, as limitações de aplicação de um material após a utilização do processo SAW, devido a alterações causadas em sua microestrutura, afetam diretamente na dureza do material, tornando-se o foco desse trabalho.

2 Objetivos

Considerando o contexto mostrado acima, tem-se como objetivo neste trabalho analisar a junta soldada executada em um aço SAE 1045, especificamente na zona termicamente afetada (ZTA), feita pelo processo a arco submerso, sob condições variáveis, fixando alguns parâmetros de soldagem como: a tensão, a velocidade de soldagem, a distância do bico de contato/peça (DBCP), fluxo, arame, mas alterando os valores de corrente. O objetivo geral é observar se houve ou não mudanças microestruturais assim como a manutenção das propriedades do material de base.

3 Revisão Bibliográfica

3.1 Histórico da soldagem

A soldagem é considerada como a técnica de unir duas ou mais partes de materiais iguais ou não e, historicamente, é possível afirmar que as primeiras aparições desse processo, bem rudimentares, surgiram com a Idade do Fogo a 8000 a.C. Nesse período, o homem desenvolveu habilidades de transformação da matéria através do fogo e este foi considerado como ferramenta essencial na fabricação de alguns objetos e utensílios.

As primeiras noções de soldagem surgiram há aproximadamente 5000 anos, em Ur, Caldéia, onde se uniam peças de ouro, sendo este o primeiro metal descoberto e utilizado por uma técnica conhecida atualmente como soldabrasagem, a qual empregava um metal de adição com ponto de fusão mais baixo do que o do metal de base. Por volta de 3000 anos, surgiu a técnica de forjamento a quente, a qual concentrava calor somente na região da peça onde se queria fazer a junta, seguido de martelamento (SENAI-PR, 2002). Esse processo caracterizava-se por aplicar um esforço mecânico de compressão sob o material e este assumia o formato da ferramenta de trabalho.

Com o colapso da Idade do Bronze, alternativas tiveram que ser adotadas para superar tal escassez e então, o Ferro foi difundido juntamente com técnicas que baixassem o preço do produto. Por esse material ser leve e resistente teve grande aceitação, ganhou preferência na fabricação de armas e utensílios. As armas eram feitas utilizando dois materiais, o ferro e o alumínio. Apesar de o ferro ter uma baixíssima concentração de carbono e não poder ser endurecido na têmpera, o comportamento do aço era diferente por possuir alto teor de carbono. Então, passaram a fabricar armas e espadas de ferro, com tiras de aço soldadas até que a escassez e os preços elevados do aço levassem ao desenvolvimento de novas técnicas. (MODENESI *et al.*, 2006).

A soldagem por forjamento permaneceu por muito tempo, mas foi substituída aos poucos por uniões feitas por rebiteagem e parafusagem devido ao crescimento da fundição estimulada pelo desenvolvimento do alto forno. Dessa forma, o forjamento, considerado como principal atividade da época, tornou-se um processo secundário de fabricação quando

surgiram as experiências feitas por Sir Humphrey Davy (1801) com o arco elétrico e Edmund Davy com a descoberta do acetileno, possibilitando a união de materiais por fusão e marcando um grande avanço na soldagem da época.

É notável que a soldagem veio a ser uma necessidade em diversos segmentos industriais e com grande importância. Dessa forma, novas técnicas e processos foram originados para atender a demanda e, na década de 30 e 40, período da II Guerra Mundial, iniciou-se o uso do processo SAW (WAINER *et al.*, 1992), que se propagava com utilização de fluxos, não gerava faíscas, luminosidade e respingos. Esse processo, criado por Robinoff, era considerado altamente rápido, automatizado e que se adequava às necessidades do período, já que permitia a fabricação de navios e equipamentos pesados. Desde então, a técnica de arco submerso absorveu grandes investimentos para aprimorar o sistema.

No Brasil, a soldagem a arco submerso é usada amplamente na indústria de equipamentos metálicos como tubos, navios, perfis, plataformas marítimas, trocadores de calor e toda série de equipamentos pesados, bem como na recuperação de peças, como cilindros de laminação e peças rodantes de tratores. (WAINER *et al.*, 1992)

A seguir tem-se a relação de cada época com as descobertas em termos de soldagem (Tabela1).

Tabela 1 Histórico da soldagem

1801	Sir Humphrey Davis descobre o fenômeno do arco elétrico
1836	Edmund Davy descobre o Acetileno
1885	N. Bernardos e S. Olsewski depositam patente do processo de soldagem por arco elétrico
1889	N.G. Slavianoff e C. Coffin substituem o eletrodo de grafite por arame metálico
1901	Fouché e Picard desenvolvem o primeiro maçarico industrial para soldagem oxiacetilênica
1903	Goldschmidt descobre a solda aluminotérmica
1907	O. Kjellberg deposita a patente do primeiro eletrodo revestido
1919	C. J. Halsag introduz a corrente alternada nos processos de soldagem
1926	H.M. Hobart e P.K. Denver utilizam gás inerte como proteção do arco elétrico
1930	Primeiras normas para eletrodo revestido nos EUA
1935	Desenvolvimento dos processos de soldagem TIG e Arco Submerso
1948	H.F. Kennedy desenvolve o processo de soldagem MIG
1950	França e Alemanha desenvolvem o processo de soldagem por feixe de elétrons
1953	Surgimento do processo MAG
1957	Desenvolvimento do processo de soldagem com arame tubular e proteção gasosa
1958	Desenvolvimento do processo de soldagem por eletro-escória , na Rússia
1960	Desenvolvimento de processo de soldagem a laser, nos EUA
1970	Aplicados os primeiros robôs nos processos de soldagem

Fonte: Aula de soldagem. Curso técnico em mecânica, IFSC.

3.2 Soldagem: O que é e quais são os tipos

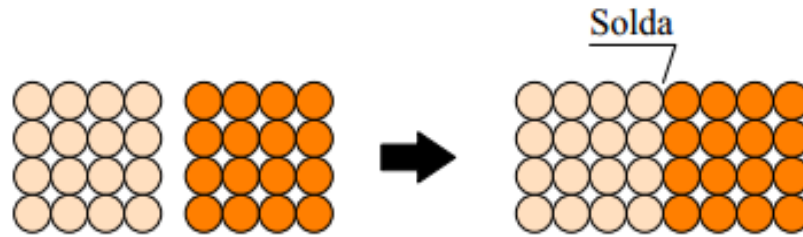
A soldagem é considerada como um tipo de união de duas ou mais partes de materiais iguais ou não, de forma permanente, baseando-se em forças interatômicas assegurando a continuidade das propriedades físicas, mecânicas e químicas do metal de base. Pode ser vista também como uma deposição de material, a fim de recuperar peças desgastadas ou ainda, formação de uma camada de revestimento. (MODENESI *et al.*, 2006). Algumas outras definições de soldagem, mas que tem a mesma essência é:

- Processo de junção de metais por fusão;
- Processo que visa à união localizada de materiais;
- Operação que visa obter a coalescência localizada produzida pelo aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem a aplicação de pressão e de metal de adição.

A união de metais pode ser realizada através de forças microscópicas (interatômicas ou intermoleculares) ou pelo surgimento de forças mecânicas macroscópicas entre as partes. Nas forças microscópicas a união é feita pela aproximação dos átomos e moléculas das partes a serem unidas, a uma distância suficiente para que haja a formação de ligações de Van der Waals. Já as forças macroscópicas a junção é feita pela resistência ao cisalhamento que as partes oferecem quando juntadas por rebites ou parafusos.

Observa-se que em uma peça metálica um grande número de átomos está disposto em um arranjo cristalino, ou seja, “os átomos estão situados em um arranjo que se repete ou que é periódico ao longo de grandes distâncias atômicas” (CALLISTER, 2002, p. 21), posicionando-se de maneira que o sistema tenha a menor energia. Sendo assim, os átomos não necessitam fazer ligações extras com seus vizinhos, mas os que estão situados na superfície dos sólidos não exibem tal estabilidade, apresentando um maior nível de energia do que os interioranos.

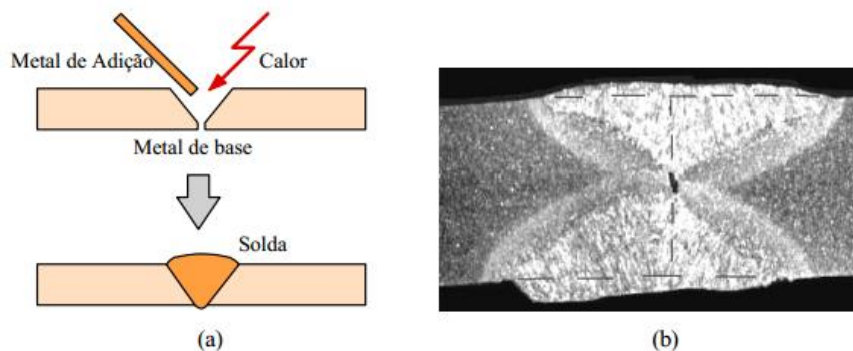
Nesse tipo de situação, o nível de energia pode ser diminuído quando os átomos superficiais fazem ligações com outros através da aproximação de duas peças metálicas a uma distância suficientemente pequena para formar uma ligação do tipo permanente, resultando em uma solda. A Figura 1 mostra a formação de uma solda por aproximação de duas peças.

Figura 1- Formação de uma solda

Fonte: Aula de soldagem. Curso técnico em mecânica, IFSC.

Porém, vale ressaltar a natureza das superfícies dos metais que por mais polidos, ainda apresentam rugosidades e isso impede uma junção/solda efetiva. Na realidade, apenas em alguns pontos de contato que realmente temos aproximação efetiva e com isso, o número de ligações não é suficiente para manter uma resistência na junta soldada. Para isso, existem dois grupos que sobressaem resolvendo esse problema e conseguem diferenciar os tipos de soldagem.

O primeiro denomina-se *Soldagem por Fusão*, que se baseia no uso de calor, até que a região a ser juntada seja fundida, resultando em uma união após solidificação do metal. Nesse grupo pode haver vários subgrupos e todos eles geralmente utilizam meio de proteção para evitar possíveis reações entre o material fundido e os gases da atmosfera. Encaixam-se, por exemplo, as soldas do tipo: arco submerso, a arco com eletrodo revestido, plasma e outros dispostos na Tabela 2. (MODENESI *et al.*, 2006). A Figura 2 mostra uma representação esquemática da solda por fusão.

Figura 2- Representação esquemática da solda por fusão em (a) e macrografia da solda em (b)

Fonte: Aula de soldagem. Curso técnico em mecânica, IFSC.

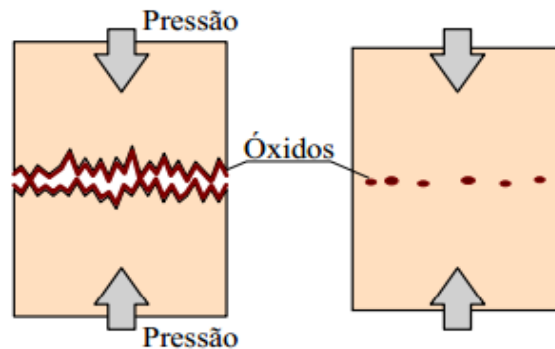
Já o segundo, *soldagem por pressão / estado sólido*, fundamenta-se na união de partes através de atrito ou deformação das superfícies de contato, permitindo a aproximação dos átomos. Pode haver aquecimento local, mas desde que esse não atinja a temperatura de fusão. Tem como alguns representantes a união feita por forjamento, ultrassom e fricção. (Ver figura 3)

Tabela 2 - Principais processos de soldagem por fusão e suas características.

PROCESSO	FONTES DE CALOR	TIPO DE CORRENTE E POLARIDADE	AGENTE PROTETOR OU DE CORTE	OUTRAS CARACTERÍSTICAS	APLICAÇÕES
Soldagem por eletro-escória	Aquecimento por resistência da escória líquida	Contínua ou alternada	Escória	Automática/Mecanizada. Junta na vertical. Arame alimentado mecanicamente na poça de fusão. Não existe arco	Soldagem de aços carbono, baixa e alta liga, espessura ≥ 50 mm. Soldagem de peças de grande espessura, eixos, etc.
Soldagem ao Arco Submerso	Arco elétrico	Contínua ou alternada. Eletrodo +	Escória e gases gerados	Automática/mecaniz. ou semi-automática. O arco arde sob uma camada de fluxo granular	Soldagem de aços carbono, baixa e alta liga. Espessura ≥ 10 mm. Posição plana ou horizontal de peças estruturais, tanques, vasos de pressão, etc.
Soldagem com Eletrodos Revestidos	Arco elétrico	Contínua ou alternada. Eletrodo + ou -	Escória e gases gerados	Manual. Vareta metálica recoberta por camada de fluxo	Soldagem de quase todos os metais, exceto cobre puro, metais preciosos, reativos e de baixo ponto de fusão. Usado na soldagem em geral.
Soldagem com Arame Tubular	Arco elétrico	Contínua. Eletrodo +	Escória e gases gerados ou fornecidos por fonte externa. Em geral o CO_2	O fluxo está contido dentro de um arame tubular de pequeno diâmetro. Automático ou semi-automático	Soldagem de aços carbono com espessura ≥ 1 mm. Soldagem de chapas
Soldagem MIG/MAG	Arco elétrico	Contínua. Eletrodo +	Argônio ou Hélio, Argônio + O_2 , Argônio + CO_2 , CO_2	Automática/mecaniz. ou semi-automática. O arame é sólido	Soldagem de aços carbono, baixa e alta liga, não ferrosos, com espessura ≥ 1 mm. Soldagem de tubos, chapas, etc. Qualquer posição
Soldagem a Plasma	Arco elétrico	Contínua. Eletrodo -	Argônio, Hélio ou Argônio + Hidrogênio	Manual ou automática. O arame é adicionado separadamente. Eletrodo não consumível de tungstênio. O arco é constricto por um bocal	Todos os metais importantes em engenharia, exceto Zn, Be e suas ligas, com espessura de até 1,5 mm. Passes de raiz
Soldagem TIG	Arco elétrico	Contínua ou alternada. Eletrodo -	Argônio, Hélio ou misturas destes	Manual ou automática. Eletrodo não consumível de tungstênio. O arame é adicionado separadamente.	Soldagem de todos os metais, exceto Zn, Be e suas ligas, espessura entre 1 e 6 mm. Soldagem de não ferrosos e aços inox. Passe de raiz de soldas em tubulações
Soldagem por Feixe Eletrônico	Feixe eletrônico	Contínua. Alta Tensão. Peça +	Vácuo ($\approx 10^{-4}$ mm Hg)	Soldagem automática. Não há transferência de metal. Feixe de elétrons focalizado em um pequeno ponto.	Soldagem de todos os metais, exceto nos casos de evolução de gases ou vaporização excessiva, a partir de 25 mm de espessura. Indústria nuclear e aeroespacial.
Soldagem a Laser	Feixe de luz		Argônio ou Hélio	Como acima	Como acima. Corte de materiais não metálicos
Soldagem a Gás	Chama oxi-acetilênica		Gás (CO , H_2 , CO_2 , H_2O)	Manual. Arame adicionado separadamente	Soldagem manual de aço carbono, Cu, Al, Zn, Pb e bronze. Soldagem de chapas finas e tubos de pequeno diâmetro

Fonte: Disciplina de soldagem. DEMET-UFMG

Figura 3 – Soldagem por pressão



Fonte: Disciplina de soldagem. DEMET-UFMG

3.3 Soldagem a Arco Submerso

Segundo a apostila ESAB (2004), “a soldagem por arco submerso é um método no qual o calor requerido para fundir metal é gerado por um arco formado pela corrente elétrica passando entre o arame de soldagem e a peça de trabalho”. Wainer *et al.* (1992) completa dizendo que o arco elétrico formado fica totalmente submerso por uma camada de fluxo granuloso (material mineral), tornando-o invisível. Com isso, esse tipo de solda se desenvolve de forma contrária aos processos de soldagem com arco aberto, por não propagar luminosidade, fumos, faíscas e respingos.

3.3.1 Vantagens do Processo

Pode-se dizer que o processo de soldagem a arco submerso tem como vantagens em relação aos outros processos de soldagem: o arco elétrico não é visível, a sua alta penetração, velocidade de deslocamento e grau de automatização, além de utilizar um só passe na deposição quando exposto a altas taxas de fusão. Isso tudo permite rapidez e economia ao processo de fabricação.

Cunha (1989) diz que “devido ao arco está oculto, a soldagem a arco submerso requer um sistema de locação de curso”, limitando a flexibilidade da solda. Mas para compensar isso, o processo apresenta alta qualidade da solda e resistência mecânica; nenhum arco de soldagem visível, minimizando requisitos de proteção; pouca geração de fumos; automatização e com isso tudo reduz a necessidade de operadores habilitados.

Outra vantagem importante do processo esta no seu elevado rendimento, pois não há perdas significativas de metal por projeção, além da boa uniformidade e acabamento nos cordões de solda. Cunha (1989) cita algumas outras vantagens como:

- “- as juntas podem ser preparadas com chanfro em V, simples;
- a proteção do operador deixa de ser necessário, pelo arco ser protegido pelo fluxo;
- o processo pode ser usado em áreas abertas, com aragem leve, uma vez que o fluxo protetor fornece proteção superior ao do eletrodo revestido.” (CUNHA, 1989).

Wainer *et al.* (1992) ressalta também que a utilização de correntes elevadas de intensidade acima de 2000A, junto a densidades de correntes entre 60 a 100A/mm², proporciona elevada taxa de deposição, que não é observada em outros processos de soldagem.

3.3.2 Desvantagens e Limitações

A desvantagem notável do processo de soldagem a arco submerso observada por Wainer *et al.* (1992) é a impossibilidade de soldar fora das posições plana e horizontal. Esta limitação é devido à força da gravidade que sustenta a camada de fluxo sobre a poça de fusão. Além disso, pode-se ressaltar:

- a complexidade da aparelhagem;
- a vulnerabilidade do fluxo quanto a contaminação que pode causar porosidade na solda;
- o material deve estar limpo para obter boa qualidade da solda;
- a soldagem a arco submerso não é adequada para todos os tipos de metais e ligas;
- a escória deve ser removida antes de um segundo passe para evitar sua inclusão na poça de fusão;
- limitação para a posição plana e horizontal devido à alta corrente de soldagem aliada ao alto aporte térmico que gera uma grande poça de fusão;
- e esse processo não deve ser utilizado em peças com espessura inferior a 5 mm devido a grande quantidade de calor fornecida. (WAINER *et al.*, 1992).

É possível visualizar a utilização da solda a arco em outras posições como vertical ou inclinada a 15° segundo ESAB (2004). Porém, para que isso seja possível é necessário um

suporte adequado para o fluxo e o tamanho dos passes deve ser limitado ou ter um suporte adequado para o fluxo e a solda deve ter pequena poça de fusão respectivamente.

3.3.3 Aplicações do Processo SAW

Apesar do processo de soldagem a arco submerso apresentar algumas limitações operacionais, ainda consegue produzir um metal de solda com ótimas características mecânicas e metalúrgicas, sendo o preferido em algumas situações.

Algumas das aplicações são vistas na maioria das chapas de aço para espessuras acima de 5 mm como em vasos de pressão, tanques, tubos de diâmetros grandes e vigas.

Segundo Cunha (1989, p. 63) é altamente usado para soldar peças de aço baixo-carbono (até 0,30%C, 0,05%P max e 0,05%S max). Já os aços de médio carbono normalmente necessitam de um pré e pós-aquecimento, exigindo arames e fluxos especiais. A soldagem de aços inoxidáveis também necessita de procedimentos especiais para cada tipo. Alumínio e ligas, Magnésio e ligas, Chumbo e Zinco não são soldáveis pelo processo, assim como o ferro fundido que não suporta as tensões térmicas provenientes do alto calor gerado. (CUNHA, 1989).

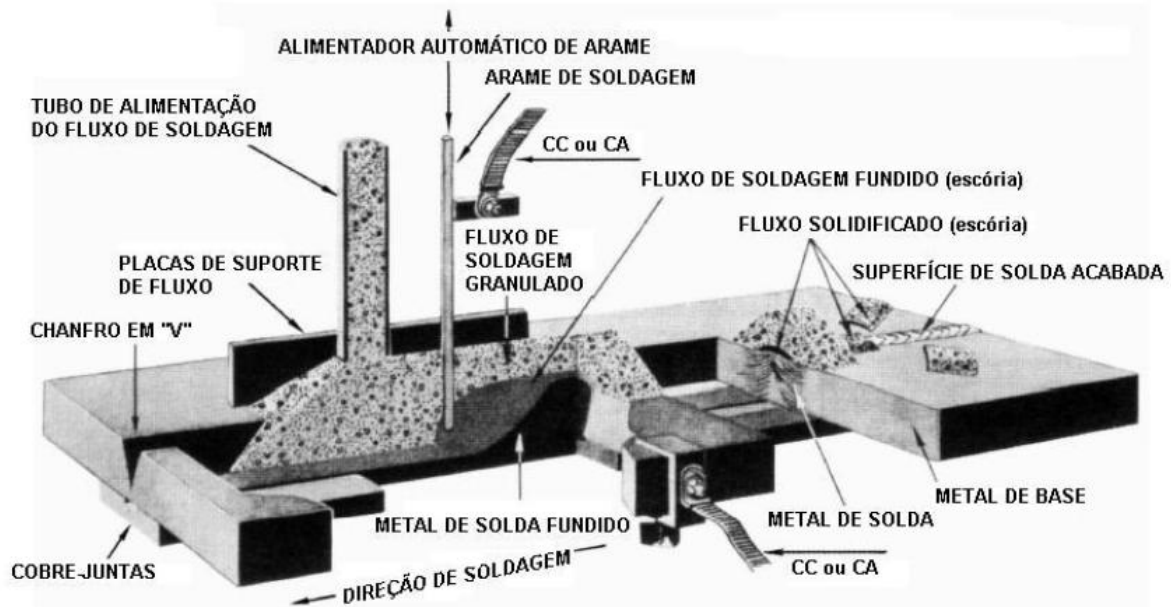
3.3.4 Características gerais do processo

Wainer *et al.* (1992) diz que durante o processo de soldagem a arco submerso há fusão de uma parte do fluxo juntamente com a ponta do eletrodo devido a energia fornecida pelo arco elétrico. Com isso, a região de solda fica sempre protegida pela parte do fluxo que não se fundiu e pela escória formada pelo fluxo fundido. O arco elétrico então se desenvolve um pouco acima do metal de base, onde se localiza o eletrodo. A Figura 4 mostra o processo destacando cada elemento.

“Dispositivos automáticos asseguram a alimentação do eletrodo a uma velocidade conveniente de tal forma que sua extremidade mergulhe constantemente no banho do fluxo em fusão” (CUNHA, 1989, p. 59). Esse fluxo, presente na forma de grânulos, tem ação fundente e protetora contra contaminações no metal de solda e atua como isolante térmico,

concentrando calor.

Figura 4: Esquema do processo de soldagem a arco submerso



Fonte: Extraído de ESAB, 2004.

É observado também em Wainer *et al.* (1992) que o fluxo fundido sobrenada e se distingue do metal de solda líquida na forma de escória. Como o metal de solda tem o ponto de fusão mais alto que o da escória, este se solidifica primeiro enquanto que a escória tem o papel de proteger o metal de solda contra reações com oxigênio e nitrogênio da atmosfera, uma vez que ainda se encontra na forma fundida. Após o seu resfriamento, a escória se desprende do metal de solda de forma simples e rápida.

Outra característica do processo a arco submerso é que esse processo pode ser semi ou totalmente automatizado e nos dois tipos a alimentação do eletrodo é contínua e mecanizada. Já o fluxo segundo Wainer *et al.* (1992), cai por gravidade na frente do eletrodo, fazendo uma alimentação independente, caracterizando esse processo em relação aos demais, onde o eletrodo metálico e o seu revestimento de fluxo não são separáveis.

Guerra (1996) define o princípio de funcionamento como sendo a alimentação do arame nu ou maciço, tracionado por rolos e energizado ao passar pelo tubo de contato e antes que haja formação do arco elétrico, há deposição do fluxo sobre a junta na presença de um aspirador para retirar o excesso de material não fundido assim que a solda ocorre. Além disso,

completa com a idéia de que a máquina deve possuir equipamentos acoplados para adequar as velocidades, amperagem, tensão e corrente.

Vale lembrar também que a soldagem a arco submerso pode trabalhar em amplas faixas de intensidade de corrente, tensão e velocidade de avanço distinguindo dos outros processos. Porém, cada uma dessas variáveis pode ser controlada separadamente, desde que operem em conjunto para produzir soldas de acordo com as propriedades desejadas uma vez que, esses fatores influenciam diretamente no perfil do cordão de solda, na aparência e limpeza da junta.

3.3.5 Fluxos

Segundo Wainer *et al.* (1992) os fluxos usados na soldagem a arco submerso são projetados para suportar altas correntes. Além disso, eles têm a função de proteger a poça de fusão contra ataques da atmosfera, atuam como desoxidantes e podem modificar a composição química do metal de solda. A ESAB (2004) completa dizendo que os fluxos controlam a geometria do cordão de solda e influenciam diretamente na usabilidade e nas propriedades mecânicas do metal de solda.

Existem diferentes tipos de fluxo, cada um com suas características, a escolha vai depender dos requisitos de aplicação da solda, condições do metal base, propriedades mecânicas e metalúrgicas e principalmente a combinação com eletrodo. (GUERRA, 1996)

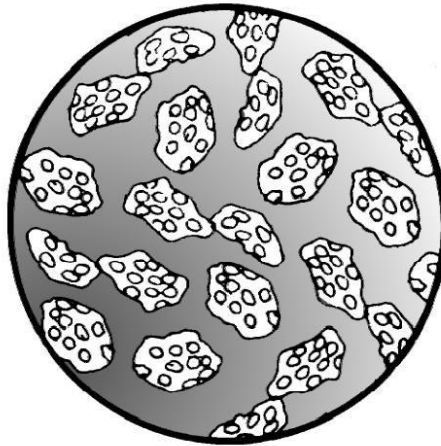
Os fluxos recebem uma divisão quanto ao seu método de fabricação: aglomerados ou fundidos. Os fluxos aglomerados são constituídos de compostos minerais (Manganês, silício, alumínio, titânio, zircônio, cálcio e desoxidantes), juntamente com um agente aglomerante e esse conjunto é sinterizado em temperaturas em torno de 600 e 900°C. A Figura 5 representa o aspecto dos grãos de fluxo aglomerado. As partículas desse fluxo são peneiradas para se obter melhor desempenho na remoção de óxidos, soldas livres de porosidade entre outras características.

Nesse tipo de fluxo espera-se que tenha como propriedades:

- “higroscopia, o que deve ser observado durante a estocagem e ressecagem;

- a presença de finos é muito importante desde que não causam alguma alteração na composição;
- na sua estrutura podem ser adicionados desoxidantes e elementos de liga;
- fácil remoção da escória superficial;
- por ser muito fino, podem ser utilizados com uma camada bem espessa aumentando a proteção da poça de fusão.” (GUERRA, 1996)

Figura 5: Aspecto dos grãos de fluxo aglomerado

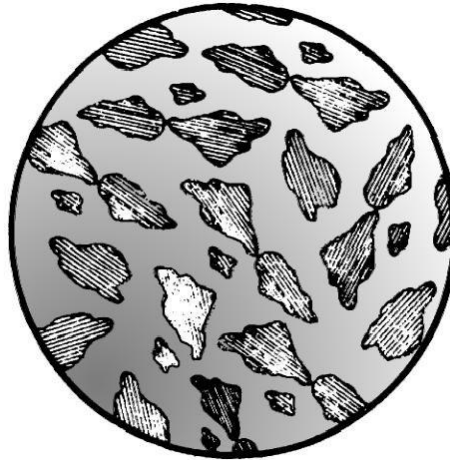


Fonte: Extraído de ESAB, 2004.

Já os fluxos fundidos são constituídos dos mesmos compostos minerais juntamente com os ingredientes fundidos em forno para formar “vidro metálico”, que será reduzido em partículas granulares de tamanhos variados. Segundo ESAB (2004), essas partículas são peneiradas e recebem a classificação para obter maiores velocidades de soldagem e possibilidade de reciclagem, soldas mais resistentes, maior estabilidade do arco, entre outras. A Figura 6 mostra o aspecto dos fluxos fundidos.

É importante ressaltar a diferença no comportamento de fluxos, já que recebem uma classificação de neutros ou ativos. Isto está relacionado à quantidade de manganês e/ou silício transferido para o metal de solda e vai depender da composição do fluxo e do arame, além da razão de escória por arame fundido.

Figura 6: Aspecto dos grãos de fluxo fundido



Fonte: Extraído de ESAB, 2004.

Em geral, os fluxos irão apresentar como principais propriedades:

- “não são higroscópios o que implica em menor cuidado durante a estocagem;
- boa homogeneidade química;
- são utilizados em situações com menor velocidade de soldagem;
- permitem a retirada dos finos sem alterar a granulometria.” (GUERRA, 1996)

Existem outros tipos de consumíveis na forma de fluxo como os sinterizados, os neutros, os ativos e os ligados. Os sinterizados são adquiridos de forma semelhante aos aglomerados sendo que há inserção de um aglomerante cerâmico durante a fabricação. Os neutros, já possuem essa denominação por não provocarem alteração no metal, em especial nos teores de manganês e silício, ao contrário dos fluxos ativos que contém esses elementos e por isso ficam mais vulneráveis a qualquer variação de tensão, que vai implicar na modificação das quantidades dos mesmos. Por fim, os fluxos ligados serão aqueles que “contém elementos de liga e desoxidantes, podendo ser utilizados com arames de aço ao carbono para produzir um metal de solda com composição química variada”. Como nos fluxos ativos também estão susceptíveis a variações da tensão aplicada. (GUERRA, 1996)

3.3.6 Eletrodos/ Arames

Assim que o fluxo for definido o arame deve ser escolhido a fim de determinar o par arame-fluxo que vai atender as necessidades do processo. O par arame-fluxo (Figura 7) pode

ser selecionado seguindo dois sistemas da norma AWS (Structural Welding Code), a qual abrange a maioria dos consumíveis de soldagem, incluindo metais de adição e gases de proteção. As Figuras 8 e 9 mostram os sistemas de classificação segundo a norma. (SOUZA, 2012).

Na soldagem a arco submerso os eletrodos/arames são fabricados com composição química especificada e trefilados até o diâmetro desejado. Geralmente são feitos de cobre ou aço e encontram-se comercialmente na forma de rolos de 25kg ou 400kg. (WAINER *et al.*, 1992)

Guerra (1996) diz que durante a escolha do eletrodo deve-se observar a composição química de acordo com o fluxo utilizado, uma vez que alguns fluxos podem provocar ganho ou perda no metal de solda, em especial C, Si e Mn.

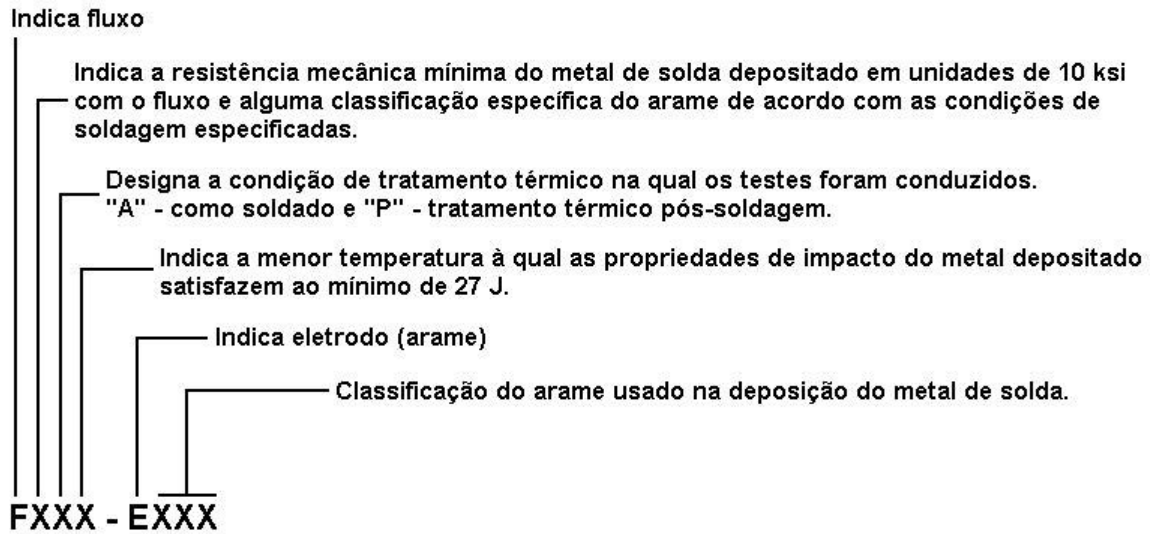
Já o diâmetro do arame vai depender diretamente da aplicação e do equipamento que será utilizado. Quando se utiliza equipamento semiautomático, solicita-se o uso de um arame com no máximo de 2,0 mm, por ser mais fácil de controlar o arco elétrico e não ser tão rígido o cabo. (GUERRA, 1996)

Figura 7: Par arame-fluxo utilizados na soldagem a arco submerso.



Fonte: Produtos Energyarc.

Figura 8: Exemplo 1 de classificação do sistema arame-fluxo

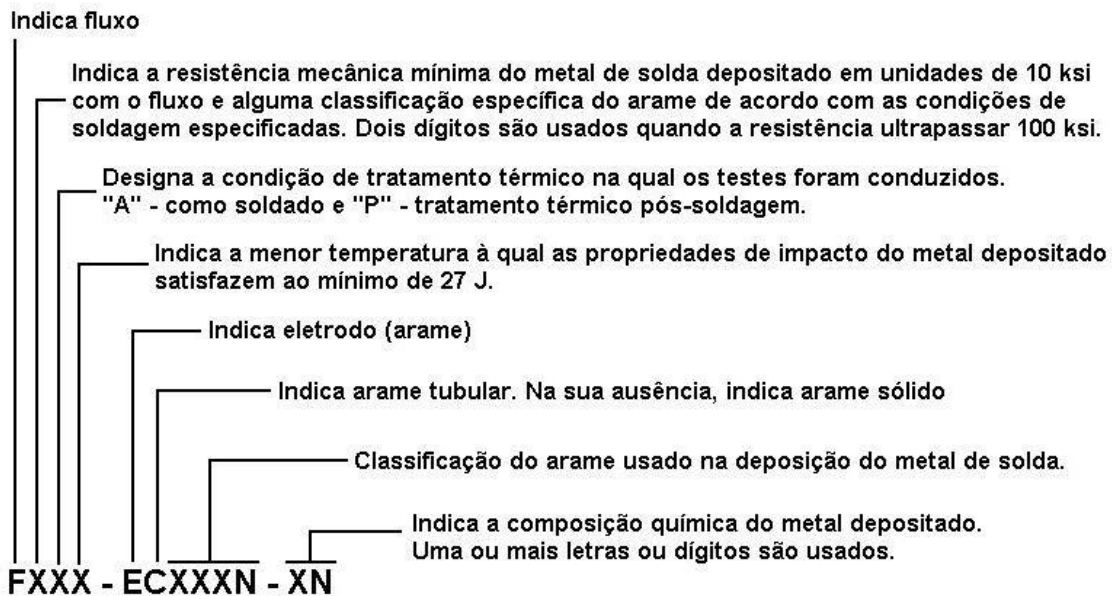


Exemplo:

F7A6-EM12K é uma designação completa. Refere-se a um fluxo que produzirá um metal de solda que, na condição como soldado, terá uma resistência à tração superior a 70 ksi (ou 485 MPa) e uma propriedade de impacto de pelo menos 20 lb.ft (ou 27 J) a -60°F (ou -51°C) quando depositado com um arame EM12K sob as condições estabelecidas na norma AWS / ASME.

Fonte: Extraído de ESAB, 2004.

Figura 9: Exemplo 2 de classificação do sistema arame-fluxo



Exemplo:

F9P0-EB3-B3 é uma designação completa. Refere-se a um fluxo que produzirá um metal de solda que, na condição de tratado termicamente pós-soldagem, terá uma resistência à tração superior a 90 ksi (ou 620 MPa) e uma propriedade de impacto de pelo menos 20 lb.ft (ou 27 J) a 0°F (ou -18°C) quando depositado com um arame sólido EB3 sob as condições estabelecidas na norma AWS / ASME. A composição do metal de solda será EB3.

Fonte: Extraído de ESAB, 2004.

3.3.7 Equipamento

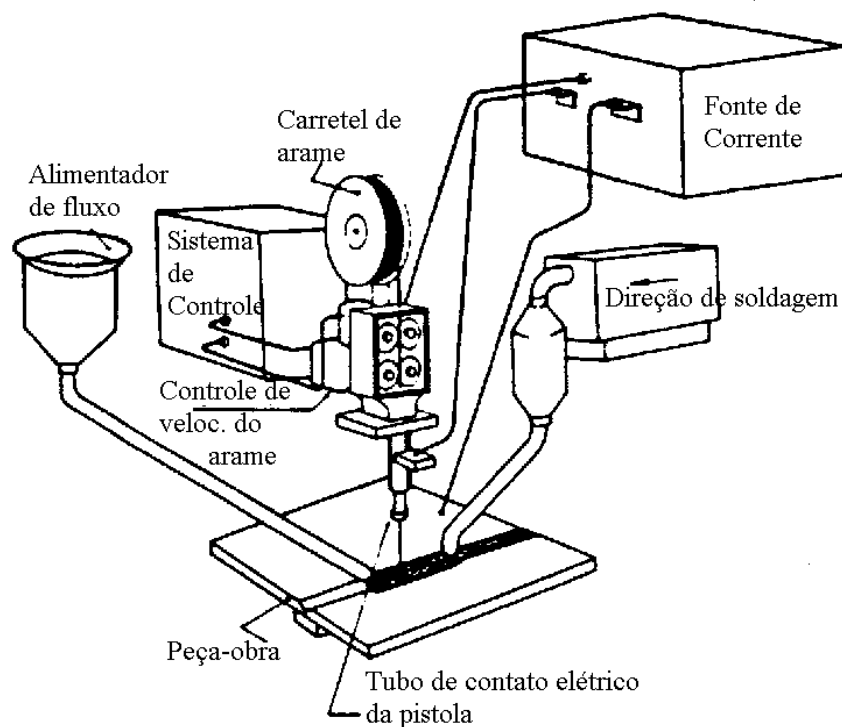
O processo pode ser semiautomático ou automatizado. A diferença principal está na produtividade, uma vez que o primeiro necessita de um operador para controlar a pistola de soldagem, enquanto o segundo é mais eficiente e proporciona uma qualidade ainda maior.

A Figura 10 mostra esquematicamente os componentes do equipamento automático da soldagem com arco submerso

O equipamento é composto por:

- 1) fonte de energia;
- 2) sistema de controle;
- 3) alimentador de arame;
- 4) alimentador de fluxo;
- 5) pistola de soldagem;
- 6) aspirador de fluxo.

Figura 10: Representação esquemática dos componentes básicos do equipamento de soldagem a arco submerso



Fonte: Classificação e utilização de processos de soldagem

E o conjunto 2,3,5 dos itens acima constituem o cabeçote de soldagem. Quando o processo é automatizado esse conjunto se desloca ao longo da peça ou este fica imóvel enquanto a peça se movimenta. Caso o processo não seja automatizado, o alimentador de fluxo e a pistola são controlados por um operador que não tem visibilidade, diminuindo a eficiência do processo. (UNISANTA).

A energia utilizada pode ser do tipo gerador ou transformador-retificador para corrente contínua e transformador para uso em corrente alternada. As tensões usais solicitadas segundo UNISANTA, estão entre 20 e 55 Volts. Já as fontes de energia devem ter capacidade de 600 a 2000A, podendo chegar a 4000A em alguns casos especiais.

A alimentação do fluxo é feita através de um reservatório que está acoplado à tocha ou ao cabeçote, que alimenta continuamente o sistema conforme proposto por Wainer *et al.* (1992).

3.3.7.1 Tipos de equipamentos

Além dos equipamentos do processo de soldagem a arco submerso semiautomático e automático já citados, existe também o de arco submerso *geminado (twin-arc)*, o arco submerso para soldagem *com fita* e o *tandem com 2 ou 3 eletrodos*. Wainer *et al.* (1992) descreve o primeiro como sendo dois eletrodos nus soldando simultaneamente, sendo que estão acoplados a um mesmo cabeçote e a mesma fonte energética. A sua utilização é geralmente para execuções de revestimentos porque tem baixa penetração e baixa diluição. Já o segundo utiliza-se de uma fita como eletrodo, permitindo a fabricação de cordões de solda com até 100 mm de largura, sendo ideal para aplicações em revestimentos, principalmente de aços inoxidáveis sobre aço-carbono, fornecendo penetração e diluição baixas.

3.3.8 Variáveis do Processo

Durante a realização de uma solda através do processo de soldagem a arco submerso, nota-se que algumas variáveis podem ser alteradas. Elas estão apresentadas a seguir e seguem uma ordem de importância:

- corrente elétrica;
- tensão do arco;

- diâmetro do eletrodo;
- tipo de corrente utilizada;
- velocidade de soldagem;
- DBCP.

Essas variáveis que serão o foco do presente trabalho, uma vez que interferem diretamente nas características da zona termicamente afetada e nas propriedades mecânicas do material. Sendo assim, uma descrição sucinta de cada variável é feita a seguir.

- Corrente elétrica:

Segundo ESAB (2004) e Wainer *et al.* (1992) esta variável é a mais influente por controlar a quantidade de material fundido, determinar a taxa de deposição e fusão e a profundidade da poça de solda no metal de base. Se todas as outras variáveis se mantiverem constantes, e houver um aumento da corrente, conseqüentemente a penetração e a taxa de deposição também aumentam, podendo até vazar o metal de solda. Isso afeta diretamente a ZTA podendo alterar algumas propriedades mecânicas ao longo da solda

É importante que a corrente escolhida esteja dentro da faixa adequada para o diâmetro de eletrodo que esta sendo usado; corrente muito elevada produz um cordão muito alto e estreito, além de mordeduras e se a corrente for muito baixa, produz um arco instável. (WAINER *et al.*, 1992, p. 141)

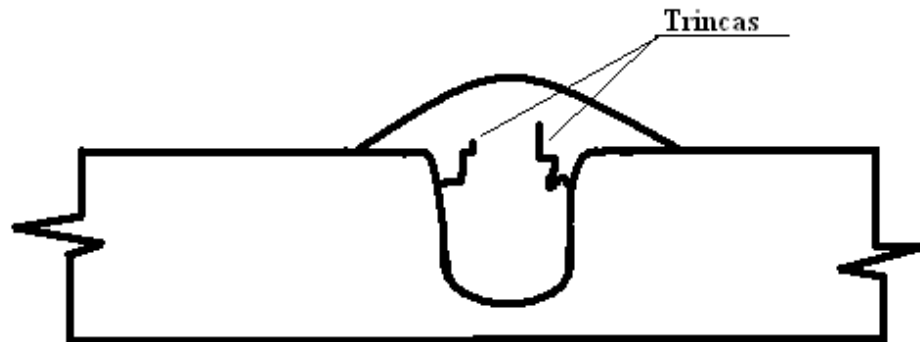
- Tensão do arco:

Essa variável influencia diretamente na seção transversal do cordão e na aparência externa da solda conforme Wainer *et al.* (1992), o que é observado quando tensões muito altas geram cordões em formato de chapéu, sujeito a trincas, dificultando a retirada da escória (Figura 11). Guerra (1996) diz ainda que esse parâmetro está diretamente proporcional ao comprimento do arco e é o principal responsável pela largura do cordão de solda.

Se todas as outras características forem mantidas, aumentando somente a tensão, então de acordo com ESAB - arco submerso (apostila), o cordão ficará mais plano e mais largo, vai aumentar o consumo de fluxo, assim como a resistência a porosidade causada pela oxidação

ou presença de óleos não removidos.

Figura 11: Formação de trincas no cordão de solda em forma de chapéu, devido a altas tensões.



Fonte: (WAINER *et al*, 1992)

- Diâmetro do eletrodo:

Como explicado no item 2.3.6, o diâmetro dos eletrodos é variável, vai depender da faixa de aceitação do equipamento. Segundo Wainer *et al.* (1992) deve-se observar que ao utilizar uma solda automática os diâmetros devem estar entre 2,4 a 6,4 mm e para cada valor de diâmetro tem-se uma corrente elétrica recomendada. A tabela a seguir (Tabela 3) mostra os valores de correntes para esse intervalo de diâmetros citados acima.

Caso todos os outros parâmetros sejam constantes e seja aumentado o diâmetro do eletrodo, conseqüentemente aumentará a largura do cordão e diminuirá a densidade da corrente, a penetração e a taxa de deposição. Isso também implica num aumento das taxas de deposição devido ao uso de maiores intensidades de corrente, pelo aumento da capacidade de suporte da mesma. Essas relações estão dispostas em Wainer *et al.* (1992).

Tabela 3: Relação entre diâmetro e corrente elétrica recomendada.

Diâmetro do eletrodo (mm)	Corrente elétrica (A)
2,4	230 - 600
3,2	300 - 700

Diâmetro do eletrodo (mm)	Corrente elétrica (A)
4,0	400 – 800
4,8	450 – 1000
6,4	600 - 1300

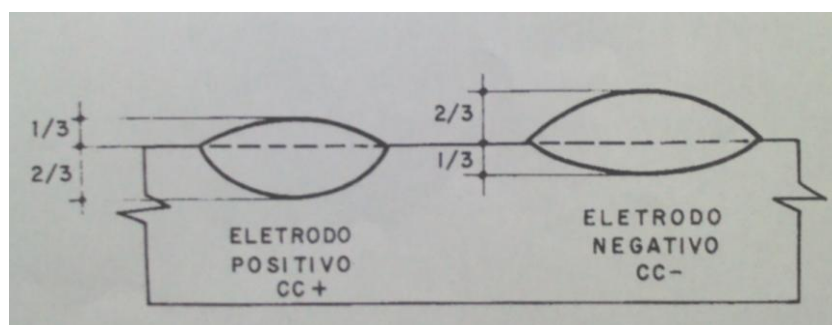
Fonte: Extraído de WAINER *et al*, 1992.

- Tipo de corrente

De acordo com Wainer *et al* (1992), a corrente contínua de polaridade reversa (CCPR) (+) é recomendada para a maioria das soldas feita com arco submerso, por essa proporcionar melhor resistência a porosidade e melhor formato do cordão da solda. Se a corrente for alterada para a polaridade negativa, a tensão deve ser aumentada em 4 V, mantendo todos os outros parâmetros.

Observando a figura 12, é possível notar que quando se utiliza corrente com polaridade positiva a largura do cordão é menor, mas apresenta maior penetração em relação a solda feita com corrente de polaridade negativa. Essa ultima, apesar de ter penetração baixa, chega a ter uma deposição 30% a mais que a positiva.

Figura 12: Efeito da polaridade do eletrodo sobre o cordão de solda, mantidos constantes os demais parâmetros.



Fonte: Extraído de WAINER *et al.*, 1992.

Wainer *et al.* (1992) ressalta que a o uso da corrente alternada apresenta taxas intermediárias entre os valores de penetração e deposição se comparados com CCPR (+) e CCPR (-). Geralmente emprega-se esse tipo de corrente em eletrodos auxiliares tandem, velocidade de soldagem baixa e aplicações onde há apagamento do arco com CC.

- Velocidade de soldagem:

Sabe-se que a velocidade de soldagem vai influenciar diretamente na largura do cordão e a penetração. De acordo com ESAB (2004) os efeitos da variação da velocidade estão interligados com a combinação corrente-tensão de uma maneira simples, inversamente proporcional, ou seja, se aumenta a velocidade implica em diminuição do aporte térmico e da quantidade de arame de solda por unidade de comprimento diminuindo o reforço da solda e Guerra (1996) completa dizendo que pode provocar defeitos como porosidades e mordeduras. Já a diminuição da velocidade é totalmente ao contrario, aumenta a contribuição térmica, a quantidade de arame e o reforço do cordão.

É importante lembrar que velocidades baixas geram cordões em forma de chapéu como visto no item “tensão do arco”, Figura 11.

- Distância bico de contato/peça (DBCP):

Guerra (1996) afirma que como em outros processos, no arco submerso é necessário uma correta preparação da junta antes da operação iniciar, além de outros procedimentos como limpeza, alinhamento, etc. O tipo de chanfro escolhido para a junta vai afetar diretamente na geometria do cordão de solda.

Wainer *et al.* (1992) caracteriza essa distância como sendo a “distância entre o ponto de contato elétrico no bico do cabeçote e a ponta do eletrodo que atinge a peça a ser soldada”. Com isso, facilita a visualização de que quanto maior a distância, maior será a taxa de deposição. Esses componentes ficam geralmente distantes em 20 a 35 mm.

3.4 Tratamento térmico no aço SAE 1045: Têmpera

Para adquirir maior dureza ao aço SAE 1045, realiza-se o tratamento térmico de têmpera. A Têmpera pode se dividir em superficial, por chama ou indução, mas de forma simplificada de acordo com Chiaverini (2008) a têmpera “consiste no aquecimento do aço até sua temperatura de austenitização entre 815° e 870°C, seguido de resfriamento rápido”. Esse resfriamento pode ser em vários meios, dependendo da endurecibilidade dos aços e da forma e

dimensões da peça submetida ao processo, o que vai proporcionar a obtenção da estrutura martensítica.

Ao realizar o processo de têmpera há um aumento nas propriedades mecânicas do material, como na dureza do aço e na sua resistência à tração, mas vale lembrar que o aumento dessa dureza é limitado até certa profundidade.

Já a ductilidade e a tenacidade sofrem uma redução, além de surgirem algumas tensões internas, as quais podem acabar gerando deformações e empenamentos caso não sejam controladas.

De forma simplificada, o processo de formação da martensita, se dá da seguinte forma: o aço inicialmente possui microestrutura na forma de perlita e ferrita e é aquecido até a temperatura de aproximadamente 860°C, formando a estrutura cristalina austenita. Essa estrutura (antes ferrita+perlita) é resfriada rapidamente usando como meio refrigerante água ou óleo caracterizando a têmpera. Nesse momento, como o aço foi resfriado bruscamente, não há tempo das estruturas voltarem ao estado inicial na forma de perlita e ferrita, então se forma uma nova fase, considerada metaestável que é a martensita. Essa estrutura caracteriza-se por distorcer o retículo cristalino do material, o que faz aumentar a dureza do mesmo.

3.5 Zona Termicamente Afetada (ZTA)

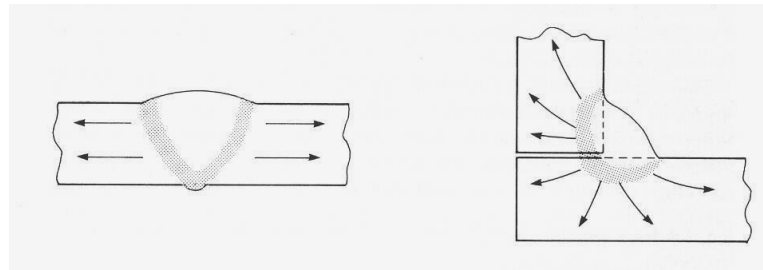
Qualquer solda que passe pelo processo de fusão ao ser realizada apresenta acúmulo de gradiente térmico no material de base. Isso quer dizer que a poça de fusão influencia fortemente na temperatura do metal de base, caracterizando a ZTA.

De acordo com ESAB (2004), observa-se que num ponto da ZTA logo além da borda da poça de fusão a temperatura aumenta rapidamente a um nível próximo do da poça de fusão e diminui rapidamente produzindo um efeito como o de têmpera. Nessa região, como explicado no item 2.4.1, há formação de austenita, devido ao aquecimento e dependendo da forma de resfriamento poderá apresentar o constituinte na forma de martensita. Com isso, regiões em torno do aquecimento apresentarão tamanhos de grãos maiores do que regiões onde o gradiente térmico não foi tão grande. Se afastar mais ainda da região da poça de fusão,

é imperceptível a alteração nos tamanhos de grão, mas mesmo assim, a dureza nessa região menos afetada sofre um declínio por causa do calor.

Por ser uma região sensível a variações térmicas e estruturais, podem surgir alguns defeitos como, por exemplo, fissuras, decoesão laminar e trincas. A seguir é apresentada uma figura esquemática do fluxo de calor numa solda.

Figura 13: Caminho do fluxo de calor em juntas de topo e em ângulo.

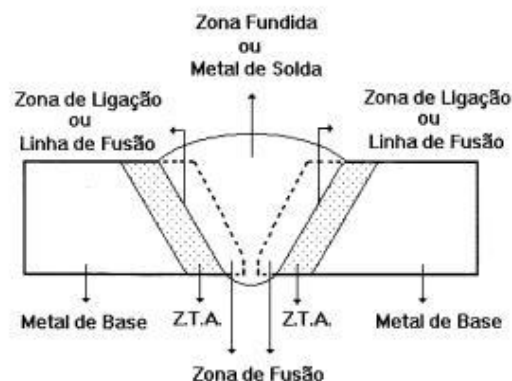


Fonte: Extraída de ESAB, 2004.

A partir da Figura 13 pode-se dizer que a espessura da peça e o tipo de junta podem influenciar diretamente na taxa de resfriamento na ZTA, isto é, maior velocidade de resfriamento e quantidade de caminhos que o calor pode tomar respectivamente, o que pode gerar trincas.

As regiões que identificadas pela variação do ciclo térmico em uma solda são: ZTA, metal de base, zona fundida e zonas de transição. A Figura 14, mostra essas regiões em um cordão de solda.

Figura 14: zonas de uma junta soldada.



Fonte: Apostila de Soldagem

3.6 Análises macro e microestrutural

As análises macro e microestruturais são geralmente empregadas nas áreas de controle de qualidade de rotina, análises de falha e de pesquisas em desenvolvimento. Eles diferenciam-se quanto a escala de ampliação que deve ser usada para estar analisando a amostra.

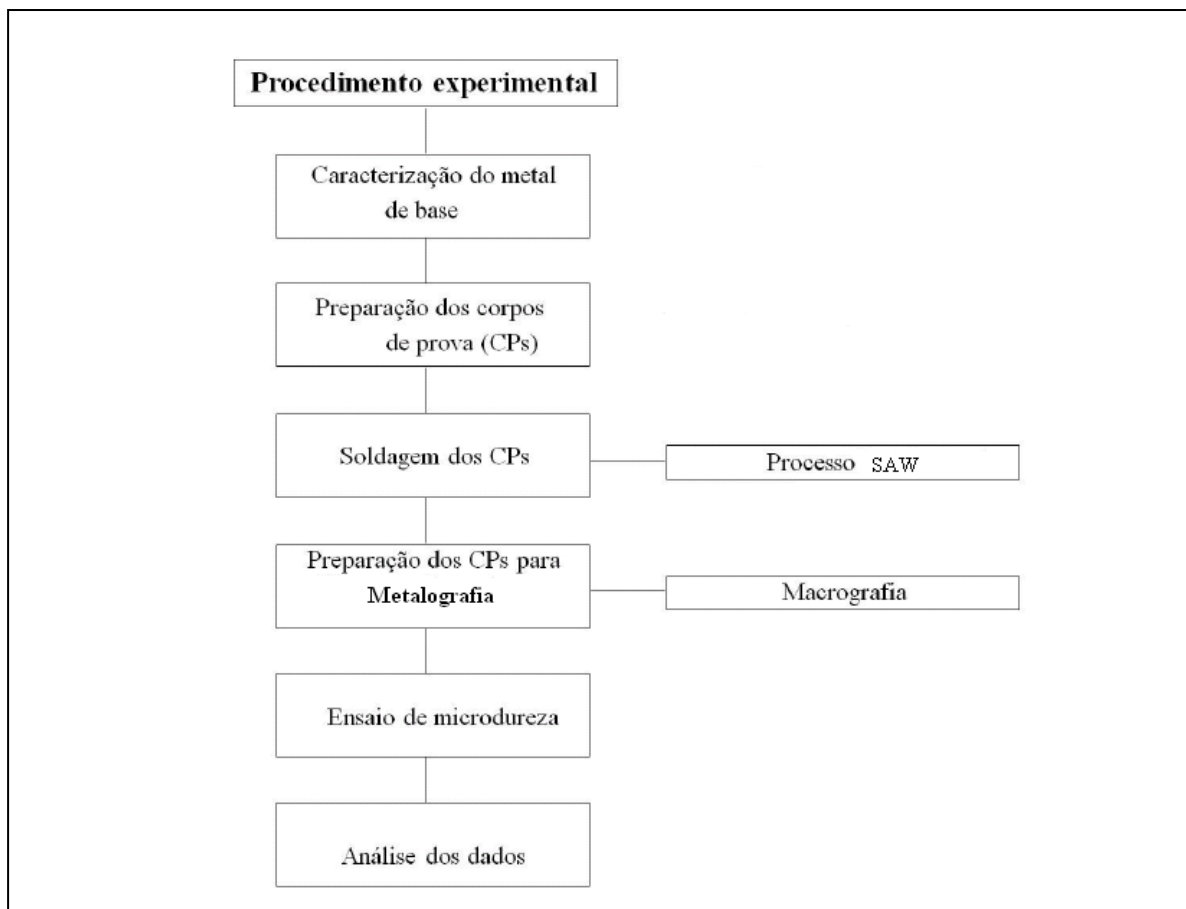
“A macrografia consiste no exame do aspecto de uma peça ou amostra metálica, seguida uma seção plana devidamente lixada e em regra atacada por um reativo apropriado.” (COLPAERT, 2008). Nesse processo tenta reproduzir as macroestruturas em tamanho natural, ampliando-as em até 10 vezes.

Já a micrografia, também chamada de metalografia microscópica, tem o objetivo segundo Colpaert (2008) de determinar seus constituintes e textura. Utiliza-se do polimento das peças e de reagentes químicos apropriados que devem ser escolhidos de acordo com o microconstituente a ser revelado. As características mais observadas são o tamanho de grão, a quantidade de impurezas, porosidades, fases secundárias, entre outras, o que exige uma maior técnica de observação.

4 Parte experimental

A parte experimental do trabalho seguiu uma sequência representada pela Figura 15, que mostra o fluxograma utilizado. Este destaca as principais etapas que são: caracterização do material, no caso aço SAE 1045; preparação dos corpos de prova (CP's) para soldagem, soldagem dos CP's; preparação dos CP's para metalografia; metalografia; avaliação da dureza e análise de resultados.

Figura 15: Fluxograma da parte experimental



Fonte: Elaborada pelo autor

4.1 Caracterização do Material

O material utilizado nesse trabalho foi o aço SAE 1045 como metal de base durante a solda a arco submerso. Esse aço, considerado de construção mecânica, apresenta como propriedades ótima forjabilidade e boa soldabilidade, assim como boa usinabilidade quando laminado a quente ou normalizado.

Geralmente o aço SAE 1045 é utilizado na fabricação de componentes que necessitam de uma resistência mecânica superior à dos aços de baixo carbono convencionais. Ele é encontrado em aplicações de baixa temperabilidade e média resistência, utilizado também em eixos, peças forjadas, engrenagens comuns, componentes estruturais e de máquinas, pinos, grampos, cilindros, entre outras.

Sua composição química apresenta como principais elementos Carbono, Manganês, Enxofre e Fósforo. A Tabela 4 mostra a composição especificada para este material.

Tabela 4: composição do aço SAE 1045 segundo especificada pela ABNT.

Composição química SAE 1045 (%)			
C	Mn	P máx.	S máx.
0,43 - 0,5	0,60 - 0,90	0,03	0,05

Fonte: GERDAU

Parte do material inicialmente foi caracterizada de forma a avaliar sua dureza e aspectos microestruturais, servindo como material de referência. A partir da chapa SAE 1045 cortou-se um corpo de prova com dimensão 10x10x12,7(mm) para a realização da prática metalográfica. Esse corpo de prova foi embutido em resina polimérica e em seguida lixado com lixas de granulometria 120, 240, 320, 400 e 600. Durante cada mudança de lixa o corpo de prova deve ser girado 90° na direção do lixamento, observado sempre se a superfície lixada removeu todos os riscos da lixa anterior. Vale lembrar que durante a mudança de lixas deve-se evitar a contaminação das mesmas com resíduos das anteriores, sendo indispensável à limpeza das peças para cada mudança com água, álcool e secador. As figuras abaixo se referem aos materiais utilizados durante essa prática de lixamento. (PEIXOTO *et al.*, 2011)

Em sequência, fez-se o polimento dos corpos de prova utilizando-se panos com pasta de diamante de 9µm e 3µm para posterior ataque químico com solução de ácido nítrico (Nital) 3%, a fim de revelar algumas características no corpo de prova.

Figura 16: Materiais utilizados no lixamento: a) lixadeira politriz; b) materiais para limpeza e secagem da peça.



a)

b)

Fonte: elaborado pelo autor

A forma de contato com o reagente utilizada foi a de imersão, sendo essa caracterizada pelo mergulho do corpo de prova no reagente durante um período curto de tempo, cerca de 10 segundos, o suficiente para visualizar uma mudança no corpo de prova. Este deve ser lavado e secado para posterior análise via microscópio. Abaixo seguem imagens do equipamento de polimento e dos materiais de ataque químico. (Ver Figura 17).

Figura 17: Materiais utilizados para o ataque químico (Nital 3%).



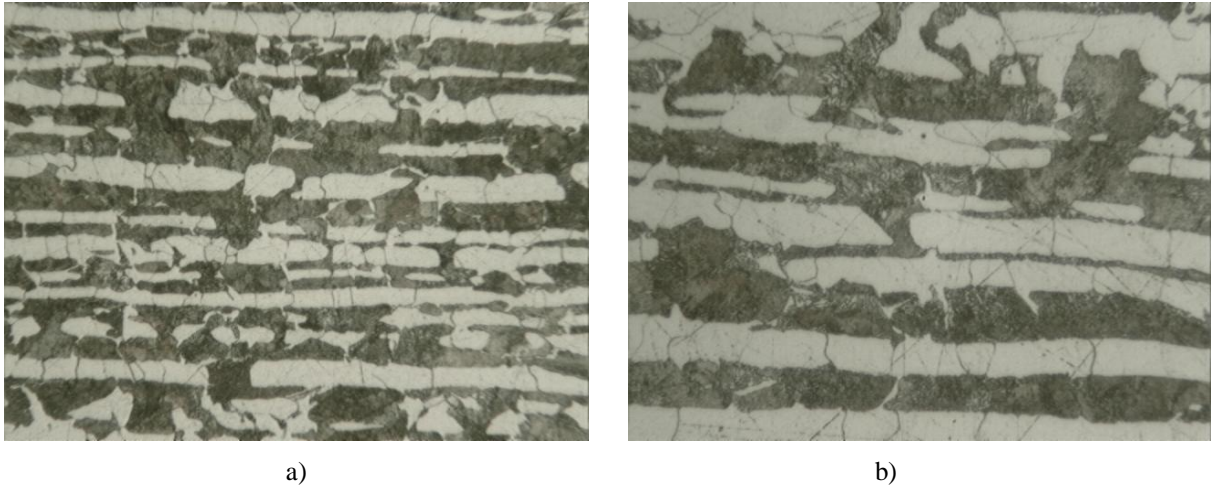
Fonte: elaborado pelo autor

A Figura 18 (a e b) a seguir mostra a estrutura do aço SAE 1045, caracterizando estruturas perlítica e ferrítica, além de formas bandeadas que estão relacionadas ao processo de fabricação.

O bandeamento se manifesta, normalmente, pela formação de “bandas”

alternadas de perlita e ferrita ou de outros constituintes com variação significativa do teor de carbono. [...] O mecanismo de formação do bandejamento está ligado à segregação dos elementos substitucionais. (COLPAERT, 2008, p.361)

Figura 18: Representação da estrutura do SAE 1045 no seu estado inicial a) aumento de 200x; b) aumento de 400x.



Fonte: elaborado pelo autor

4.2 Preparação dos Corpos de Prova aço SAE 1045 para soldagem (SAW)

Primeiramente, a chapa de aço SAE 1045 foi cortada em 18 partes menores, com dimensões de 100x50x12,7(mm). Essas foram esmeriladas para remover a camada oxidada e tornar o contato elétrico eficiente durante o processo de soldagem a arco submerso. As imagens abaixo se referem ao material no estado inicial e final após esse processo.

Figura 19: Corpo de prova antes e depois de lixado no esmeril



Fonte: Elaborado pelo autor

4.3 Soldagem dos Corpos de Prova

O processo utilizado para soldar as chapas foi o arco submerso, já citado no item 3.3 e o equipamento utilizado foi do tipo UNIONMELT/800, marca S.A. White Martins. (Ver Figura 20).

Durante o processo de soldagem adotado no trabalho foram fixados alguns parâmetros de soldagem para análise de dados. Esses parâmetros fixados foram a velocidade de soldagem, a tensão do arco, DBCP, fluxo e arame. Os dados dos parâmetros fixados estão dispostos na Tabela 5.

Tabela 5: Valores dos parâmetros fixados

Parâmetros Fixados	
Velocidade de soldagem	15,00 cm/min
DBCP	18,25mm
Tensão do arco	30 V
Par arame-fluxo	EL12 / 1081W

Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 20: Máquina de soldagem a arco submerso utilizada



Fonte: Elaborada pelo autor

Os corpos de prova de aço SAE 1045 foram soldados pelo processo SAW variando o valor da corrente de 20A em 20A (ampères) aproximadamente, até atingir a capacidade máxima do equipamento. Inicialmente, a primeira corrente utilizada foi a de 200A, uma vez que para valores menores que isso no equipamento, não houve formação de cordão de solda.

Os corpos de prova depois de soldados estão dispostos na Figura 21, em ordem crescente de corrente. Estes foram identificados por um pulsão do tipo numérico para posterior análise.

Figura 21: corpos de prova soldados: a) chapas enumeradas de 1-9; b) chapas enumeradas de 10-18



a)



b)

Fonte: elaborada pelo autor

4.4 Preparação dos Corpos de Prova para Metalografia

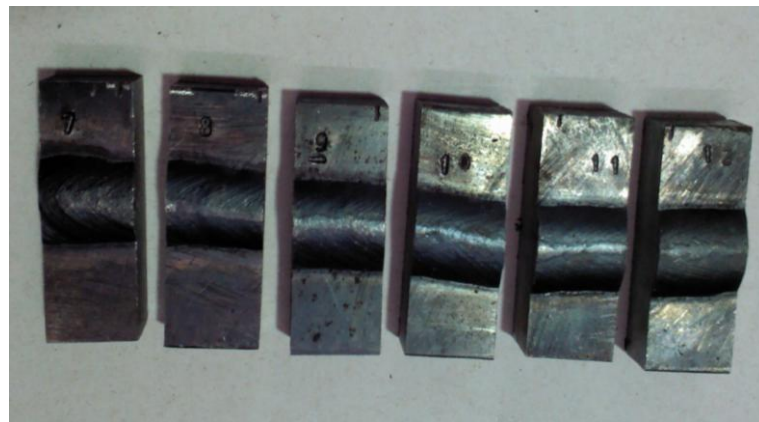
Após soldadas, as chapas foram cortadas na máquina de corte FM 1600, marca

FRANHO (ver Figura 22-a), em seções com dimensão 50x20x12,7(mm), de maneira que esse corte abrangesse a região mais homogênea do cordão. A Figura 22-b mostra algumas das seções cortadas.

Figura 22: a) Representação da máquina de corte e de b) algumas peças já cortadas.



a)



b)

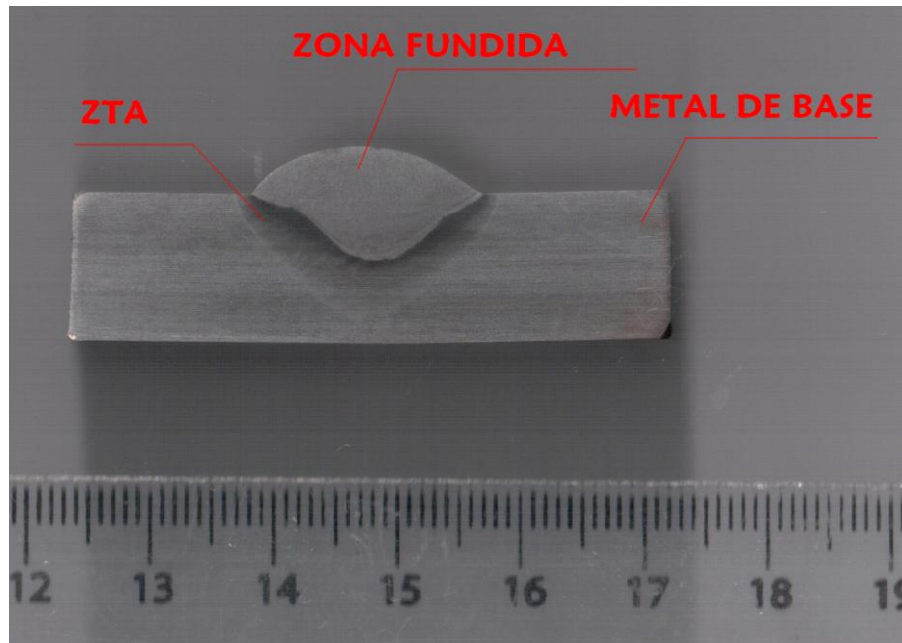
Fonte: elaborada pelo autor

3.6 Metalografia (Macrografia)

Essa etapa se assemelha com a do item 4.1 de caracterização do material, passando por lixas de numeração 240, 320, 400 e 600 em politriz, seguido de ataque químico diferentemente da chapa de referência, com Nital 5%. Com esse procedimento foi possível visualizar claramente o cordão da solda, assim como a largura do mesmo, a ZTA, o reforço e a penetração da solda.

A figura a seguir mostra um exemplo de um dos corpos de prova atacados pelo reagente químico realçando as regiões que sofreram variações do ciclo térmico.

Figura 23: identificação de regiões que sofreram variações térmicas no corpo de prova nº15.



Fonte: elaborada pelo autor

4.6 Efeito dos parâmetros de soldagem

Ao realizar a solda nos CP's de aço SAE 1045, foram fixados alguns parâmetros de soldagem, como citado no item 3.3.8: a tensão aplicada, a velocidade de soldagem, a DBCP, o fluxo e o arame, variando somente a corrente. A partir disso elaborou-se a Tabela 6 a fim de mostrar os resultados obtidos, principalmente os valores da corrente para cada uma das 18 peças soldadas.

Além disso, o par arame-fluxo utilizado durante a solda a arco submerso foi identificado como sendo para fluxo o 1081 W, segundo a norma ASME SFA-5.23, da marca ESAB e para arame, foi utilizado o SSA 5.17 EL12, com base na norma AWS/ASME específico para soldagem de aço SAE1020

Tabela 6: Dados dos parâmetros de soldagem

Corpo de prova	Tensão Aplicada (V)	Velocidade de Soldagem (cm/min)	DBCP (mm)	Corrente (A)
1	32	15	19	200
2	32	15	19	240
3	32	15	19	280
4	30	15	19	300
5	32	15	19	320
6	30	15	19	340
7	30	15	19	360
8	30	15	19	380
9	30	15	19	400
10	30	15	19	420
11	30	15	19	460
12	32	15	19	480
13	30	15	19	500
14	30	15	19	520
15	30	15	19	580
16	28	15	19	600
17	30	15	19	620
18	28	15	19	640

Fonte: Elaborada pelo autor

4.7 Avaliação da Microdureza ao Longo da Solda

Para avaliar a dureza utilizou-se o microdurômetro modelo HMV-2, fabricado pela SHIMADZU (ver Figura 24), com indentador Vickers. Para iniciar as medições fez-se a “tara” do aparelho, para que dados anteriores não interferissem na medição, além de observar se o corpo de prova estava retilíneo e polido. Nesse caso, os corpos de prova não estavam polidos, mas recomenda-se fazer o polimento antes porque pode ocorrer de não visualizar as impressões.

A medição da microdureza foi realizada em pontos estratégicos dos corpos de prova soldados de forma que onde o indentador penetrasse identificaria a dureza nas regiões pré-definidas, as quais sofreram alterações devido às variações do ciclo térmico, causadas pelo processo de soldagem a arco submerso.

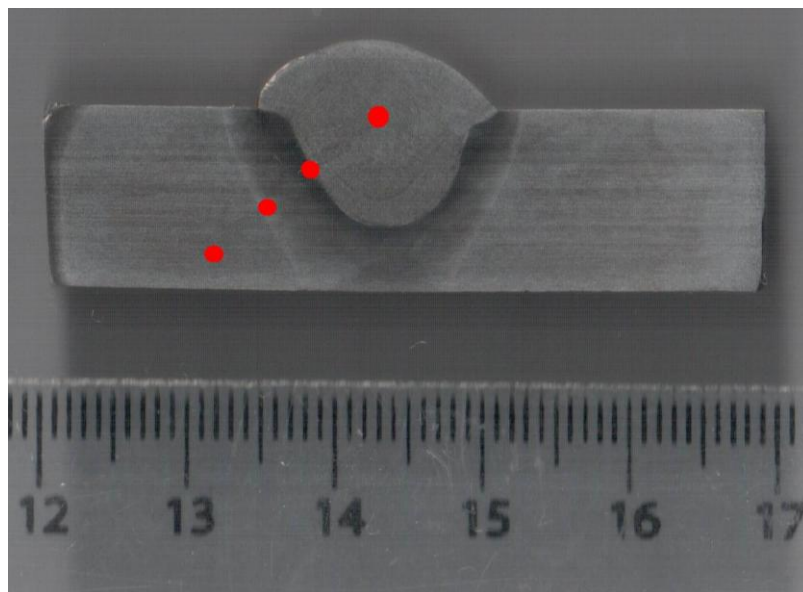
Figura 24: Aparelho de microdureza HMV-2, marca SHIMADZU.



Fonte: Elaborada pelo Autor

Foram feitas cinco medições no material de referência (estado inicial) e quatro em cada um dos 18 corpos de prova (Fig. 25), sendo uma na ZF, duas na ZTA e uma no MB, conforme Figura 25. As condições adotadas para iniciar as medições foram: aplicação de uma carga de 0,5Kg; tempo de aplicação de 15 segundos e ampliação de 400x.

Figura 25 - Identificação dos pontos a serem medidos a microdureza.



Fonte: Elaborada pelo autor

5 Resultados do teste de soldagem variando a intensidade da corrente.

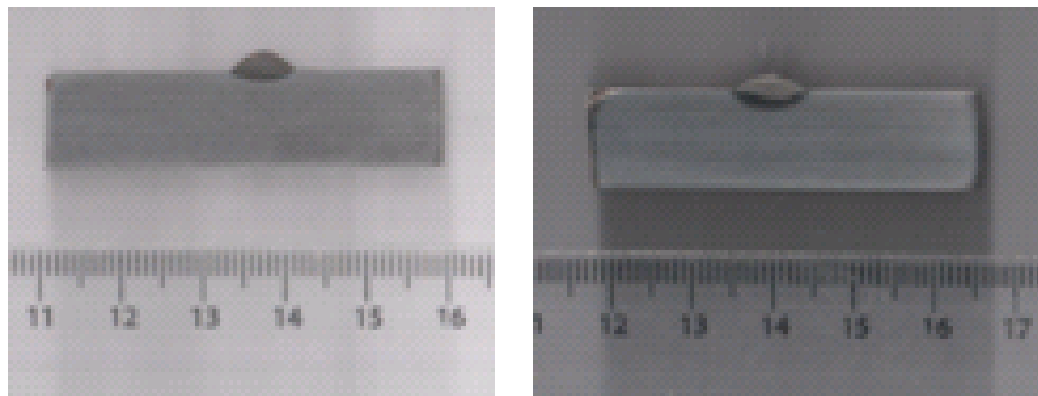
4.1 Aspectos do cordão soldado

Após realizar os procedimentos de preparação, soldagem e metalografia nos corpos de prova, foi possível visualizar as regiões que sofreram variações do ciclo térmico como exposto no item 4.6, variando as condições de corrente. A Figura 26 representa os corpos de prova soldados.

Visualizadas as regiões nas imagens dos CP's, a Tabela 7 a seguir mostra os dados obtidos a partir da utilização do software AutoCAD, para calcular as dimensões da largura, penetração e reforço de cada uma dessas peças soldadas.

Vale ressaltar a presença da trinca no CP 18 da Figura 26, que pode estar relacionada tanto a limpeza da peça antes do procedimento da soldagem, assim como a umidade do fluxo utilizado.

Figura 26 – Imagens dos 18 CP's soldados e atacados por Nital 5%

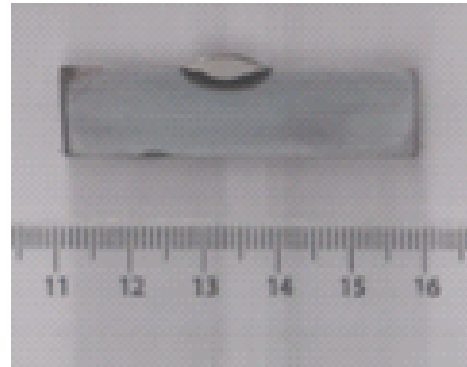


1

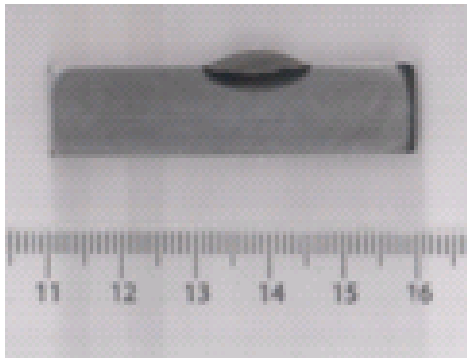
2



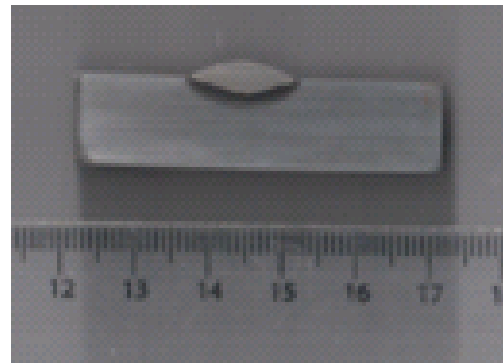
3



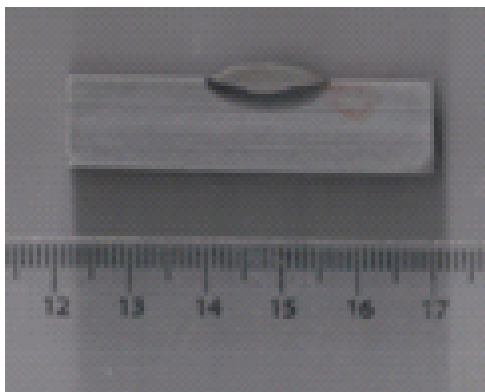
4



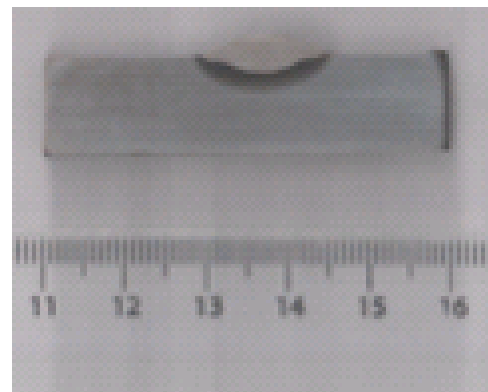
5



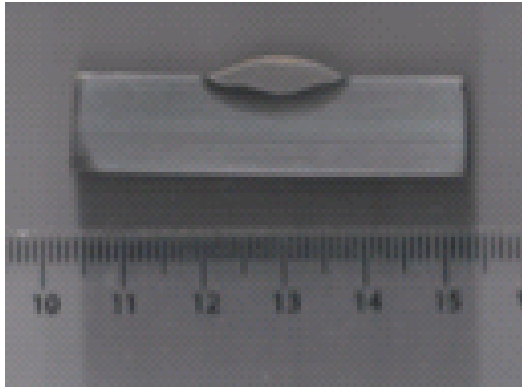
6



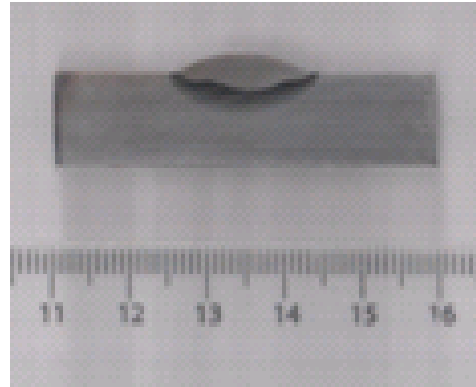
7



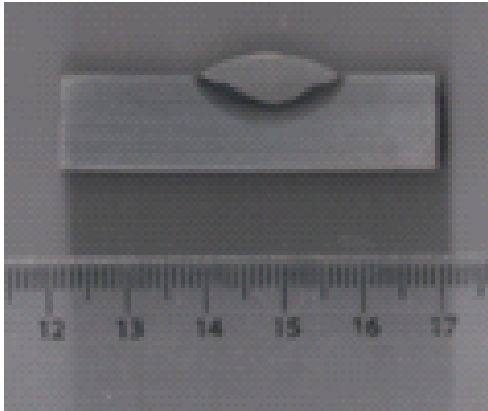
8



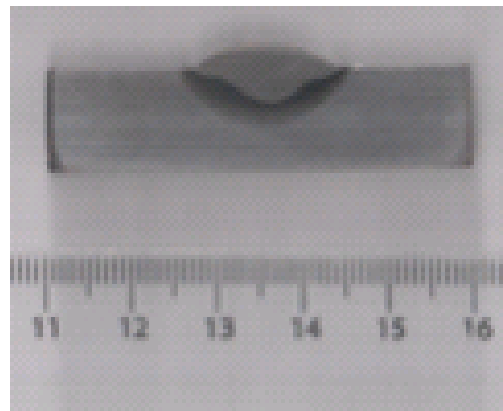
9



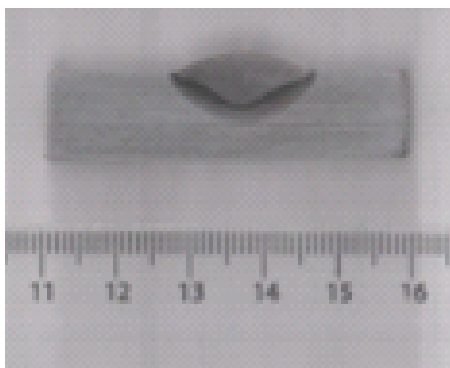
10



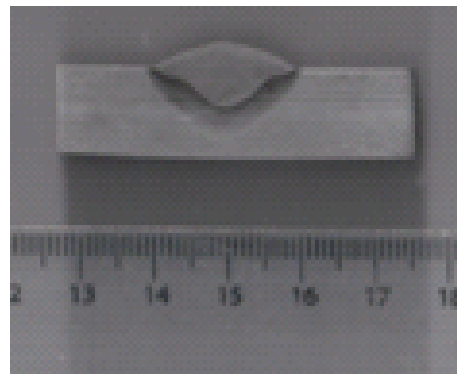
11



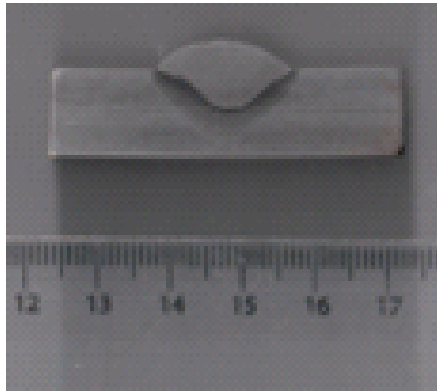
12



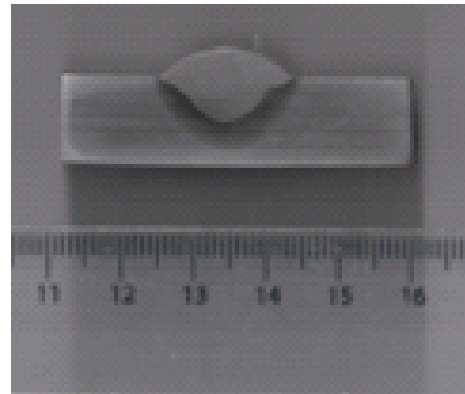
13



14



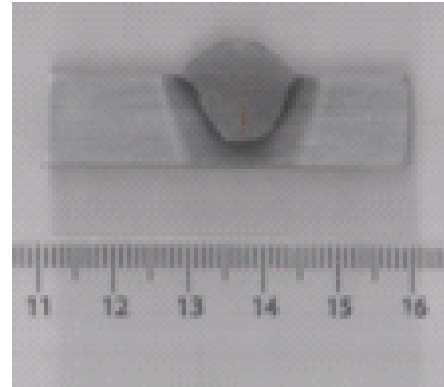
15



16



17



18

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 7 – Resultados do aspecto do cordão

Corpo de prova	Largura do cordão (mm)	Pentração (mm)	Reforço (mm)
1	7,61	1,25	2,11
2	9,04	1	1,69
3	10,73	0,71	2,66
4	11,8	1,72	1,89
5	13,33	1,14	2,22
6	14,11	1,97	2,08
7	15,17	2	1,98
8	15,19	2,11	2,58
9	16,84	2,43	2,43

Corpo de prova	Largura do cordão (mm)	Pentração (mm)	Reforço (mm)
10	17,45	2,26	2,59
11	17,49	3,4	3,04
12	17,46	3,84	3,29
13	18,24	4,48	2,79
14	19,08	5,39	3,43
15	18,74	5,33	3,93
16	18,4	6,22	3,89
17	16,27	7,93	4,57
18	16,57	8,82	4,87

Fonte: Elaborada pelo autor

5.2 Aspectos na dureza dos corpos de prova

Os dados referentes as medições de microdureza foram obtidos conforme descrito no item 4.7. Os resultados para o material de base, no estado inicial, está disposto na Tabela 8.

Tabela 8- Resultados da microdureza do material de base

Medição	Dureza Vickers (HV)
1	171
2	180
3	178
4	165
5	176

Fonte: Elaborada pelo autor

O valor médio para o metal de base foi de 174HV. Já os resultados da microdureza para as os CP's soldados, nos quais variou somente a intensidade da corrente estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 Resultado da microdureza dos CP's já soldados

Corpo de Prova	Região	Dureza Vickers (HV)	Corpo de Prova	Região	Dureza Vickers (HV)
1	ZF	251	10	ZF	214
	ZTA ¹	-		ZTA ¹	250
	ZTA ²	-		ZTA ²	190
	MB	195		MB	164
2	ZF	310	11	ZF	225
	ZTA ¹	290		ZTA ¹	275
	ZTA ²	-		ZTA ²	166
	MB	199		MB	187

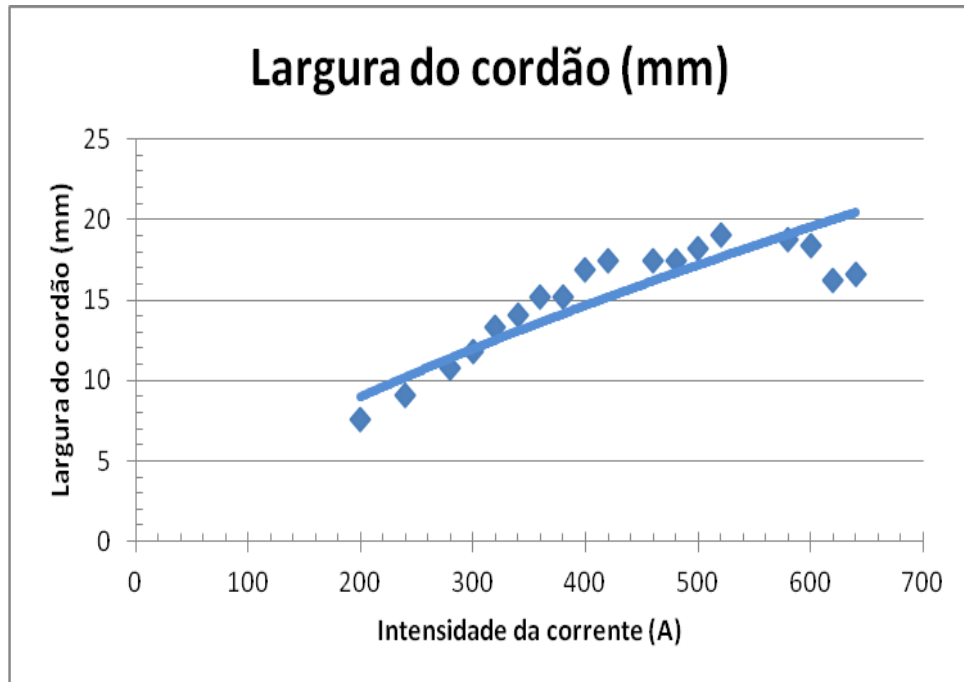
Corpo de Prova	Região	Dureza Vickers (HV)	Corpo de Prova	Região	Dureza Vickers (HV)
3	ZF	229	12	ZF	208
	ZTA ¹	298		ZTA ¹	218
	ZTA ²	219		ZTA ²	186
	MB	171		MB	184
4	ZF	290	13	ZF	203
	ZTA ¹	324		ZTA ¹	232
	ZTA ²	248		ZTA ²	187
	MB	168		MB	155
5	ZF	287	14	ZF	213
	ZTA ¹	278		ZTA ¹	226
	ZTA ²	211		ZTA ²	171
	MB	181		MB	167
6	ZF	255	15	ZF	203
	ZTA ¹	292		ZTA ¹	252
	ZTA ²	233		ZTA ²	203
	MB	180		MB	177
7	ZF	244	16	ZF	197
	ZTA ¹	259		ZTA ¹	248
	ZTA ²	192		ZTA ²	199
	MB	178		MB	179
8	ZF	244	17	ZF	193
	ZTA ¹	287		ZTA ¹	206
	ZTA ²	222		ZTA ²	193
	MB	174		MB	182
9	ZF	224	18	ZF	179
	ZTA ¹	267		ZTA ¹	211
	ZTA ²	195		ZTA ²	177
	MB	146		MB	175

Fonte: Elaborada pelo autor

5.3 Análise da influência do aumento da intensidade da corrente sobre as características dos cordões de solda.

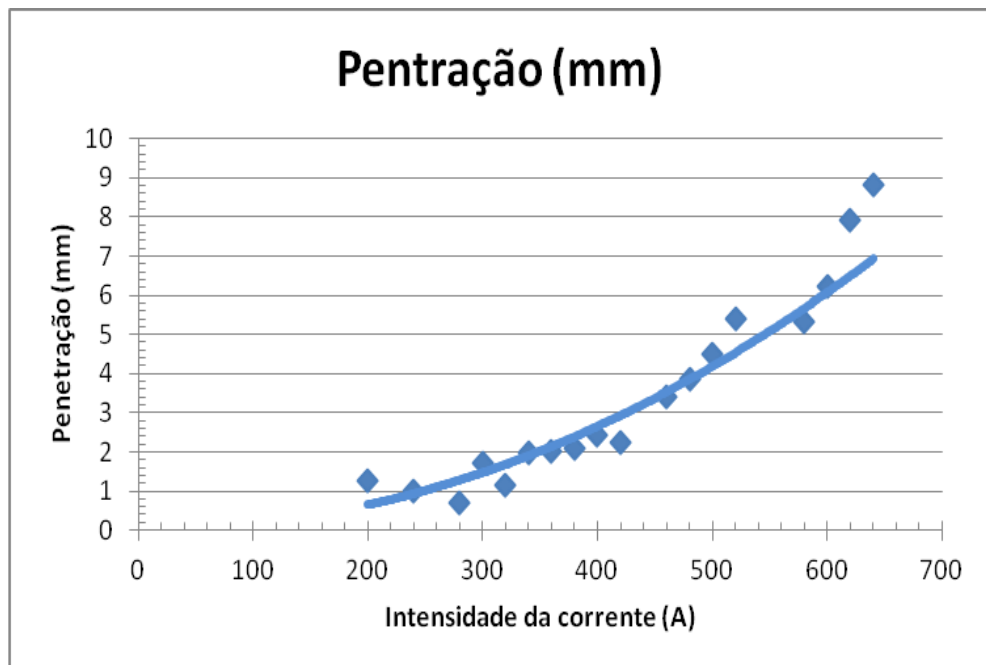
As características do cordão de solda que foram utilizados para análises nesta seção foram: largura, penetração e reforço. Os gráficos nas Figuras 27, 28 e 29 mostram as alterações nessas características devido à mudança na intensidade da corrente de acordo com o que foi comentado no item 2.3.8. Como esperado, a medida que se aumentou o valor da intensidade da corrente, aumentou também a penetração e a taxa de deposição, afetando diretamente na largura do cordão e reforço do mesmo. Isso ocorre devido ao aporte térmico que é transferido para o metal, ou seja, a quantidade de energia gerada pelo processo de soldagem que é transferido para o metal de base aumenta a taxa de fusão do eletrodo, assim como a quantidade de material fundido transferido a região soldada.

Figura 27- Influência da intensidade da corrente sob a largura do cordão.



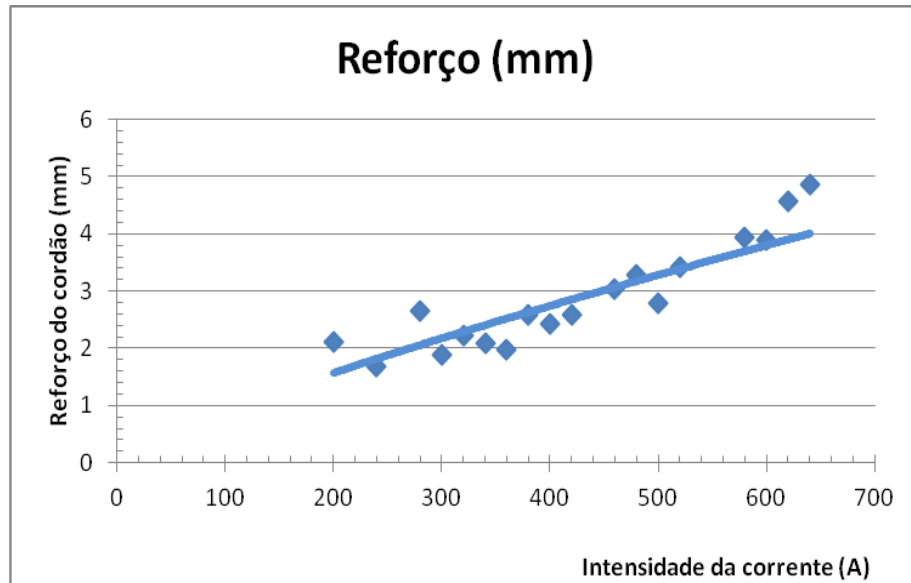
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 28 - Influência da intensidade de corrente sob a penetração do cordão.



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 29 - Influência da intensidade da corrente sob o reforço do cordão.

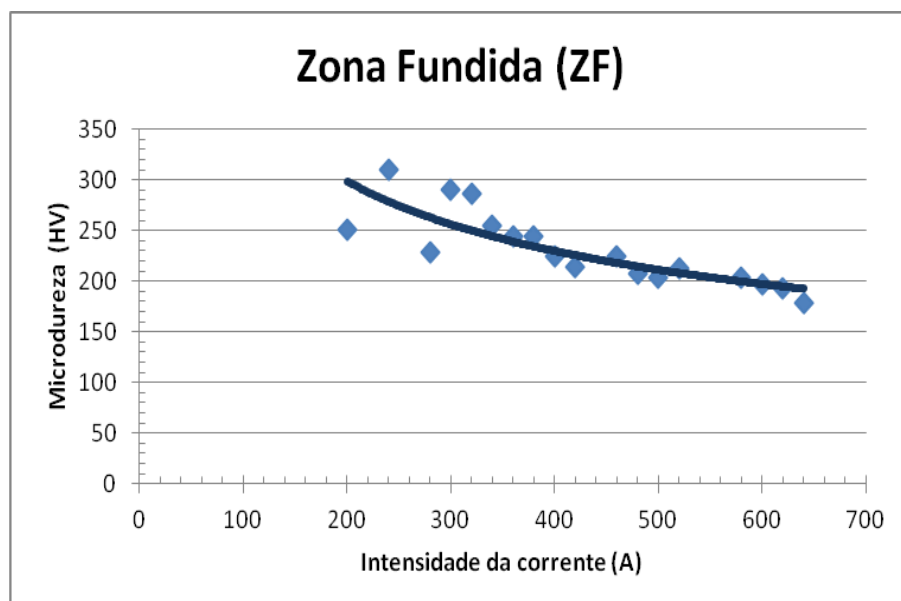


Fonte: Elaborada pelo autor

5.4 Análise da microdureza com a variação da corrente aplicada

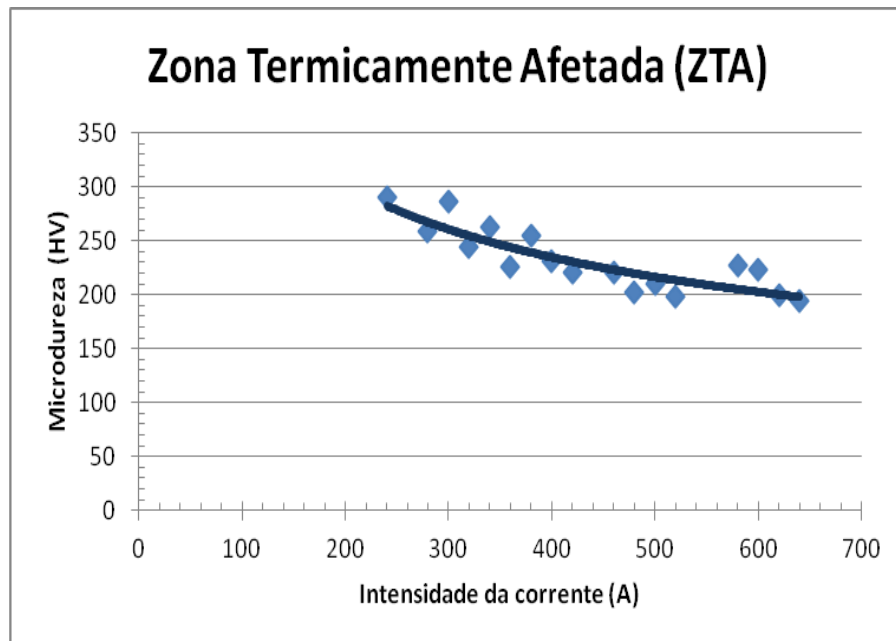
Os resultados do teste de microdureza foram expostos no item 5.1.3 e esses foram comparados com a intensidade da corrente aplicada, a fim de verificar se a variação do aporte térmico nos CP's também influenciaria a dureza nas regiões estudadas. As figuras 30, 31 e 32 apresentam essa comparação.

Figura 30 - Influência da intensidade da corrente na microdureza da ZF



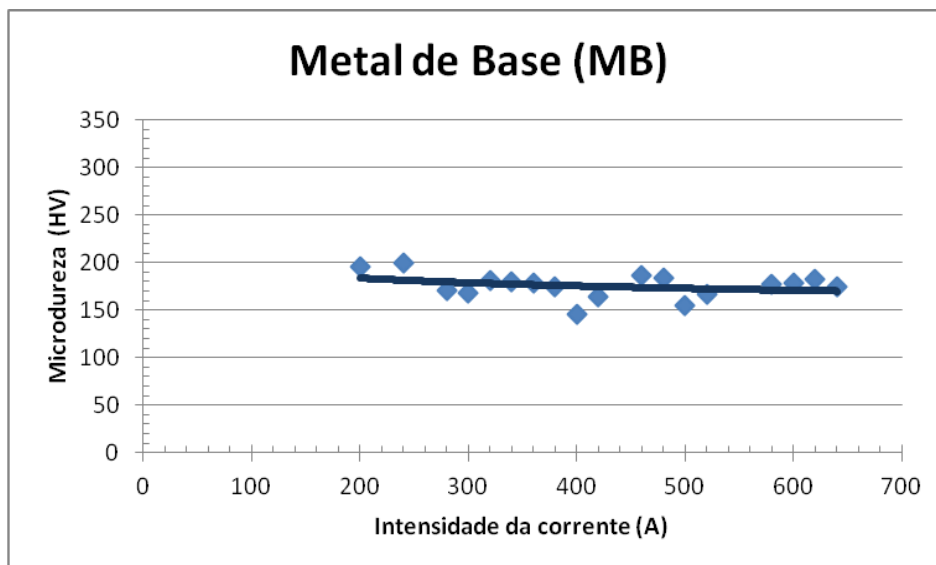
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 31 - Influência da intensidade da corrente na microdureza média dos CP's na ZTA



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 32 - Influência da intensidade da corrente na microdureza do MB



Fonte: Elaborada pelo autor

De maneira geral, houve uma tendência ao decréscimo do valor da microdureza nas regiões ZF e ZTA com o aumento da intensidade de corrente, se comparado com a dureza do material no estado inicial. Observa-se que isso ocorreu porque nos dois primeiros CP's, a formação do cordão não foi completa, houve apenas formação de gotas fundidas, o que

provavelmente proporcionou um resfriamento rápido, semelhante ao processo de têmpera, formando possivelmente estruturas aciculares do tipo martensita ou ferrita acicular, ou ainda um outro tipo de estrutura difusional, perlita ultra-fina, elevando assim o valor da dureza. Já os CP's que foram soldados com intensidades de correntes mais altas, tiveram largura, penetração e reforço do cordão soldado aumentados, o que necessitou de maior tempo para resfriamento da junta soldada, ocasionando a transformação da austenita em perlita e ferrita, reduzindo os valores da dureza.

Quanto ao MB, pode-se dizer que as divergências em relação ao material no estado inicial são poucas e podem ser explicadas pela região escolhida para o indentador fazer a medição da microdureza, uma vez que poderiam estar próximas a região da ZTA que ainda está sob efeito do ciclo térmico.

6 Conclusão

De acordo com os resultados obtidos neste trabalho pela variação da intensidade da corrente comparada com a microdureza, a largura, a penetração e o reforço dos cordões soldados pode-se concluir que:

- Com o aumento da intensidade da corrente os aspectos dos cordões de solda tendem a aumentar nas regiões analisadas (largura, penetração e reforço).
- Os resultados de microdureza encontrados para ZF e ZTA apresentaram valores bem distantes do metal de base, cerca de 70% mais alto para maior variação e 10% mais alto para a menor.
- Em geral, com o aumento da intensidade da corrente os resultados da microdureza na ZF e na ZTA tenderam a um decréscimo.
- Os resultados do ensaio de microdureza da ZF apresentaram variações significativas nos primeiros CPs, se comparados com a microdureza do metal de base. Isso se deve ao fato da formação de possíveis estruturas aciculares geradas pelo resfriamento rápido das gotas fundidas, aumentando a dureza e equiparando-se ao processo de têmpera.
- Sugere-se que o material utilizado, aço SAE 1045, não pode ser soldado pelo processo SAW sob as condições estabelecidas devido às grandes variações de dureza que ocorreram.

7 Sugestões para trabalhos futuros

- Fazer os testes com pré e pós aquecimento.
- Fazer perfil de dureza.
- Utilizar mais de um CP para análise de cada parâmetro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aula de soldagem. Demet UFMG. Disponível em:

<<http://www.demet.ufmg.br/grad/disciplinas/emt019/processo.pdf>>. Acesso: 10 out. 2012.

Apostila de soldagem: Disponível em:

<<http://www.ebah.com.br/content/ABAAABEKUAJ/apostila-soldagem-2007?part=3>>.

Acesso: 14 set. 2012.

CALLISTER, William D. Jr.; **Ciência e Engenharia de Materiais. Uma introdução.** Rio de Janeiro; Ed. LTC, 2002.

CHIAVERINI, Vicente. **Aços e ferros fundidos.** 7. Ed. São Paulo; Ed. ABM, 2008.

COLPAERT, Hubertus. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns.** 4. ed. São Paulo; Ed. Edgard Bluncher, 2008.

CUNHA, Lelis José G. da. **Solda: como, quando e por quê.** 2. ed. Porto Alegre; Ed. Sagra, 1989.

Curso técnico em mecânica- Instituto Federal de Santa Catarina, Campus Joiville.

Disponível em: <<http://www.joinville.ifsc.edu.br/~valterv/Soldagem/Aula%2001%20-Tecnologia%20da%20Soldagem.pdf>> . Acesso: 28 out. 2012.

Equipamento de arco submerso - **Classificação e utilização de processos de soldagem.**

Disponível em: <<http://mecanica-blog.blogspot.com.br/2010/05/classificacao-e-utilizacao-de-processos.html>>. Acesso: 30 out. 2012

ESAB. **Arco Submerso.** 24 maio 2004. (Apostila). Disponível em:

<http://www.esab.com.br/br/por/Instrucao/biblioteca/upload/1901100rev0_ApostilaArcoSubmerso.pdf>. Acesso: 28set.2012

ESAB. **Metalurgia da soldagem.** 15 abr. 2004. Cap.6. (Apostila). Disponível em:

<<http://www.esab.com.br/br/por/Instrucao/apostilas/upload/Apostila-Metalurgia-da-Soldagem.pdf>>. Acesso: 28out.2012

GUERRA, Ivan Machado. **Soldagem & Técnicas Conexas: Processos.** Porto Alegre; [s.n.], 1996.

MODENESI, Paulo J. VILLANI, Paulo Marques. **Introdução aos processos de soldagem**. Belo Horizonte, 2006. (Apostila). Disponível em: <<http://www.demet.ufmg.br/grad/disciplinas/emt019/processo.pdf>>. Acesso em : 17set.2012

Par arame fluxo. Disponível em: <<http://energyarc.com.br/site/>>. Acesso: 4 jan. 2013.

PEIXOTO, Ivete Pinheiro Silva. M ARY, Rachel Osthues. FERREIRA, Wanderlei de Freitas. **Metalografia**. (Apostila). Belo Horizonte, 2011.

SENAI-PR. **Soldagem. Processo de Eletrodo Revestido. Histórico da soldagem**. Paraná, 2002. (Apostila). Disponível em: <<http://pt.scribd.com/doc/55778729/1/HISTORICO-DA-SOLDAGEM>>. Acesso: 17ago.2012

SOUZA, Antônio C. **Lincoln Electric. Consumíveis de soldagem**. (Apostila). Disponível em: <<http://pt.scribd.com/doc/49463745/Nomenclatura-de-Soldagem>>. Acesso: 4out.2012

UNISANTA. **Soldagem dos metais. Soldagem a arco submerso**. Santa Catarina, cap. 6. Disponível em: <<http://cursos.unisanta.br/mecanica/ciclo10/CAPIT6.pdf>>. Acesso em: 4out.2012

WAINER, Emílio. DUARTE, Sérgio Brandi. DÉCOURT, Fábio Homem de Mello. **Soldagem – processos e metalurgia**. São Paulo; Ed. Edgard Bluncher LTDA, 1992.