

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

**RHAYSSA MELO LEMOS**

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE TRÊS DIFERENTES  
TIPOS DE MATERIAIS SUBMETIDOS ÀS MESMAS CONDIÇÕES DE  
SOLDAGEM PELO PROCESSO A ARCO SUBMERSO**

**BELO HORIZONTE**

**2013**

RHAYSSA MELO LEMOS

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE TRÊS DIFERENTES TIPOS DE  
MATERIAIS SUBMETIDOS ÀS MESMAS CONDIÇÕES DE SOLDAGEM PELO  
PROCESSO A ARCO SUBMERSO

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 do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Joel Romano Brandão

Co-orientadora: Maria Celeste Monteiro de Souza Costa

BELO HORIZONTE

2013

RHAYSSA MELO LEMOS

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE TRÊS DIFERENTES  
TIPOS DE MATERIAIS SUBMETIDOS ÀS MESMAS CONDIÇÕES DE  
SOLDAGEM PELO PROCESSO A ARCO SUBMERSO**

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 do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Aprovado em 22/08/2013

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Joel Romano Brandão CEFET-MG

---

Profa. Dra. Maria Celeste Monteiro de Souza Costa (Co-orientadora) CEFET-MG

---

Profa. Dra. Elaine Carballo Siqueira Correa CEFET-MG

## **AGRADECIMENTOS**

Ao professor Joel, por ter embarcado comigo bravamente nesta aventura, mesmo sem imaginar o que lhe esperava. Pelo carinho, constante companheirismo e boa vontade.

À professora Maria Celeste, por ter se unido a nós, complementando-nos perfeitamente naquilo em que éramos deficientes. Pela sua disponibilidade e dedicação.

À professora Elaine, a fofa que sempre se preocupa, que não nega uma ajuda nem mesmo quando sua agenda não a deixa respirar. Pelas suas palavras de conforto e carinho.

Ao professor Wanderlei, que sempre se encontra disponível para nos ouvir e nos ajudar com seu enorme coração.

À minha querida irmã companheira de TCC, Ingrid, que me acompanhou, compartilhou seu tempo, seus conhecimentos, informações e sempre conseguia enxergar o lado bom das coisas.

Aos meus pais, pelo apoio, carinho e conforto que me proporcionaram durante toda minha vida.

Ao Alex, que está sempre ao meu lado, meu eterno companheiro. Pelo amor e, principalmente, pela paciência. Pelos momentos em que me fez desfrutar das coisas mais simples, e que também me fez amadurecer e enfrentar com força e determinação.

A todos os funcionários da CélioPlásticos LTDA pelo companheirismo.

A todos meus colegas do CEFET-MG pelos anos de convivência.

A todas as pessoas que, direta, ou indiretamente, me ajudaram neste trabalho.

## **RESUMO**

O presente trabalho visa estudar o comportamento mecânico de três aços diferentes, o A36, um aço similar ao 1020, o aço 4140 e o aço 1045 antes e depois do processo de soldagem a arco submerso (SAW). A caracterização dos materiais ocorreu em amostras controle através de micrografias e macrografias. A avaliação mecânica dos materiais foi realizada através de ensaios de microdureza Vickers. Os resultados obtidos confirmam que todos os aços sofrem aumento em sua dureza quanto mais próximo da zona fundida, devido a mudanças em sua microestrutura e evidencia a formação de martensita no aço 4140 após a soldagem.

Palavras-chave: Soldagem SAW. Microdureza. Martensita.

## **ABSTRACT**

The present work aims to study the mechanical behavior of three different steels, the A36, a steel similar to 1020, the 4140 steel and 1045 steel, before and after the process of submerged arc welding (SAW). The characterization of the materials occurred in control samples by micrographs and macrographs. The mechanical evaluation of materials was performed through the Vickers microhardness. The results confirmed that all the steels suffer an increase in hardness closer the weld zone due to changes in the microstructure and reveals the formation of martensite on 4140 steel after welding.

Key-words: Welding SAW. Microhardness. Martensite.

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	10
1.1.	Justificativa e relevância .....	10
2	OBJETIVO DO TRABALHO .....	11
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	12
3.1	Soldagem.....	12
3.2	Arco elétrico.....	15
3.3	Efeitos da soldagem .....	19
3.4	Soldagem a Arco Submerso .....	23
3.4.1	Tipos de fluxo .....	27
3.5	Aços AISI.....	29
3.5.1	Aço AISI 1020 .....	30
3.5.2	Aço AISI 1045 .....	32
3.5.3	Aço AISI 4140 .....	33
4.	MATERIAIS E MÉTODOS .....	35
4.1	Caracterização do material.....	36
4.2	Preparação dos corpos de prova para soldagem.....	37
4.3	Soldagem dos corpos de prova.....	38
4.4	Caracterização .....	41
4.4.1	Preparação dos corpos de prova para metalografia.....	41
4.4.2	Análise metalográfica.....	43
4.4.3	Controle dimensional .....	45
4.4.4	Ensaio de microdureza.....	48
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	51
5.1	Análise metalográfica.....	51
5.2	Controle dimensional do cordão .....	54
5.3	Análise do comportamento mecânico - microdureza.....	56
6	CONCLUSÃO .....	60
7.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	61
8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	62

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Gráfico da variação da energia potencial em função da distância para um sistema composto de dois átomos.....	12
Figura 2 - Esquema da formação da poça de fusão com o metal de adição e de base e forma da solda.....	13
Figura 3 - Tipos de junta .....	14
Figura 4 - Tipos de chanfro .....	14
Figura 5 - Posições de soldagem .....	15
Figura 6 - Imagem do arco elétrico observado no processo TIG .....	16
Figura 7 - Regiões esquemáticas de um arco elétrico .....	17
Figura 8 - Representação esquemática da formação do plasma .....	18
Figura 9 - Esquema da seção transversal de uma peça fundida com suas três zonas.....	20
Figura 10 - Metalografia da região de transição entre a ZTA e a ZF de um aço inoxidável ferrítico. Constata-se a continuidade dos grãos da ZTA na ZF.....	21
Figura 11 - Estrutura da ZTA de um aço baixo carbono .....	22
Figura 12 - Equipamento para soldagem a arco submerso. (a) Desenho esquemático; (b) equipamento industrial .....	24
Figura 13 - Preparação para soldagem a arco submerso .....	25
Figura 14 - Sistema de classificação de consumíveis para soldagem a arco submerso, segundo a especificação AWS A 5.17 .....	26
Figura 15 - Aspectos dos grãos de fluxo aglomerado .....	27
Figura 16 - Forno elétrico utilizado para a fabricação de fluxo fundido.....	28
Figura 17 - Aspecto dos grãos de fluxo fundido .....	28
Figura 18 - Aço ABNT 1020, 346X .....	32
Figura 19 - Fotomicrografia de um aço AISI 1045 .....	33
Figura 20 - Micrografia do aço AISI 4140 após a normalização: (a) e (b) aumentos distintos	34
Figura 21 - Fluxograma experimental .....	35
Figura 22 - Peça e sua respectiva amostra controle após corte .....	37
Figura 23 - Esmeril utilizado para preparação dos corpos de prova .....	38
Figura 24 - Equipamento para soldagem a arco submerso do CEFET-MG.....	39
Figura 25 - Gabarito utilizado durante a soldagem a arco submerso .....	39
Figura 26 - Posição do gabarito em relação ao equipamento de soldagem a arco submerso ...	40
Figura 27 - Corpo de prova de aço A36 após soldagem a arco submerso.....	41

Figura 28 - Amostra controle de aço 4140 durante embutimento a frio .....	41
Figura 29 - Co-polímeros utilizados para embutimento a frio .....	42
Figura 30 - Serra em fita.....	42
Figura 31 - Serra do equipamento utilizado para corte dos corpos de prova .....	43
Figura 32 - Lixadeira utilizada para lixar as amostras.....	43
Figura 33 - Politriz utilizada para polir as amostras controle.....	44
Figura 34 - Vidro de relógio com Nital 5% .....	45
Figura 35 - Microscópio óptico .....	45
Figura 36 - Gráfico comparativo das dimensões das amostras .....	48
Figura 37 - Equipamento de microdureza .....	49
Figura 38 - Esquema de escolha dos pontos para medição de microdureza nas amostras .....	50
Figura 39 - Micrografia (MO) do aço A36 antes do processo de soldagem: aumentos de (a) 200X (b) 400X.....	51
Figura 40 - Micrografia (MO) do aço 1045 antes do processo de soldagem: aumentos de (a) 200X (b) 400X.....	52
Figura 41 - Micrografia (MO) do aço 4140 antes do processo de soldagem: aumentos de (a) 200X (b) 400X.....	52
Figura 42 - Macrografia das amostras controle do aço (a) A36, (b) 4140 e (c) 1045 .....	53
Figura 43 - Macrografia da amostra soldada do aço A36.....	53
Figura 44 - Macrografia da amostra soldada do aço 4140 .....	53
Figura 45 - Macrografia da amostra soldada do aço 1045 .....	54
Figura 46 - Gráfico comparativo das dimensões dos cordões .....	55
Figura 47 - Gráfico comparativo dos valores de microdureza .....	59

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais famílias de aços conforme a classificação ABNT (similar a AISI e SAE) .....	30
Tabela 2 - Composição química do aço AISI 1020 especificada (%).....	31
Tabela 3 - Propriedades do aço 1020 laminado, normalizado e recozido .....	31
Tabela 4 - Composição química do aço AISI 1045 especificada(%) .....	32
Tabela 5 - Composição química do aço AISI 4140 especificada (%).....	33
Tabela 6 - Propriedades do aço 4140 normalizado e recozido .....	34
Tabela 7 - Composição química do aço A36.....	36
Tabela 8 - Composição química do aço 1045.....	36
Tabela 9 - Composição química do aço 4140.....	36
Tabela 10 - Dimensões das amostras de aço A36 (mm) .....	46
Tabela 11 - Dimensões médias apresentadas pelas amostras de aço A36 (mm).....	46
Tabela 12 - Dimensões das amostras de aço 1045 em mm .....	46
Tabela 13 - Dimensões médias apresentadas pelas amostras de aço 1045.....	47
Tabela 14 - Dimensões das amostras de aço 4140 em mm .....	47
Tabela 15 - Dimensões médias apresentadas pelas amostras de aço 4140.....	47
Tabela 16 - Dimensões do cordão de solda para o aço A36.....	54
Tabela 17 - Dimensões do cordão de solda para o aço 1045.....	54
Tabela 18 - Dimensões do cordão de solda para o aço 4140.....	55
Tabela 19 - Resultados de microdureza Vickers para amostras controle (HV).....	56
Tabela 20 - Resultados de microdureza Vickers para amostras de aço A36 (HV) .....	56
Tabela 21 - Resultados de microdureza Vickers para amostras de aço 1045 (HV) .....	57
Tabela 22 - Resultados de microdureza Vickers para amostras de aço 4140 (HV) .....	58

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1. Justificativa e relevância

A soldagem é um processo de união de peças, também utilizada para a deposição de um material sobre o outro, sendo esta com o fundamento de recuperar peças desgastadas ou para formar um revestimento com características especiais desejadas. A soldagem por fusão envolve a escolha de um eletrodo correto para o material a ser soldado e uma temperatura adequada, que permite a fusão do eletrodo e do metal de base, com a deposição do metal de adição que se encontra no eletrodo, sobre o metal base. Com a solidificação, a solda é formada.

A soldagem é, hoje, um dos processos mais utilizados na união de peças metálicas e apresenta uma grande versatilidade quanto à espessura e ao tipo da liga metálica a ser utilizada. Porém, a soldagem pode apresentar alguns efeitos negativos, como distorção e tensões residuais, além de mudanças na microestrutura e, conseqüentemente, alteração das propriedades mecânicas do material.

A soldagem a arco submerso é um processo de soldagem por fusão, no qual o calor requerido para a fusão do metal é gerado por um arco elétrico que se forma enquanto a corrente passa entre o arame de soldagem e a peça de trabalho a ser soldada. Durante o processo, a ponta do arame, o arco elétrico e a peça são cobertos por uma camada de um material mineral granulado, que é conhecido como fluxo para soldagem a arco submerso. Na soldagem a arco submerso, o arco não é visível e não gera faíscas, respingos ou fumaça.

Para a fusão do eletrodo e de parte do metal base, há uma fonte de calor que se desloca ao longo do material. Isso faz com que se gere uma variação de temperatura em função do tempo em cada ponto da peça, que pode levar à formação de uma zona termicamente afetada. O estudo de uma possível mudança da microestrutura e das propriedades metalúrgicas de uma peça se faz necessário para saber até que ponto a soldagem pode afetar nas propriedades mecânicas do material.

## 2 OBJETIVO DO TRABALHO

O objetivo principal desse trabalho é analisar os efeitos da soldagem a arco submerso sobre os aços A36, 1045 e 4140 e verificar se esses efeitos afetam as propriedades mecânicas do material e o que fazer para minimizar os problemas apresentados.

Como objetivos específicos, tem-se:

- Analisar as propriedades mecânicas e metalúrgicas dos aços em estudo como recebidos;
- Realizar a soldagem dos corpos de prova com o equipamento de soldagem a arco submerso;
- Analisar as propriedades mecânicas e metalúrgicas dos aços em estudo após a soldagem;
- Verificar se houve mudança nas propriedades mecânicas e, se houver, em que elas irão interferir e como fazer a fim de amenizar estes problemas.

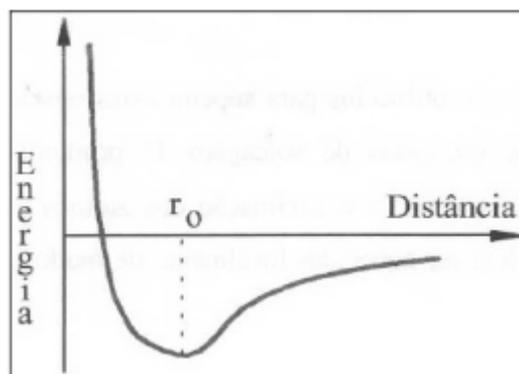
### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Soldagem

A soldagem é definida como o “processo de união de materiais baseado no estabelecimento de forças de ligação química de natureza similar às atuantes no interior dos próprios materiais, na região de ligação entre os materiais que estão sendo unidos” (MARQUES et al, 2011). De acordo com a Associação Americana de Soldagem (AWS), “Soldagem é o processo de união de materiais que visa obter a coalescência (união) localizada de metais e não-metais, produzida pelo aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem aplicação de pressão e/ou de metal de adição”.

Considerando uma peça metálica, os átomos localizados no interior da estrutura cristalina, cercados por átomos vizinhos próximos a uma distância  $r_0$  possuirão uma energia de sistema mínima, conforme figura 1. Porém, os átomos da superfície fazem ligações com menos átomos vizinhos e não estão no estado de menor energia e, como tende a ir para um estado de menor energia, um átomo da superfície se ligaria a outro quando houvesse a aproximação de duas peças a uma distância suficientemente pequena. Porém, isto não é constatado na realidade, devido à rugosidade da superfície metálica e à camada de óxido, umidade, gordura, poeira e sujeira que se encontram na superfície da peça.

**Figura 1 - Gráfico da variação da energia potencial em função da distância para um sistema composto de dois átomos**



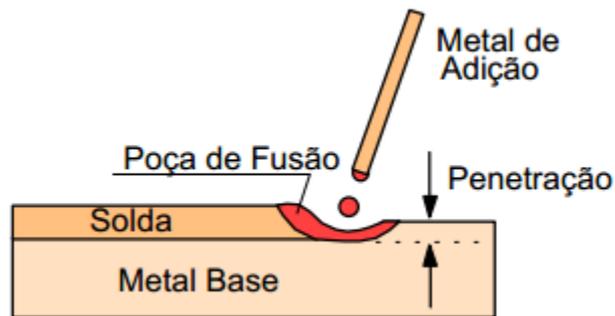
Fonte: FIGUEIREDO, 2005, p. 54

Para que a soldagem ocorra apesar desses obstáculos encontrados nas peças, dois métodos são usados:

- Deformação das superfícies que irão se unir, uma contra a outra, a ponto de que os átomos se aproximem um do outro a uma distância próxima de  $r_0$ , o que consiste na soldagem por pressão ou deformação;
- Fusão do metal de adição e do metal de base, o que elimina as camadas das superfícies entre as peças, com posterior solidificação do metal fundido e formação da solda. Esta operação só é possível graças à aplicação direta de calor na região da junta entre as peças. Caracteriza a soldagem por fusão.

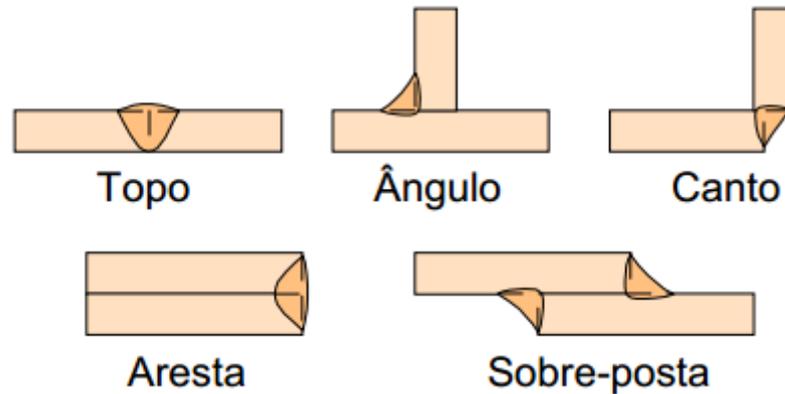
Na soldagem, após a união das peças, forma-se a solda e as peças que estão sendo soldadas são chamadas de metal de base. Em um tipo específico de soldagem, a soldagem por fusão, utiliza-se um metal de adição, que irá fundir junto com o metal de base para formar a poça de fusão, esquematizada na figura 2.

**Figura 2 - Esquema da formação da poça de fusão com o metal de adição e de base e forma da solda**

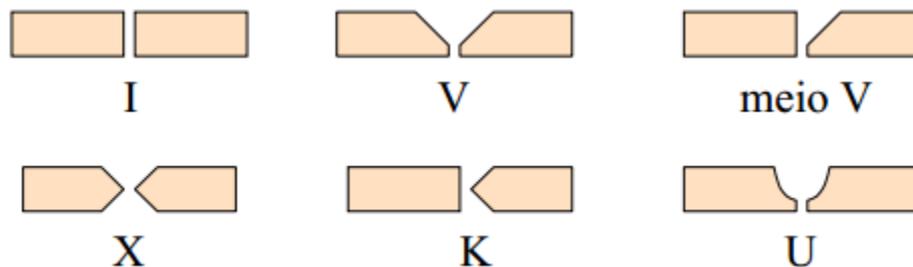


Fonte: MODENESI, 2001, p. 2

A região onde as peças se unirão é chamada de junta, que pode ser de topo, de ângulo, de canto, de aresta ou sobreposta, conforme figura 3. Porém, muitas vezes a posição das peças, suas dimensões e dificuldades para movê-las levam à necessidade de preparação das peças com a formação de sulcos no local onde as peças serão unidas, chamados de chanfro. Os tipos de chanfro estão representados pela figura 4.

**Figura 3 - Tipos de junta**

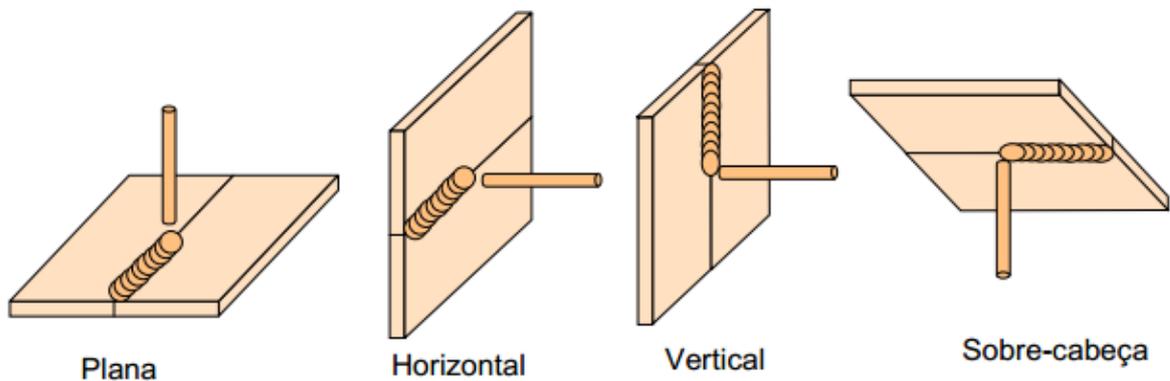
Fonte: MODENESI, 2001, p. 2

**Figura 4 - Tipos de chanfro**

Fonte: MODENESI, 2001, p. 2

Em alguns casos, é necessário o uso de uma mata-junta, utilizada para conter o metal fundido no fundo do sistema de peças e solda durante a soldagem. A zona fundida é formada pelo metal de solda, formado pelos metais de base e de adição. Já a zona termicamente afetada é a área do material de base que tem sua estrutura e/ou propriedades afetadas pela energia térmica da soldagem. A zona fundida é composta pelos passes, organizada em camadas e cada passe de solda é correspondente a um deslocamento da poça de fusão na junta.

Quanto à posição de soldagem, esta pode ser plana, horizontal, vertical ou sobre cabeça, conforme figura 5, sendo que a posição influencia quanto à dificuldade de soldagem. Já quanto a forma como é executada, a soldagem pode ser classificada como manual, semiautomática, mecanizada ou automática.

**Figura 5 - Posições de soldagem**

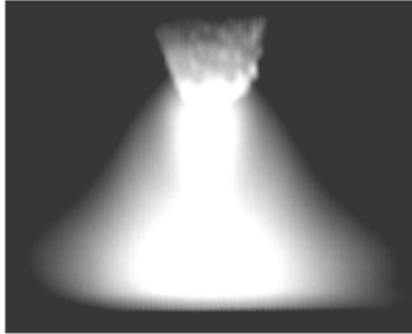
Fonte: MODENESI, 2001, p. 5

A soldagem é um procedimento muito perigoso por trabalhar em altas temperaturas e, por isso, alguns procedimentos de segurança devem ser seguidos. Há riscos de incêndios, explosões, queimaduras, além do operador estar sujeito a choque elétrico, exposição à radiação gerada pelo arco elétrico, gases prejudiciais à saúde. Por isso, deve-se utilizar equipamentos adequados, como o avental, mangas, luvas, ombreiras e perneiras de couro, sapatos de segurança, capacete de proteção e óculos de segurança com lentes adequadas de proteção.

### 3.2 Arco elétrico

Na soldagem por fusão, a fonte de calor mais utilizada é o arco elétrico. O mesmo é gerado por uma descarga elétrica, sustentada por um gás ionizado, a alta temperatura, o plasma. Este é capaz de produzir energia térmica para a fusão localizada das peças que serão unidas. O nome arco se deu pela sua forma característica de arco graças à convecção dos gases quentes gerados no processo. O arco trabalha entre a peça a ser soldada (que pode ser considerada plana) e o eletrodo, que se encontra na forma de um cilindro (inclusive quando se usa arame), que possui uma área muito menor do que a peça. Por isso, os arcos elétricos apresentam um formato cônico, no qual o seu diâmetro é maior na peça a ser soldada em relação ao seu diâmetro no eletrodo ou arame. Na figura 6, pode-se observar o formato cônico do arco elétrico.

**Figura 6 - Imagem do arco elétrico observado no processo TIG**



Fonte: MODENESI et al, 2007, p.10

Há uma diferença de potencial característica no arco elétrico no qual a queda de potencial ao longo do arco não é uniforme e divide-se em três regiões: queda anódica, queda na coluna e queda catódica. Em uma primeira aproximação entre o eletrodo e a peça, a diferença de potencial é dada pela equação 1 a seguir (MODENESI et al, 2007).

$$V = (V_a + V_c) + E \cdot l_a \quad (1)$$

onde,

$V$  = diferença de potencial entre o eletrodo e a peça (V);

$V_a$  = queda de potencial anódica (V);

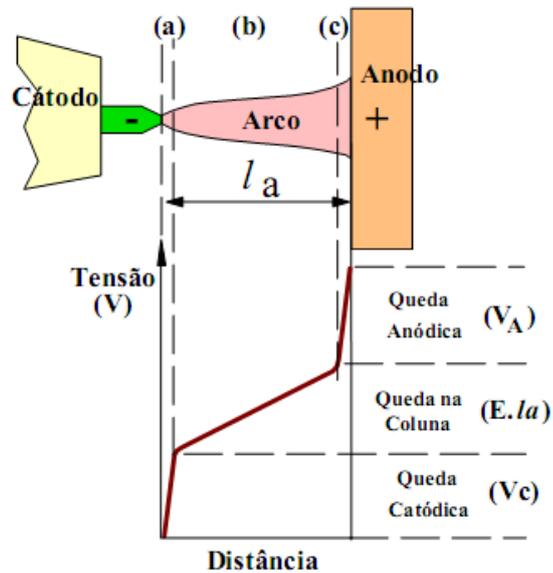
$V_c$  = queda de potencial catódica (V);

$E$  = campo elétrico na coluna (V/m);

$l_a$  = comprimento do arco (mm).

O campo elétrico na coluna depende da composição do gás do plasma. Podemos observar a zona de queda catódica (a), a coluna do arco (b), a zona de queda anódica (c), assim como o comprimento do arco ( $l_a$ ) na figura 7 representativa do arco elétrico entre os dois eletrodos, sendo um deles a peça a ser soldada.

**Figura 7 - Regiões esquemáticas de um arco elétrico**



Fonte: MODENESI, 2008, p. 6

A diferença de potencial necessária para manter a descarga elétrica varia de acordo com vários fatores, como a distância entre os dois eletrodos, a forma, tamanho e material de ambos, a composição e pressão do gás na coluna de plasma, e também a corrente elétrica que percorre o arco.

O arco de soldagem (também chamado de arco elétrico) possui alta eficiência para transformar energia elétrica em energia térmica e fundir a peça para formar a solda. O calor gerado em um arco elétrico é dado pela equação 2 (MODENESI, 2008).

$$Q = V.I.t \quad (2)$$

onde,

$Q$  = energia térmica (calor) gerado no arco elétrico (J);

$V$  = queda de potencial no arco (V);

$I$  = corrente elétrica no arco (A);

$t$  = tempo de operação (s).

Altas temperaturas devem ser mantidas no arco elétrico para que a ionização do plasma seja ininterrupta, permitindo a capacidade do plasma de conduzir corrente elétrica, de forma a não interromper o arco. Ao aumentar-se a corrente, há mais geração de energia no arco de soldagem, havendo uma elevação na temperatura, o que leva ao aparecimento de um arco maior.

Como já dito anteriormente, o arco elétrico de soldagem é composto pela convecção de gases, sofrendo a influência de uma corrente elétrica. O arco é muito sensível à influência de campos magnéticos e, para um condutor cilíndrico, a força de compressão que o campo magnético causado pela corrente que passa pelo condutor exerce sobre si é dada pela equação 3 a seguir (MODENESI, 2008).

$$p = p_A + \frac{\mu_0 \cdot I^2}{4 \cdot \pi^2 \cdot R^2} \left[ 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^2 \right] \quad (3)$$

onde,

$p$  = pressão que o campo magnético exerce sobre o condutor (Pa);

$p_A$  = pressão atmosférica (Pa);

$\mu_0$  = permeabilidade magnética do vácuo ( $4\pi \times 10^{-7}$  Henry/m);

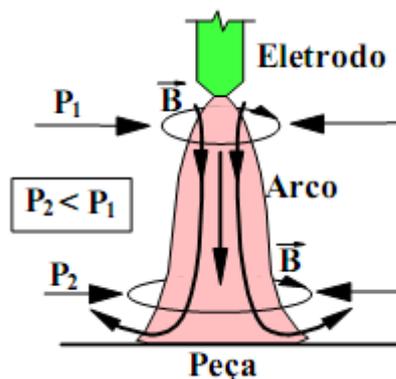
$I$  = corrente elétrica (A);

$R$  = raio do condutor (m);

$r$  = distância ao centro do condutor ( $r < R$ ) (m).

Por o arco elétrico possuir um formato cônico, perto do eletrodo, o valor de  $R$  é menor do que perto da peça, o que resulta em uma diferença de pressão, que induz um forte fluxo de gás do eletrodo para a peça, que caracteriza o “Jato de Plasma”, representado pela figura 8. Este direciona os gases quentes do arco contra a peça, que é responsável pela rigidez do arco e pela penetração da solda na peça.

**Figura 8 - Representação esquemática da formação do plasma**



Fonte: MODENESI, 2008, p. 12

### 3.3 Efeitos da soldagem

Tendo como base os aços, afirma-se que a aplicação de calor ou deformação plástica em um local específico de uma peça pode alterar as propriedades do material, preferencialmente na região da junta. As alterações podem ser negativas e dependem das reações que ocorreram durante a solidificação e o resfriamento do cordão de solda e da microestrutura final do material.

Por utilizar altas temperaturas, a maioria dos processos de soldagem causa alterações na estrutura dos materiais que estão sendo soldados, podendo levar a resultados negativos. Por isso, deve-se ter um olhar criterioso para a escolha do material a ser soldado, do metal de adição, assim como para a escolha do processo de soldagem.

Na soldagem por fusão, trabalha-se a altas temperaturas (2.000 a 20.000 °C) e arco elétrico com alta intensidade (cerca de  $8 \times 10^8$  W/m<sup>2</sup>), resultando em variações bruscas de temperatura ao longo do cordão de solda, com aplicação intensa de energia em apenas alguns pontos do cordão, gerando alterações na microestrutura e, portanto, nas propriedades do mesmo. O fluxo de calor se dá pelo fornecimento de calor para a junta e posterior dissipação da energia térmica para a peça. No caso de soldagem a arco elétrico, a energia de soldagem é dada pela equação 4 (MARQUES et al, 2011).

$$H = \frac{\eta \cdot V \cdot I}{v} \quad (4)$$

onde,

H = energia de soldagem (J/mm);

$\eta$  = eficiência térmica do processo;

V = tensão no arco (V);

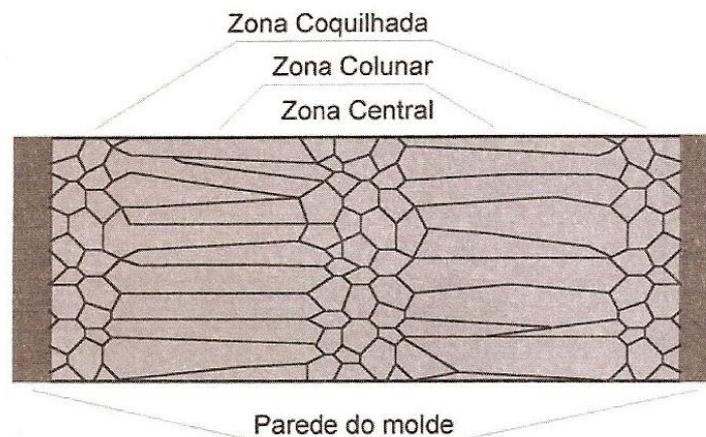
I = corrente de soldagem (A);

v = velocidade de soldagem (mm/s).

Ao comparar a solidificação de um cordão de solda com uma peça fundida podem ser observadas semelhanças e diferenças. Na solidificação de uma peça fundida há a formação de 3 zonas, a coquilhada (mais externa), a colunar, e a central. Como há uma grande diferença de temperatura entre o molde e o metal, o metal fundido em contato com o molde irá resfriar rapidamente, o que proporciona a nucleação de um grande número de grãos nessa região, caracterizando a zona coquilhada. Na zona colunar, como a temperatura do líquido está

próxima da temperatura de fusão do metal, o número de grãos nucleados é menor e a formação do sólido se dá pelo crescimento dos grãos, que assumem um formato colunar. Já na parte central, há a solidificação final, o calor é extraído em todas as direções de forma aproximadamente igual, formando grãos com formato equiaxial, podendo ser chamada também de zona equiaxial. As três regiões são representadas pela figura 9.

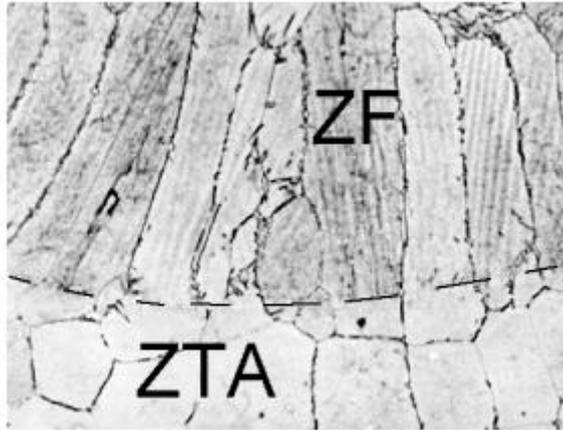
**Figura 9 - Esquema da seção transversal de uma peça fundida com suas três zonas**



Fonte: MARQUES et al, 2011, p. 96

Em comparação com a solidificação do cordão de solda, o metal líquido que está em contato com o metal de base não sofre esse super-resfriamento, pois o metal de base também foi aquecido, não havendo a formação de um grande número de novos grãos. Logo, o cordão de solda é praticamente formado pela zona colunar, com crescimento dos grãos do metal de base que se encontram na linha de fusão, que é a fronteira entre a zona de fusão (ZF) e a zona termicamente afetada (ZTA), o que garante a continuidade metalúrgica entre as zonas. Na figura 10, pode-se observar a continuidade metalúrgica entre a ZF e a ZTA ao se analisar que os grãos da ZF estão alinhados com os grãos da linha de separação. Em casos raros, onde a poça de fusão é grande devido a alta energia de soldagem, pode haver a formação da zona central (MARQUES et al, 2011).

**Figura 10 - Metalografia da região de transição entre a ZTA e a ZF de um aço inoxidável ferrítico. Constata-se a continuidade dos grãos da ZTA na ZF**

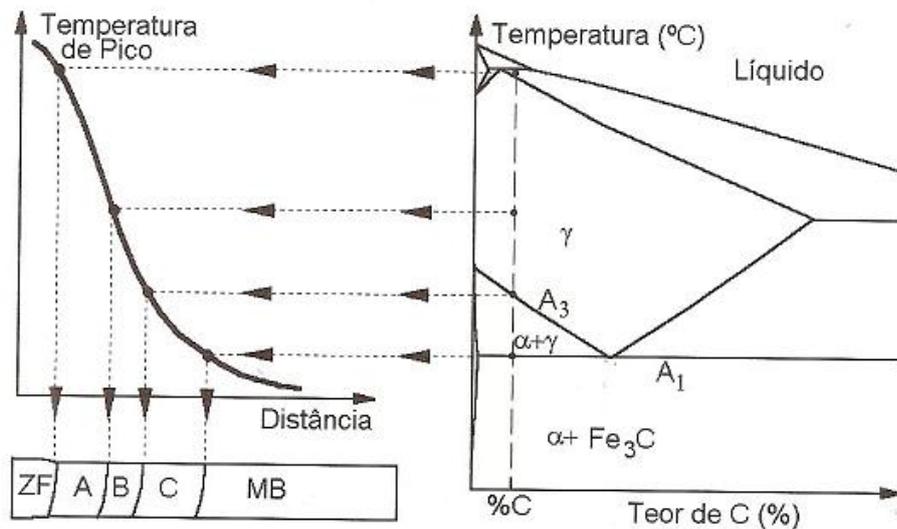


Fonte: MODENESI et al, p. 21

Após a solidificação e durante o resfriamento, a zona fundida pode ainda sofrer mudanças na sua microestrutura, como o crescimento de grãos, a formação de nitretos e carbeto e também a transformação de uma fase em outra.

Quanto à zona termicamente afetada, suas características irão depender do metal base e do processo de soldagem escolhido. Quando o metal de base não se transforma, como por exemplo o alumínio, a mudança estrutural característica no estado recozido será o crescimento de grãos, enquanto para materiais recozidos, o material apresentará, além desse crescimento de grãos ao lado da ZF, uma zona de recristalização um pouco mais afastada. Para metais transformáveis, a ZTA apresentará três regiões características: região de crescimento de grão, região de refino de grão e a região intercrítica, mostradas na figura 11, entre a ZF e o metal de base. A observação dessas zonas é possível apenas através de micrografia.

**Figura 11 - Estrutura da ZTA de um aço baixo carbono**



Fonte: MARQUES et al, 2011, p. 98

- Região de crescimento de grão (zona A): apresenta alta temperatura por estar mais próxima da ZF e sofre grande crescimento de grão. Resultará em estrutura grosseira, com a ferrita em placas e presença de bainita. É a zona mais problemática, mais propensa a trincas;
- Região de refino de grão (zona B): apresenta temperaturas por volta daquelas normalmente utilizadas na normalização de aços. Resultará em uma estrutura fina de ferrita e perlita. Não costuma ser uma zona problemática;
- Região intercrítica (zona C): a temperatura de pico varia entre a temperatura eutetóide (727 °C) e a linha A3, sendo responsável pela transformação parcial da estrutura inicial do material base. Somente parte do material sofre austenitização e é alterada. Pode-se formar constituintes de alta dureza e baixa tenacidade (MARQUES et al, 2011).

Além disso, por ter alta velocidade de solidificação, a segregação acontece em menor escala na soldagem que em outros processos, como na fundição. Porém, a segregação presente em peças soldadas é capaz de causar variações localizadas na microestrutura do material e alterar suas propriedades, apresentar fissuração, principalmente no centro do cordão de solda. Alguns problemas podem surgir nas soldas, conhecidos como descontinuidades, que caracterizam uma descontinuidade da solda como era esperada. Essas descontinuidades podem ser dimensionais (distorção, dimensões incorretas da solda, perfil incorreto da solda), estruturais (porosidades, inclusão de escória, falta de fusão, falta de penetração, trincas) ou inadequadas (propriedades mecânicas e propriedades químicas).

Outro problema gerado pelo processo de soldagem são as tensões residuais e as distorções na região da solda. Isso acontece pelo gradiente de temperatura no qual a peça é submetido. Na soldagem por fusão, utiliza-se alta temperatura e as regiões que estão em altas temperaturas tendem a se dilatar, ao mesmo tempo que encontram um obstáculo, dado pelas regiões adjacentes que não estão sujeitas a essa alta temperatura. Isso leva ao aparecimento de deformações elásticas e, posteriormente, deformações plásticas na região da solda. Com isso, no final da soldagem, têm-se tensões residuais e distorções na junta, que podem afetar a usabilidade da peça soldada.

### **3.4 Soldagem a Arco Submerso**

A soldagem a arco submerso é um tipo de processo de soldagem por fusão que promove a união das peças metálicas graças ao arco elétrico que é estabelecido entre a peça a ser soldada e um eletrodo nu (não revestido), que promove a fusão do metal, que posteriormente irá se solidificar, formando o cordão de solda.

Essa soldagem possui esse nome, pois o arco não fica visível, uma vez que o arco fica submerso sob uma camada de um material mineral granular, o fluxo, usado para proteger a região da solda contra contaminação da atmosfera. Como o arco não é visível, não faz-se necessária a proteção contra a radiação emitida pelo mesmo. A operação desse tipo de soldagem pode ser classificada como mecanizada (maioria dos casos), ou semimecanizada, na qual o operador movimenta a tocha e mantém a distância entre a tocha e a peça.

O metal de adição, no caso da soldagem a arco submerso é o eletrodo nu, que se encontra na forma de fio, normalmente enrolado em uma bobina. O fluxo, após solidificado, dará origem à escória e protege a solda até seu resfriamento, sendo normal o seu destacamento da solda.

Eletrodos para soldagem a arco submerso possuem diâmetro entre 2,4 e 6 mm. Isso permite uma soldagem com alta densidade de corrente, implicando em alta taxa de deposição. Na soldagem a arco submerso, com um único arame, pode-se utilizar correntes de até 2.000 A, realizar soldagem monopasse de até 16 mm de espessura e multipasse sem limite de espessura, atingir uma velocidade de 400 cm/min.

Como vantagens da soldagem a arco submerso, tem-se:

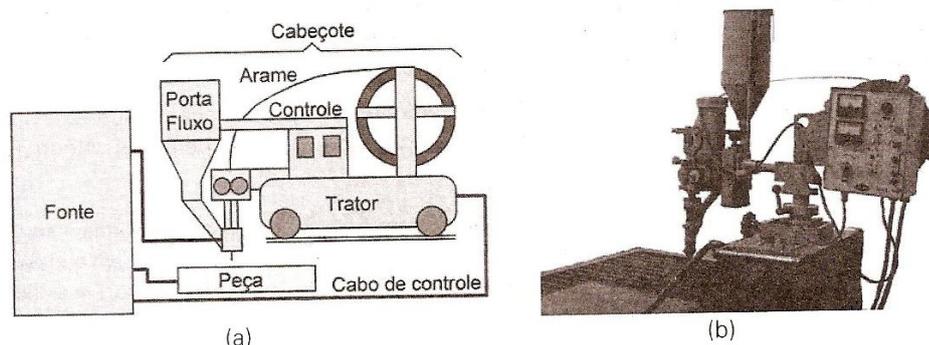
- Processo estável e suave;
- Gera pouco fumo e respingos;

- Cordão de solda com acabamento uniforme e transição suave entre metal de solda e metal de base, resultando em uma boa integridade do metal de solda;
- Elevada velocidade de soldagem;
- Maiores taxas de deposição;
- Melhor ambiente de trabalho e maior segurança para o operador.

Porém, apesar de apresentar várias vantagens, esse processo se limita quanto à sua posição de soldagem, apenas às posições de soldagem plana e horizontal em ângulo, pois o processo utiliza o fluxo e também, devido à alta taxa de deposição, o metal fundido tende a escorrer.

Para a soldagem a arco submerso acontecer, necessita-se de uma corrente elétrica que gerará um arco elétrico, fonte de energia térmica, do arame para soldagem (eletrodo), das peças a serem soldadas, do fluxo e de um movimento relativo entre o cabeçote de soldagem e as peças. O cabeçote de soldagem é composto pela fonte de energia, a tocha de soldagem, o alimentador de arame, o sistema de controle, o dispositivo para alimentação do fluxo e os cabos elétricos. O cabeçote é utilizado particularmente na soldagem mecanizada. A fonte de energia pode ser um transformador ou transformador-retificador. Os equipamentos com arames de diâmetro inferior a 4 mm utilizam fontes de tensão constante, com alimentador de arame com velocidade constante. Na figura 12, há o esquema e a foto de um equipamento para soldagem a arco submerso.

**Figura 12 - Equipamento para soldagem a arco submerso. (a) Desenho esquemático; (b) equipamento industrial**

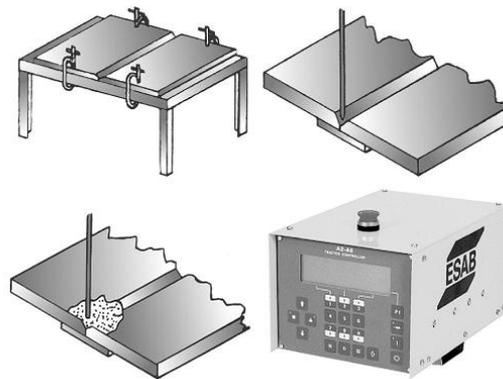


Fonte: MARQUES et al, 2011, p. 265

Os procedimentos para soldagem a arco submerso, representados de forma sucinta pela figura 13, incluem preparação e limpeza da área a ser soldada, com preparação da junta mais adequada, utilização de um cobre-juntas quando necessário, disposição das peças no local de soldagem e, se necessário deve-se prendê-las para que fiquem na posição desejada. A

bobina do arame escolhido para a soldagem deve ser colocada no carretel e a ponta do arame deve ser inserida nas roldanas do cabeçote até que chegue no local para iniciar a solda. Com a ponta do arame já na posição de soldagem, libera a vazão do fluxo até cobrir a região inicial de soldagem, e com as variáveis de soldagem já estabelecidas (tensão, corrente velocidade do arame e velocidade de soldagem) e inicia-se a soldagem.

**Figura 13 - Preparação para soldagem a arco submerso**



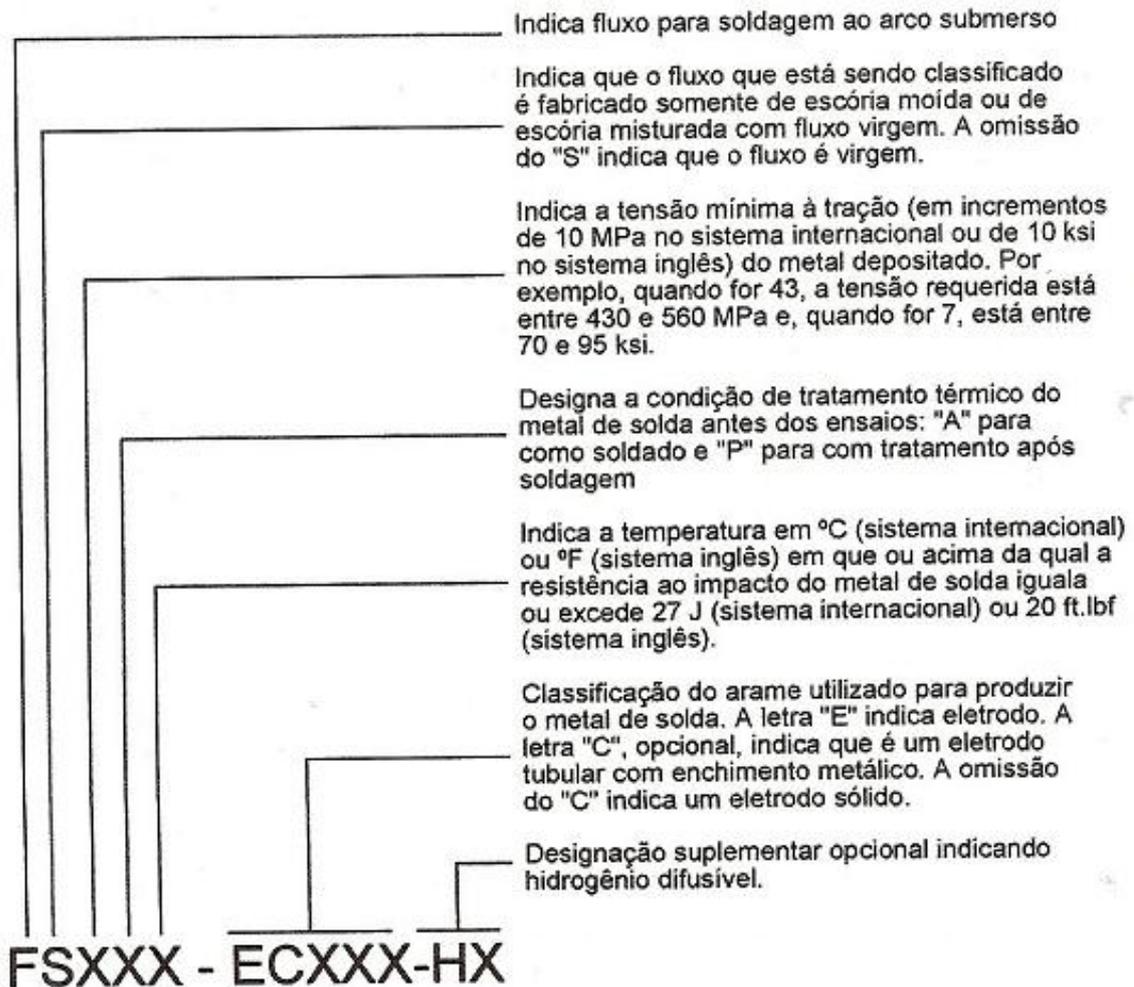
Fonte: FORTES, 2004, p. 7

Quando inicia-se a soldagem, o arco elétrico se estabelece entre o arame e a peça de trabalho e a corrente flui, transmitindo energia térmica, o que leva à fusão do metal. O arame é tracionado na velocidade definida, o carro começa a se deslocar ao longo do cordão de solda e o fluxo é alimentado continuamente através do tubo do silo e é distribuído ao longo do cordão, sempre um pouco à frente da região de soldagem.

O arame de soldagem e o fluxo devem ser bem escolhidos e, para isso, deve-se levar em conta as características de desempenho do processo e as propriedades mecânicas. A escolha desses materiais deve ser criteriosa porque as propriedades químicas e físicas finais da solda dependerão tanto deles quanto da composição do metal base e das condições de soldagem.

A figura 14 mostra o esquema de classificação do par arame-fluxo adotado pela especificação AWS A 5.17.

**Figura 14 - Sistema de classificação de consumíveis para soldagem a arco submerso, segundo a especificação AWS A 5.17**



Fonte: MARQUES et al, 2011, p. 270

Por originar soldas de alta qualidade, poder ser automatizada, poder proporcionar altas taxas de penetração e deposição, a soldagem a arco submerso é muito utilizada nas indústrias, como por exemplo, na fabricação de navios e barcos, vagões e tubos.

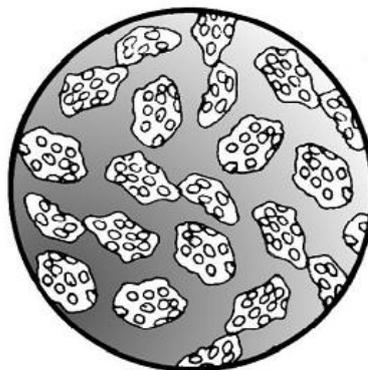
### 3.4.1 Tipos de fluxo

Os fluxos para soldagem a arco submerso são compostos minerais granulares e fusíveis, que são responsáveis pela proteção limpeza, e controle da geometria do cordão de solda.

A escolha do fluxo de soldagem para arco submerso envolve suas características de desempenho. Quanto maior a facilidade de remoção de escória, óxidos e carepa, maior a capacidade de conduzir corrente elétrica, podendo ser utilizado para corrente alternada e, para um número maior de arames que puder ser utilizado, melhor será o fluxo.

Quanto ao processo de produção do fluxo, este pode ser classificado como fundido ou aglomerado (FORTES, 2004). Os fluxos aglomerados são fabricados através da pulverização prévia dos ingredientes, com posterior mistura a seco dos mesmos. Logo após, a mistura é aglomerada com silicato de potássio, sódio, potássio ou uma mistura de aglomerantes, pelletizada e aquecida a uma temperatura menor que a usada para a fabricação de fluxos fundidos. Há então, a pelletização, secagem, moagem e peneiramento da massa obtida. O fluxo aglomerado resultante deve possuir melhor desempenho na retirada de carepa e óxidos, menor consumo de fluxo em comparação com o fluxo fundido, bom desempenho para uma variedade de aplicações e para uma mesma granulometria, baixo custo de produção, além de gerar soldas livres de porosidade apesar da carepa e dos óxidos. A figura 15 ilustra o aspecto do grão de fluxo aglomerado.

**Figura 15 - Aspectos dos grãos de fluxo aglomerado**



Fonte: FORTES, 2004, p. 14

Os fluxos fundidos são fabricados pela mistura seca de todos componentes e posterior fusão no forno elétrico, representado pela figura 16, ou em um queimador. Depois da fusão da

mistura e posterior adição de alguma substância (se necessário), a mistura fundida é vazada e sofre choque térmico em água ou coquilha, que leva à sua solidificação. Daí, obtêm-se um produto com aparência cristalina, é feita a secagem, britagem, moagem e o peneiramento, que irá separar os grãos de tamanhos diferentes. O fluxo fundido deve possuir composição química desejada, deve ser homogêneo, não deve possuir água quimicamente ligada (logo, hidrofílico) e deve conferir ao arco maior estabilidade, possibilitando o uso de maiores velocidades de soldagem e a produção de soldas mais consistentes, com menor risco de trinca. A figura 17 ilustra o aspecto do grão de fluxo fundido.

**Figura 16 - Forno elétrico utilizado para a fabricação de fluxo fundido**



Fonte: FORTES, 2004, p. 16

**Figura 17 - Aspecto dos grãos de fluxo fundido**



Fonte: FORTES, 2004, p. 17

Outra classificação dos fluxos é em neutro, ativo ou ligado. Segundo a AWS, fluxos neutros são definidos como “aqueles que não produzem alterações significativas na

composição química do metal depositado como resultado de grandes mudanças na tensão do arco e, portanto, no comprimento do arco”, enquanto os fluxos ativos são “aqueles que contêm pequenas quantidades de manganês, silício ou ambos, que são desoxidantes adicionados ao fluxo para melhorar a resistência à porosidade e a trincas causadas pelos contaminantes no metal de base ou dele provenientes”. Para fluxos ativos, quando temos uma maior tensão de soldagem, haverá um maior consumo de fluxo, que levará a uma maior deposição de manganês e/ou silício na solda, que faz com que aumente a resistência mecânica e a dureza, porém diminua a tenacidade da solda. Já os fluxos ligados contêm outros elementos de liga além do silício e manganês, como o cromo, molibidênio, cobre e, suas principais aplicações são para aços de baixa liga e revestimento duro (FORTES, 2004).

Além disso, os fluxos podem ser classificados como ácidos, neutros ou básicos, pois as propriedades do material depositado são influenciadas pela basicidade do fluxo (FORTES, 2004). De modo geral, fluxos de maior basicidade tendem a reduzir os teores de oxigênio, enxofre e fósforo do metal depositado, melhorando assim as propriedades mecânicas, em particular a resistência à fratura frágil. Fluxos ácidos tendem a produzir metal depositado com teores de oxigênio, fósforo e enxofre mais altos (MARQUES et al, 2011).

A equação 5 calcula o índice de basicidade (IB) para a classificação quanto a sua composição química pelo *International Institute of Welding* (IIW) (FORTES, 2004, p. 14).

$$IB = \frac{CaO + CaF_2 + MgO + BaO + SiO + Li_2O + K_2O + Na_2O + \frac{1}{2}(MnO + FeO)}{SiO_2 + \frac{1}{2}(Al_2O_3 + TiO_2 + ZrO_2)} \quad (5)$$

onde,

- Fluxos ácidos:  $IB < 1,0$ ;
- Fluxos semi-básicos:  $1,0 \leq IB \leq 1,5$ ;
- Fluxos básicos:  $IB \geq 1,5$ .

### 3.5 Aços AISI

De acordo com a tabela 1, verifica-se que o aço AISI 1020 e o aço AISI 1045 são aços carbono, enquanto o aço AISI 4140 é um aço de baixa liga.

**Tabela 1 - Principais famílias de aços conforme a classificação ABNT (similar a AISI e SAE)**

Aços carbono	10xx	Aço carbono
	11xx	Aço carbono resulfurado (corte fácil)
	12xx	Aço carbono resulfurado e refosforado (corte fácil)
Aços de baixa liga (construção Mecânica)	13xx	Mn 1,75%
	23xx	Ni 3,5%
	25xx	Ni 5,0%
	31xx	Ni 1,25%, Cr 0,65%
	33xx	Ni 3,50%, Cr 1,55%
	40xx	Mo 0,25%
	41xx	Cr 0,50% ou 0,95%, Mo 1,12% ou 0,20%
	43xx	Ni 1,80%, Cr 0,50% ou 0,80%, Mo 0,25%
	46xx	Ni 1,55%, ou 1,80%, Mo 0,20% ou 0,25%
	47xx	Ni 1,05%, Cr 0,45%, Mo 0,20%
	48xx	Ni 3,50%, Mo 0,25%
	50xx	Cr 0,80% ou 0,40%
	51xx	Cr 0,80% ou 1,05%
	5xxxx	Cr 0,50% ou 1,00% ou 1,45%, C 1,00%
	61xx	Cr 0,80% ou 0,95%, V 0,10% ou 0,15% mínimo
	86xx	Ni 0,55%, Cr 0,50% ou 0,65%, Mo 0,20%
87xx	Ni 0,55%, Cr 0,50%, Mo 0,25%	
92xx	Mn 0,85%, Si 2,00%	
93xx	Ni 3,25%, Cr 1,20%, Mo 0,12%	
98xx	Ni 1,00%, Cr 0,80%, Mo 0,25%	

Fonte: COLPAERT, 2008, p. 281

### 3.5.1 Aço AISI 1020

O aço AISI 1020 é um aço carbono com baixo teor de carbono. Os aços com baixo teor de carbono possuem concentrações de carbono abaixo de 0,3% e não respondem de forma significativa a tratamentos térmicos objetivados a formar martensita. As microestruturas consistem nos microconstituintes ferrita e perlita. Como uma consequência,

essas ligas possuem dureza relativamente baixa, porém possuem boa ductilidade e tenacidade excepcionais. Adicionalmente, elas são usináveis, soldáveis e, dentre todos os tipos de aço, são os mais baratos a serem produzidos (CALLISTER, 2006).

O aço AISI 1020 é um dos aços carbono mais utilizados como aço para cementação e algumas de suas aplicações são em componentes mecânicos de uso como engrenagens, eixos, anéis de engrenagem e virabrequins.

A composição do aço AISI 1020, pela norma AISI é dada pela tabela 2, e suas propriedades quando laminado, normalizado e recozido, pela tabela 3.

**Tabela 2 - Composição química do aço AISI 1020 especificada (%)**

C	Mn	P	S
0,18 - 0,23	0,30 - 0,60	0,03 máx.	0,05 máx.

Fonte: CATÁLOGO AÇOTUBO

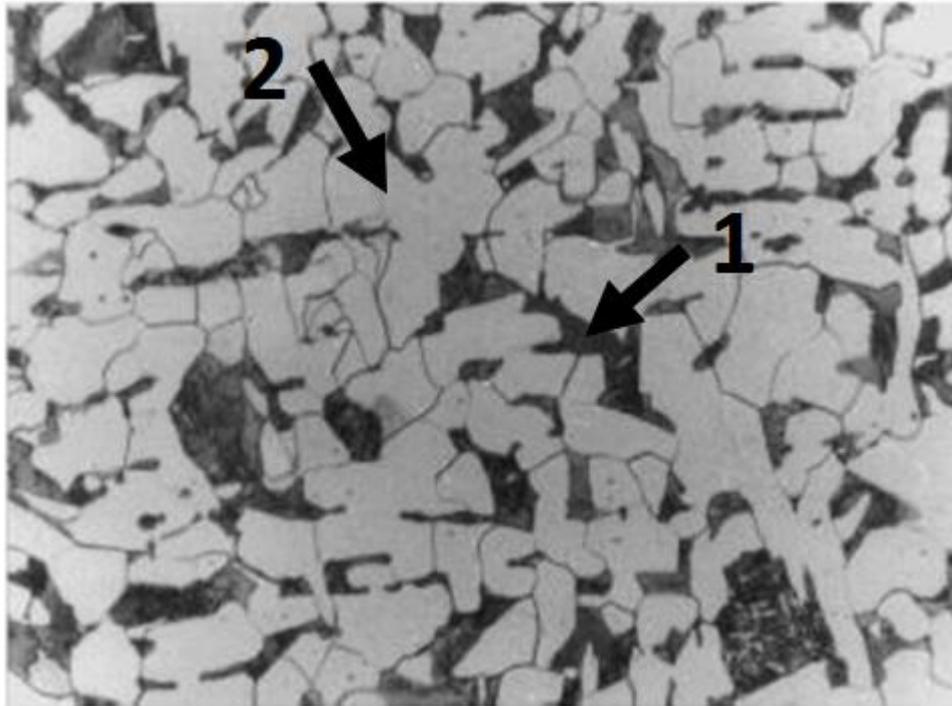
**Tabela 3 - Propriedades do aço 1020 laminado, normalizado e recozido**

Condição	Limite de resistência (MPa)	Limite de escoamento (MPa)	Redução de área (%)	Alongamento em 50 mm (%)	Dureza Brinell	Impacto Izod (J)
Laminado	450	330	36,0	59	143	87
Normalizado	440	345	35,8	68	131	118
Recozido	395	295	36,5	66	111	123

Fonte: COSTA E SILVA, 2011, p.93

A figura 18 representa fotomicrografia de um aço ABNT 1020 na sua forma original, em que a cor preta representa as colônias de perlita (1) e a cor branca a matriz ferrita (2) (ALBUQUERQUE et al).

**Figura 18 - Aço ABNT 1020, 346X**



Fonte: ALBUQUERQUE et al

### 3.5.2 Aço AISI 1045

O aço AISI 1045 é um aço com médio teor de carbono, cuja concentração de carbono varia entre 0,3% e 0,7%. Os aços médio carbono possuem baixa temperabilidade e são utilizados com maior frequência na condição revenida (CALLISTER, 2006). Possuem boa tenacidade e resistência quando submetidos à têmpera e ao revenimento. A composição do aço AISI 1045, pela norma AISI é dada pela tabela 4.

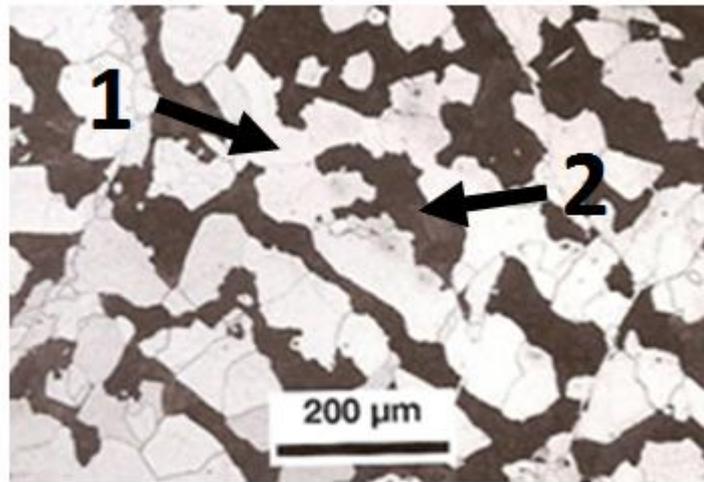
**Tabela 4 - Composição química do aço AISI 1045 especificada(%)**

C	Mn	P	S
0,43 - 0,50	0,60 - 0,90	0,03 máx.	0,05 máx.

Fonte: CATÁLOGO AÇOTUBO

Na figura 19 têm-se fotomicrografias de uma placa de aço AISI 1045 obtida por lingotamento contínuo, bruta de solidificação, em três regiões. Nela, pode-se observar os microconstituintes ferrita (1) e perlita (2).

**Figura 19 - Fotomicrografia de um aço AISI 1045**



Fonte: COLPAERT, 2008

### 3.5.3 Aço AISI 4140

O aço AISI 4140 é classificado como aço carbono de alta resistência e baixa liga (ARBL). É um aço cromo-molibdênio, por possuir esses elementos em sua composição química, e possui maior resistência do que os aços comuns ao carbono com baixo teor de carbono. A maioria dos ARBL's pode ter sua resistência aumentada através de um tratamento térmico, são dúcteis, conformáveis e podem ser usinados, além de serem mais resistentes à corrosão do que os aços comuns ao carbono (CALLISTER, 2006).

É um aço de temperabilidade média, que combina alta resistência com elevada tenacidade. É indicado para fabricação de virabrequins, juntas, eixos em geral, peças para equipamentos de perfuração, etc.

A composição do aço 4140, pela norma AISI é dada pela tabela 5, e suas propriedades quando laminado, normalizado e recozido, pela tabela 6.

**Tabela 5 - Composição química do aço AISI 4140 especificada (%)**

C	Mn	Si	Cr	Mo	P	S
0,38 - 0,43	0,75 - 1,00	0,15 - 0,35	0,80 - 1,10	0,15 - 0,25	0,03 máx.	0,04 máx.

Fonte: CATÁLOGO AÇOTUBO

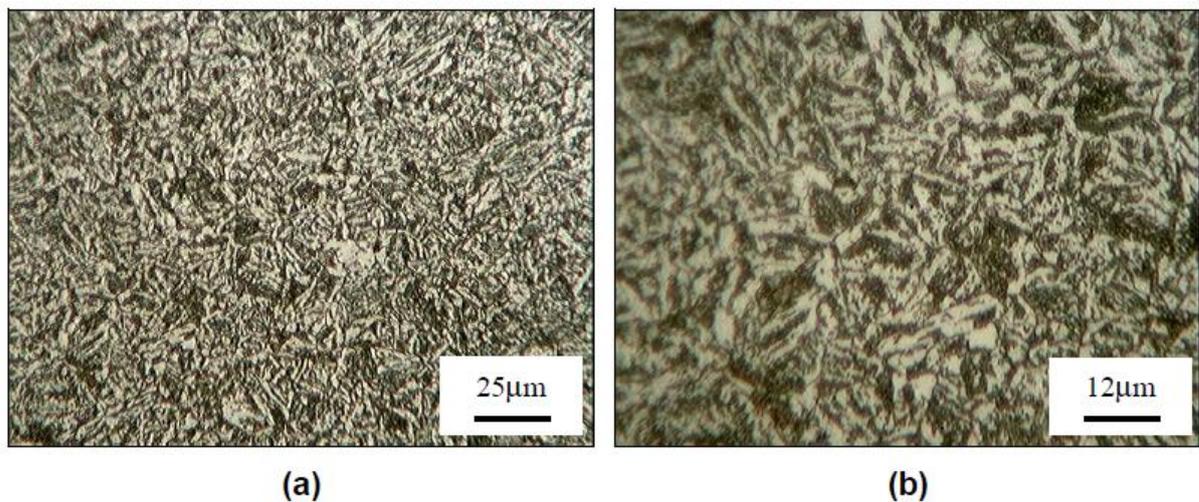
**Tabela 6 - Propriedades do aço 4140 normalizado e recozido**

Condição	Limite de resistência (MPa)	Limite de escoamento (MPa)	Redução de área %	Alongamento em 50 mm %	Dureza Brinell	Impacto Izod J
Normalizado	1020	655	17,7	47	302	23
Recozido	655	420	25,7	57	197	54

Fonte: COSTA E SILVA, 2011, p. 93

Na figura 20, tem-se a fotomicrografia do aço AISI 4140 após normalização. Observa-se a ocorrência de grãos de ferrita e colônias de perlita nas peças, conforme esperado de acordo com o material e o tratamento térmico conduzido.

**Figura 20 - Micrografia do aço AISI 4140 após a normalização: (a) e (b) aumentos distintos**



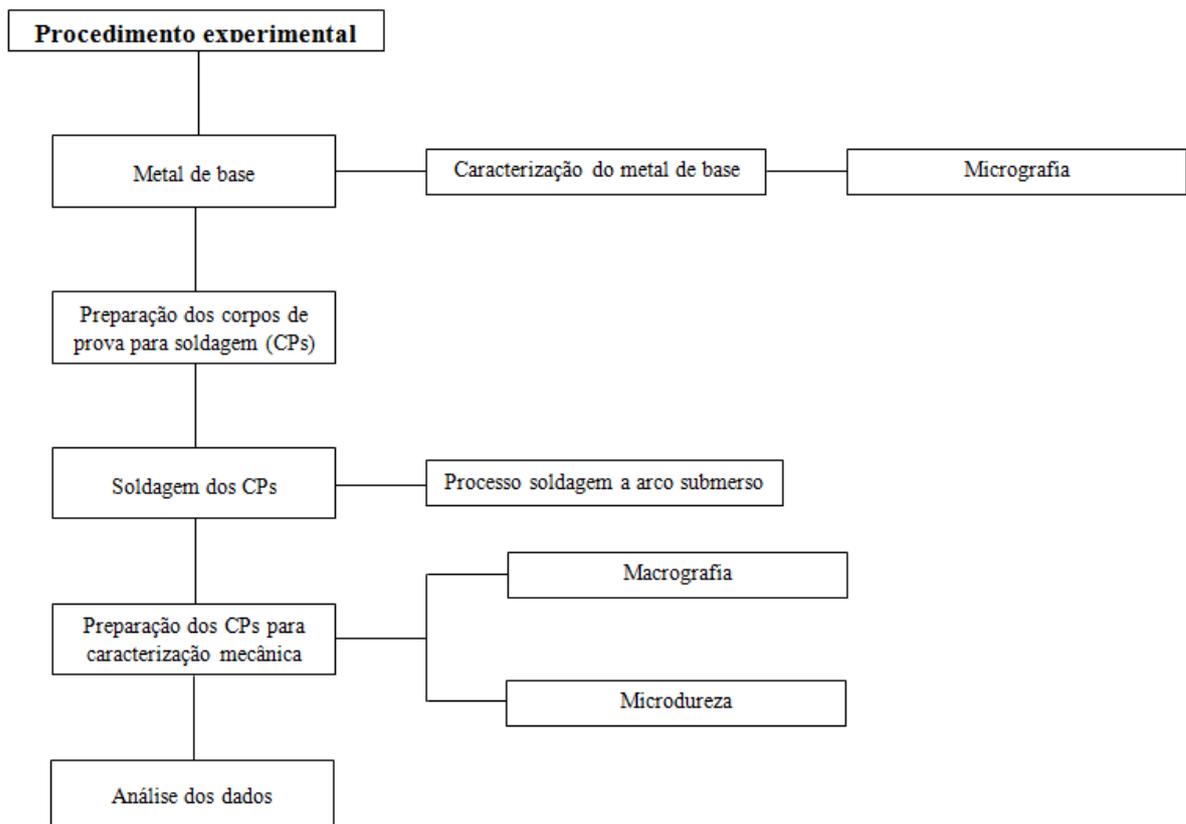
Fonte: BRANDÃO, 2010

#### 4. MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho experimental, conforme fluxograma mostrado na figura 21 e desenvolvido nesta pesquisa, foi dividido em cinco etapas. A primeira etapa refere-se à caracterização do metal de base. A segunda etapa diz respeito à preparação dos corpos de prova para a execução da soldagem. A terceira etapa refere-se à soldagem dos corpos de prova através do processo de soldagem a arco submerso. A quarta etapa refere-se à caracterização do material após soldagem por macrografia e microdureza e a quinta e última etapa diz respeito à análise dos resultados.

Para cada aço, foram soldados 3 corpos de prova (CPs) e, após a soldagem, foi retirada uma amostra de cada peça. Um corpo de prova também foi retirado de cada aço antes da soldagem para controle, totalizando 12 amostras.

**Figura 21 - Fluxograma experimental**



Fonte: Elaborado pelo autor

#### 4.1 Caracterização do material

Para realização do estudo em questão sobre os aços AISI 1020, AISI 1045 e AISI 4140, foram compradas 3 barras de cada tipo de aço. Cada uma dessas barras possuía medidas de 12 x 50 x 100 mm. As peças foram compradas na empresa Acoliver Comercio de Ferro e Aco LTDA, situada em Contagem. Para cada um dos materiais, a empresa forneceu um certificado de qualidade, garantindo a procedência do material.

A tabela 7 apresenta a composição química do aço A36, similar ao AISI 1020, fornecida pela empresa.

**Tabela 7 - Composição química do aço A36**

<b>C</b>	<b>Mn</b>	<b>Si</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Alt</b>	<b>Cu</b>	<b>Cr</b>	<b>Mo</b>	<b>Ni</b>	<b>Nb</b>	<b>V</b>	<b>Ti</b>
0,19	1,00	0,25	0,016	0,009	0,033	0,00	0,05	0,00	0,01	0,001	0,003	0,002

Fonte: Acoliver Comercio de Ferro e Aco LTDA

O aço 1045, certificado também pela empresa fornecedora foi conformado pelo processo de laminação a quente. O material sofreu inspeção visual, dimensional e sua composição química, garantida pelo fornecedor se encontra na tabela 8.

**Tabela 8 - Composição química do aço 1045**

<b>C</b>	<b>Mn</b>	<b>Si</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Cr</b>	<b>Ni</b>	<b>Mo</b>	<b>Al</b>
0,473	0,75	0,190	0,011	0,002	0,02	0,02	0,007	0,0405

Fonte: Acoliver Comercio de Ferro e Aco LTDA

O certificado de qualidade do aço 4140 afirma que o material foi conformado por processo de laminação e apresenta a composição química do aço, fornecida na tabela 9.

**Tabela 9 - Composição química do aço 4140**

<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Co</b>	<b>Cr</b>	<b>Mo</b>	<b>Ni</b>	<b>V</b>	<b>Cu</b>	<b>N</b>
0,40	0,26	0,90	0,006	<0,001	<0,01	0,91	0,19	0,16	<0,01	0,03	0,0065

Fonte: Acoliver Comercio de Ferro e Aco LTDA

O aço A36 fornecido pela empresa é um aço similar ao AISI 1020. Através de uma comparação da constituição do aço AISI 1020 apresentado pela tabela 2, com a composição química especificada do aço A36 através do certificado da empresa ilustrado pela tabela 7, percebe-se que a quantidade de carbono está dentro da norma, que o enxofre e fósforo não ultrapassam o máximo, porém há divergência na porcentagem de manganês, pois o aço A36

utilizado apresenta quantidade levemente superior à estipulada para o aço AISI 1020, como especificado para o aço A36.

Ao comparar as tabelas 4 e 8, percebe-se que todos os elementos do aço 1045 utilizado possuem quantidades dentro do estipulado pela norma, respeitando o máximo de silício, fósforo e enxofre.

O aço 4140 utilizado também apresenta quantidades de elementos de liga dentro do especificado, sem nenhuma divergência.

#### 4.2 Preparação dos corpos de prova para soldagem

O corte das amostras controle foi realizado com arco de serra e a figura 22 representa o corpo de prova com sua respectiva amostra controle após o corte.

**Figura 22 - Peça e sua respectiva amostra controle após corte**



Fonte: Elaborado pelo autor

Anteriormente à soldagem dos corpos de prova, cada um dos mesmos passou pelo processo de esmerilhamento da superfície que seria soldada e da superfície paralela a esta, para retirada de óxidos, carepas de forma a permitir um melhor contato elétrico.

A figura 23 ilustra o esmeril Bromberg do CEFET-MG utilizado na preparação dos corpos de prova para a soldagem.

**Figura 23 - Esmeril utilizado para preparação dos corpos de prova**



Fonte: Elaborado pelo autor

### **4.3 Soldagem dos corpos de prova**

Após preparados, os corpos de prova foram, então, submetidos à soldagem a arco submerso com a utilização da máquina de soldagem da marca White Martins mostrado na figura 24. Para realização da soldagem a arco submerso destes corpos de prova, um gabarito foi confeccionado para garantir a repetibilidade do processo em todos corpos de prova, ilustrado pela figura 25.

**Figura 24 - Equipamento para soldagem a arco submerso do CEFET-MG**



Fonte: Elaborado pelo autor

**Figura 25 - Gabarito utilizado durante a soldagem a arco submerso**



Fonte: Elaborado pelo autor

O gabarito foi posicionado na mesa de soldagem e conectado ao fio terra e sua posição não sofreu alteração até a soldagem do último corpo de prova. A posição do gabarito em relação ao equipamento de soldagem é representada pela figura 26.

**Figura 26 - Posição do gabarito em relação ao equipamento de soldagem a arco submerso**



Fonte: Elaborado pelo autor

Os parâmetros de soldagem utilizados para a soldagem a arco submerso de todos os CPs ocorreu a uma corrente constante de 340A, tensão de 26V e velocidade de soldagem de 15cm/min.

O eletrodo utilizado foi um eletrodo específico para a soldagem do aço AISI 1020, o SSA 5.17 EL 12, conforme a norma AWS/ASME. Este eletrodo foi utilizado para a soldagem de todos os CPs por ser o único disponível no CEFET-MG, mesmo não sendo o mais indicado para todos os aços utilizados neste estudo. O fluxo utilizado durante a soldagem foi o fluxo OK-1081W, segundo a norma ASME SFA-5.23, marca ESAB. Este fluxo é classificado como um fluxo ligado, de acordo com a classificação quanto à neutralidade.

Após a soldagem de cada CP, fez-se a retirada do excesso de fluxo e da escória. A figura 27 mostra um corpo de prova de aço A36 após a soldagem sem a escoria.

**Figura 27 - Corpo de prova de aço A36 após soldagem a arco submerso**



Fonte: Elaborado pelo autor

#### **4.4 Caracterização**

##### **4.4.1 Preparação dos corpos de prova para metalografia**

As amostras controle foram embutidas para facilitar o manuseio das mesmas, conforme figura 28. A figura 29 corresponde aos co-polímeros de PMMA em pó e líquido utilizados no processo de embutimento a frio.

**Figura 28 - Amostra controle de aço 4140 durante embutimento a frio**



Fonte: Elaborado pelo autor

**Figura 29 - Co-polímeros utilizados para embutimento a frio**



Fonte: Elaborado pelo autor

Após a soldagem, foi realizado o corte dos corpos de prova com a utilização de serra de fita Franho FM 1600 representada pela figura 30. Uma amostra foi retirada de cada corpo de prova para estudo. O corte foi realizado na seção transversal de cada corpo de prova.

**Figura 30 - Serra em fita**



Fonte: Elaborado pelo autor

Este equipamento possui uma serra de fita na qual todos os dentes são responsáveis pelo corte da peça. Durante o corte, uma mistura de água e óleo foi responsável pelo

resfriamento e lubrificação do corpo de prova, respectivamente. A figura 31 mostra a serra utilizada para o corte dos CPs.

**Figura 31 - Serra do equipamento utilizado para corte dos corpos de prova**



Fonte: Elaborado pelo autor

#### **4.4.2 Análise metalográfica**

A análise metalográfica dos aços A36, 4140 e 1045 se deu através de macrografia e micrografia. As nove amostras retiradas dos corpos de prova soldados foram submetidos apenas à análise macrográfica, enquanto as amostras controle foram submetidas, também, à análise micrográfica. Essas amostras foram lixadas com utilização de uma lixadeira Struers conforme figura 32, e lixas de diferentes granulometrias: #240, #320, #400 e #600.

**Figura 32 - Lixadeira utilizada para lixar as amostras**



Fonte: Elaborado pelo autor

Como apenas as amostras controle seriam submetidas à micrografia, apenas as 3 necessitaram de polimento com pasta de diamante ( $9\mu\text{m}$  e  $3\mu\text{m}$ ). A figura 33 mostra a politriz Arotec utilizada neste processo.

**Figura 33 - Politriz utilizada para polir as amostras controle**



Fonte: Elaborado pelo autor

As 9 amostras retiradas dos corpos de prova após soldagem foram submetidas a ataque com reativo Nital 5% após lixamento, enquanto as amostras controle foram atacadas com reativo Nital 3% após polimento para realização da micrografia. O ataque das amostras que apenas seriam submetidas à macrografia foi realizado com Nital mais concentrado para que o ataque fosse mais efetivo, assim como a revelação das zonas, para que estas fossem mais visíveis apenas com a macrografia. A figura 34 ilustra a placa de petri utilizada durante o ataque químico às amostras.

**Figura 34 - Vidro de relógio com Nital 5%**



Fonte: Elaborado pelo autor

A análise macrográfica das amostras se deu com a utilização de um scanner, enquanto a análise micrográfica foi realizada com microscópio óptico, marca FORTEL, com sistema de digitalização, conforme figura 35.

**Figura 35 - Microscópio óptico**



Fonte: Elaborado pelo autor

#### **4.4.3 Controle dimensional**

O controle dimensional das amostras retiradas dos corpos de prova soldados foi validado com base na medição de todas as 9 amostras. As medidas foram realizadas com a utilização de um paquímetro digital Digimess e as dimensões das amostras estão apresentadas na tabela 10 para o aço A36.

**Tabela 10 - Dimensões das amostras de aço A36 (mm)**

<b>Amostra</b>	<b>Comprimento</b>	<b>Espessura 1</b>	<b>Espessura 2</b>	<b>Altura 1</b>	<b>Altura 2</b>
<b>A36 A</b>	52,60	12,70	12,52	21,73	21,74
<b>A36 B</b>	51,40	12,62	12,62	21,78	21,75
<b>A36 C</b>	51,20	12,63	12,66	23,64	23,63

Fonte: Elaborado pelo autor

A tabela 11 apresenta as dimensões médias das amostras de aço A36. Percebe-se que a variação de espessura e altura em cada amostra foi muito pequena, com pequeno desvio padrão  $\leq 1\%$ . A média geral da altura das amostras apresenta maior desvio padrão, uma vez que cada amostra foi cortada separadamente.

**Tabela 11 - Dimensões médias apresentadas pelas amostras de aço A36 (mm)**

<b>Amostra</b>	<b>Comprimento</b>	<b>Espessura média</b>	<b>Altura média</b>
<b>A36 A</b>	52,600	12,610 $\pm$ 0,127	21,735 $\pm$ 0,007
<b>A36 B</b>	51,400	12,620 $\pm$ 0,000	21,765 $\pm$ 0,021
<b>A36 C</b>	51,200	12,645 $\pm$ 0,021	23,635 $\pm$ 0,007
<b>Média</b>	51,733	12,625	22,378
<b>Desvio padrão</b>	$\pm$ 0,757	$\pm$ 0,018	$\pm$ 1,088

Fonte: Elaborado pelo autor

A tabela 12 apresenta os valores das dimensões encontradas para as amostras de aço 1045.

**Tabela 12 - Dimensões das amostras de aço 1045 em mm**

<b>Amostra</b>	<b>Comprimento</b>	<b>Espessura 1</b>	<b>Espessura 2</b>	<b>Altura 1</b>	<b>Altura 2</b>
<b>1045 A</b>	51,67	12,51	12,59	21,83	21,81
<b>1045 B</b>	50,77	12,77	12,80	21,76	21,76
<b>1045 C</b>	51,21	12,80	12,81	21,73	21,74

Fonte: Elaborado pelo autor

A tabela 13 apresenta as dimensões médias das amostras de aço 1045. Observa-se que a variância de espessura e altura nas mesmas amostras são as menores encontradas para todos os materiais ( $\leq 0,5\%$ ).

**Tabela 13 - Dimensões médias apresentadas pelas amostras de aço 1045**

<b>Amostra</b>	<b>Comprimento</b>	<b>Espessura média</b>	<b>Altura média</b>
<b>1045 A</b>	51,670	12,550 ± 0,057	21,820 ± 0,014
<b>1045 B</b>	50,770	12,785 ± 0,021	21,760 ± 0,000
<b>1045 C</b>	51,210	12,805 ± 0,007	21,735 ± 0,007
<b>Média</b>	51,217	12,713	21,772
<b>Desvio padrão</b>	± 0,450	± 0,142	± 0,044

Fonte: Elaborado pelo autor

A tabela 14 apresenta os valores de medidas encontrados para o aço 4140.

**Tabela 14 - Dimensões das amostras de aço 4140 em mm**

<b>Amostra</b>	<b>Comprimento</b>	<b>Espessura 1</b>	<b>Espessura 2</b>	<b>Altura 1</b>	<b>Altura 2</b>
<b>4140 A</b>	51,39	13,35	12,58	21,82	21,82
<b>4140 B</b>	52,05	13,41	11,66	21,69	21,68
<b>4140 C</b>	52,85	13,63	12,10	21,72	21,68

Fonte: Elaborado pelo autor

A tabela 15 apresenta as dimensões médias para as amostras de aço 4140. Observa-se que há uma variância maior na espessura média das amostras, superior a 9%. Isto é devido ao fato de que a chapa fornecida não estava com espessura uniforme, resultado de um corte irregular feito na peça. Já a altura média apresenta variância inferior a 0,13%.

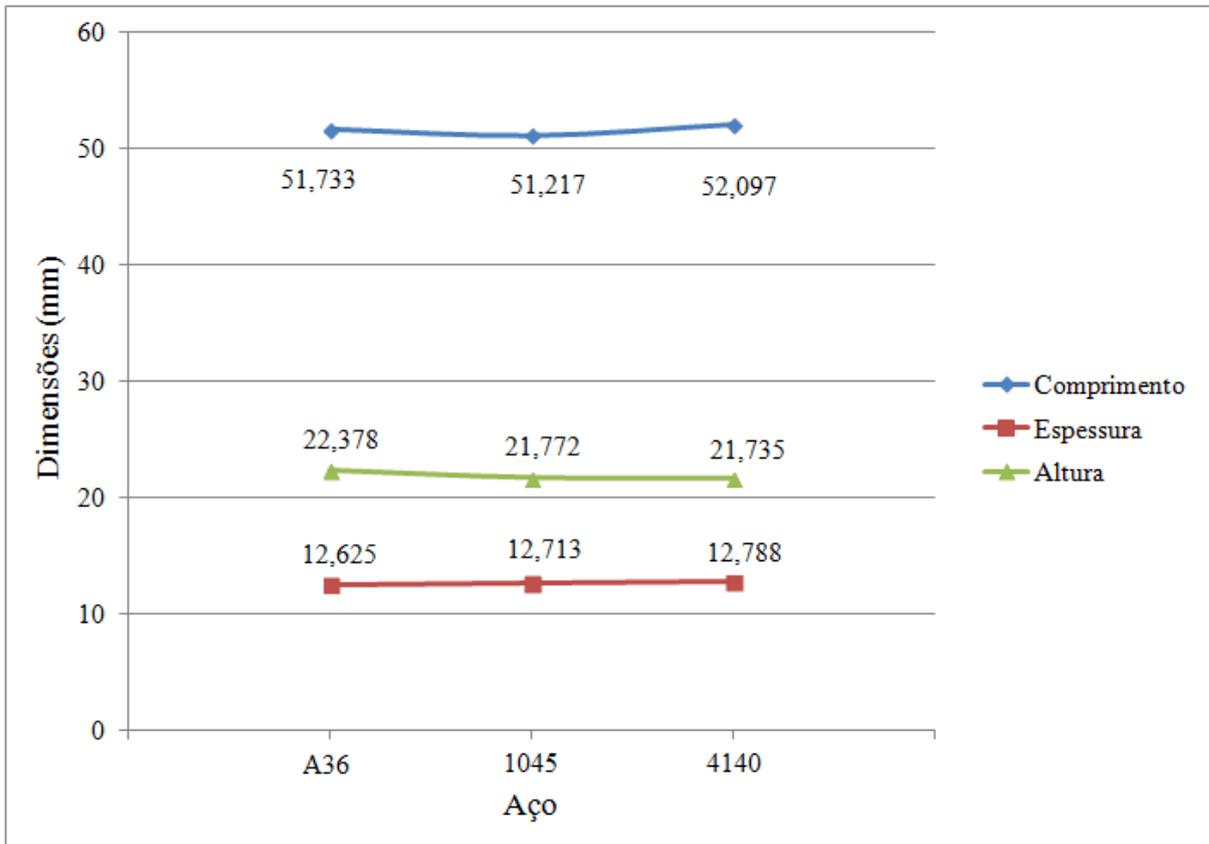
**Tabela 15 - Dimensões médias apresentadas pelas amostras de aço 4140**

<b>Amostra</b>	<b>Comprimento</b>	<b>Espessura média</b>	<b>Altura média</b>
<b>4140 A</b>	51,390	12,965 ± 0,544	21,82 ± 0,000
<b>4140 B</b>	52,050	12,535 ± 1,237	21,685 ± 0,007
<b>4140 C</b>	52,850	12,865 ± 1,082	21,700 ± 0,028
<b>Média</b>	52,097	12,788	21,735
<b>Desvio padrão</b>	± 0,731	± 0,225	± 0,074

Fonte: Elaborado pelo autor

A figura 36 ilustra um gráfico no qual se faz a comparação do comprimento, espessura média e altura média para todas as amostras dos 3 aços utilizados. Observa-se que a variância nestas dimensões não foi significativa de um modo geral.

**Figura 36 - Gráfico comparativo das dimensões das amostras**



Fonte: elaborado pelo autor

#### 4.4.4 Ensaios de microdureza

As 12 amostras foram submetidas a ensaios de microdureza Vickers com a utilização do equipamento HMV-2T, da marca Shimadzu, ilustrado pela figura 37. Neste ensaio, os valores de dureza foram avaliados a partir da relação entre a indentação e a força aplicada. A carga utilizada foi de 500g e o tempo de indentação, 15 segundos.

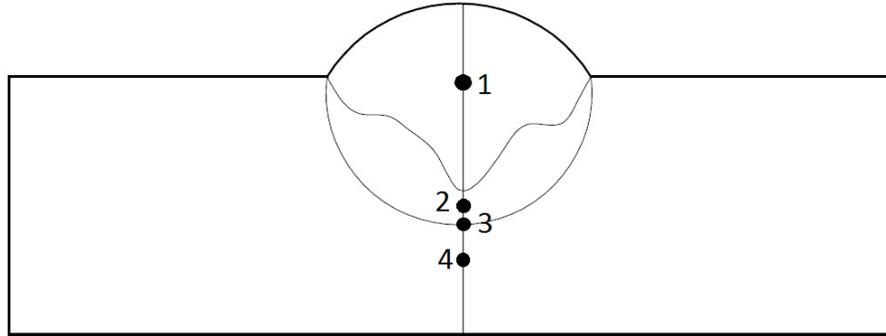
**Figura 37 - Equipamento de microdureza**



Fonte: Elaborado pelo autor

Foram realizadas 5 medidas de microdureza Vickers para cada amostra controle em pontos aleatórios e, para cada amostra dos corpos de prova soldados, foram realizadas 4 medidas. Para a realização destas medidas, uma linha vertical foi traçada nas amostras com a utilização de grafite no local em que houve maior penetração do cordão. Quatro pontos foram marcados nesta linha, como guia para realização das medidas de microdureza, conforme figura 38. Para todas as amostras, o ponto 1 foi localizado na zona fundida (ZF), o ponto 2 na zona termicamente afetada (ZTA), o ponto 3 na transição entre ZTA e metal de base (MB) e, por último, o quarto ponto foi localizado no metal de base. Os pontos para realização de microdureza foram escolhidos nesta linha para minimizar a variância da microdureza em relação ao afastamento do local soldado na peça, o que pode gerar divergências graças ao gradiente de resfriamento que a soldagem proporciona na peça.

**Figura 38 - Esquema de escolha dos pontos para medição de microdureza nas amostras**



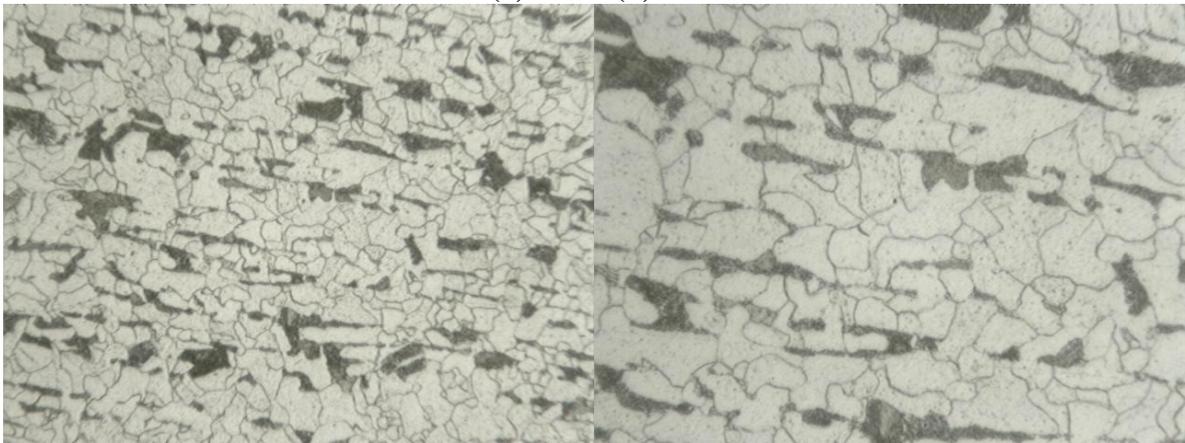
Fonte: Elaborado pelo autor

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 Análise metalográfica

Nas figuras 39, 40 e 41, são mostradas imagens com aumentos de 200x e 400x observadas no microscópio óptico dos aços A36, 1045 e 4140 antes da soldagem. Observa-se, no aço A36 a ocorrência de ferrita e perlita como esperado, sendo que estes últimos apresentam estrutura bandeada devido ao processo de laminação que o aço sofreu.

**Figura 39 - Micrografia (MO) do aço A36 antes do processo de soldagem: aumentos de (a) 200X (b) 400X**



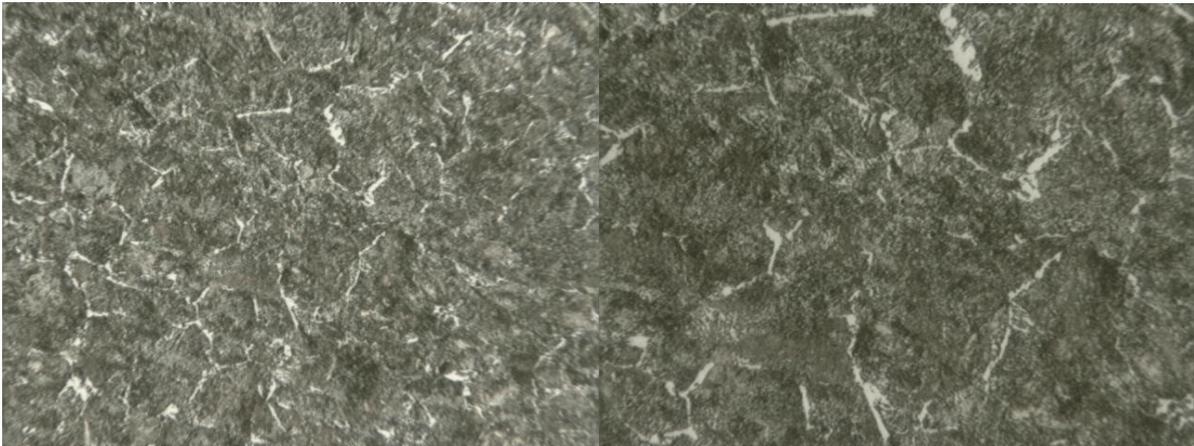
(a)

(b)

Fonte: Elaborado pelo autor

Conforme figura 40, a fotomicrografia da amostra controle retirada do aço 1045 não revelou microestrutura típica de aço 1045. Logo, podemos supor que por ter sido retirada da quina do CP, a amostra controle possuía diferente constituição e não se tratava de aço 1045.

**Figura 40 - Micrografia (MO) do aço 1045 antes do processo de soldagem: aumentos de (a) 200X (b) 400X**



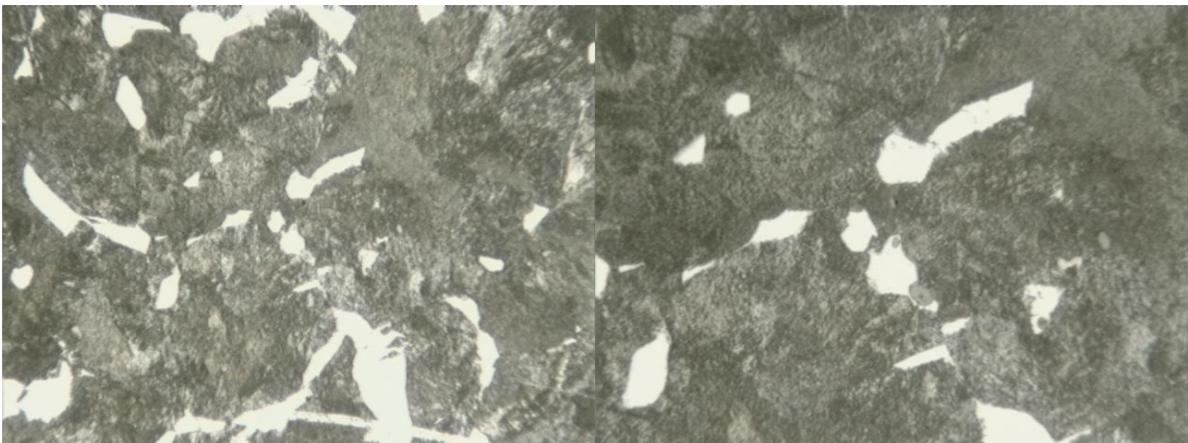
(a)

(b)

Fonte: Elaborado pelo autor

No aço 4140, evidencia-se a matriz perlítica e a ocorrência de grãos de ferrita.

**Figura 41 - Micrografia (MO) do aço 4140 antes do processo de soldagem: aumentos de (a) 200X (b) 400X**



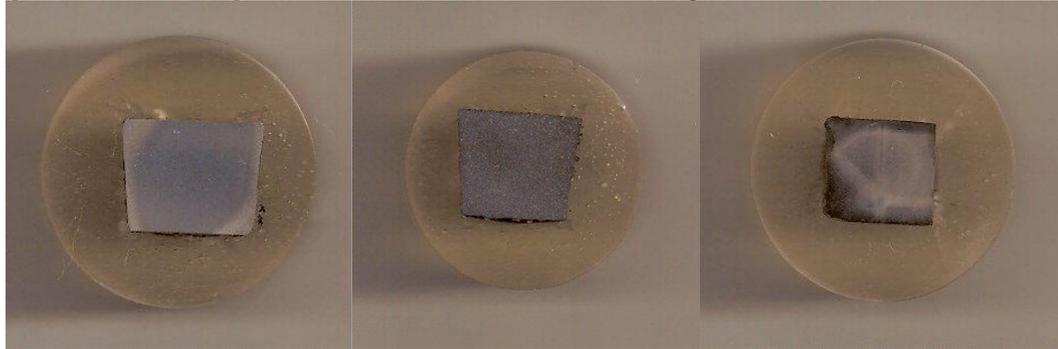
(a)

(b)

Fonte: Elaborado pelo autor

As macrografias das amostras controle são apresentadas na figura 42. Na figura 42(c), pode-se observar que a amostra apresenta marcas, que podem ser explicadas devido ao fato de que esta amostra foi retirada da quina do corpo de prova e, então, pode ser que possui constituição diferente da esperada para o aço AISI 1045. Também pode-se observar que o aço 1045 queimou com o ataque químico, o que impossibilitou a revelação e estudo dos microconstituintes do aço.

**Figura 42 - Macrografia das amostras controle do aço (a) A36, (b) 4140 e (c) 1045**



(a)

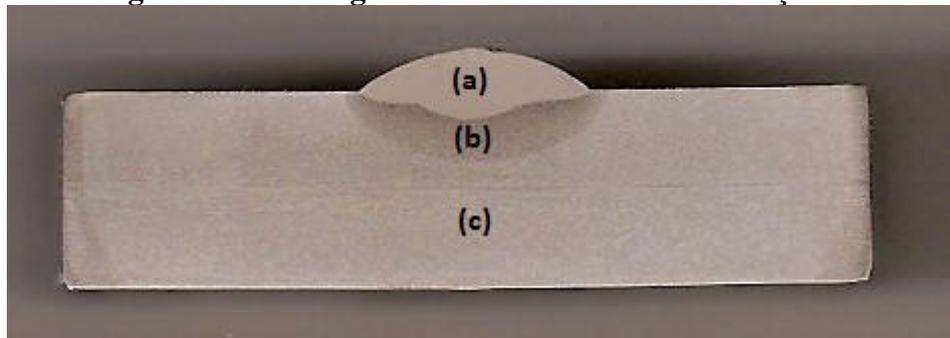
(b)

(c)

Fonte: Elaborado pelo autor

As figuras 43, 44 e 45 são macrografias de três amostras retiradas dos corpos de prova soldados do aço A36, 4140 e 1045, respectivamente. Observa-se, nas 3 figuras a presença da zona fundida (ZF), da zona termicamente afetada (ZTA) e do metal de base (MB). Observa-se, a olho nu, a variância significativa de espessura na amostra de aço 4140.

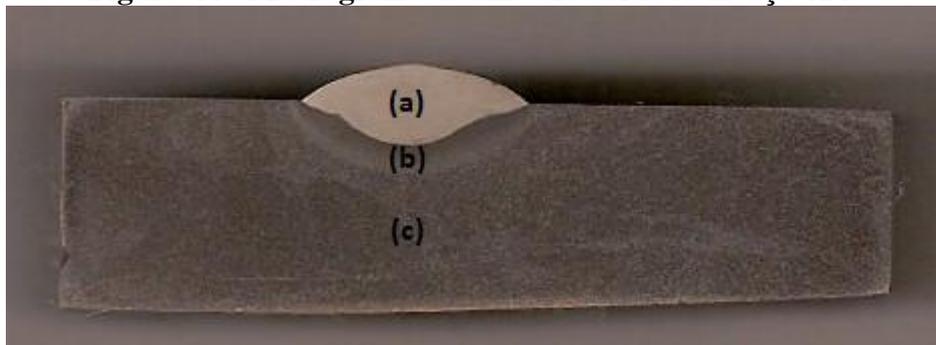
**Figura 43 - Macrografia da amostra soldada do aço A36**



**(a)ZF; (b) ZTA; (c) MB**

Fonte: Elaborado pelo autor

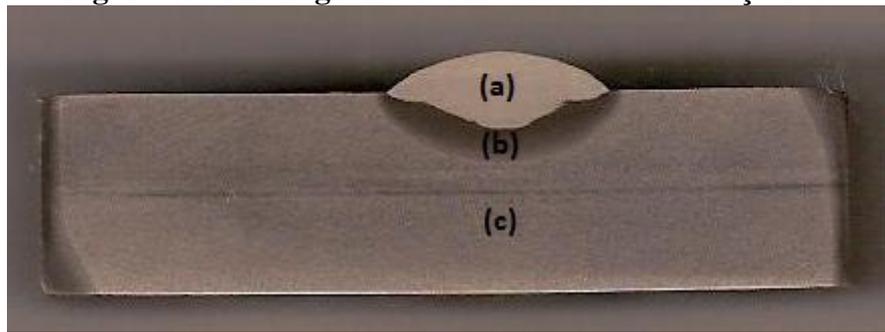
**Figura 44 - Macrografia da amostra soldada do aço 4140**



**(a)ZF; (b) ZTA; (c) MB**

Fonte: Elaborado pelo autor

**Figura 45 - Macrografia da amostra soldada do aço 1045**



**(a)ZF; (b) ZTA; (c) MB**

Fonte: Elaborado pelo autor

## 5.2 Controle dimensional do cordão

Além do dimensionamento das amostras, fez-se a medida da largura, penetração e do reforço do cordão de solda com a utilização do AutoCad. Os resultados estão apresentados na tabela 16 para o aço A36, na tabela 17 para o aço 1045 e na tabela 18 para o aço 4140.

**Tabela 16 - Dimensões do cordão de solda para o aço A36**

<b>Amostra</b>	<b>Penetração</b>	<b>Reforço</b>	<b>Largura</b>
<b>A36 A</b>	2,33	2,63	15,07
<b>A36 B</b>	1,81	2,84	15,09
<b>A36 C</b>	2,92	2,61	13,72
<b>Média</b>	2,35	2,69	14,63
<b>Desvio padrão</b>	± 0,56	± 0,13	± 0,79

Fonte: Elaborado pelo autor

**Tabela 17 - Dimensões do cordão de solda para o aço 1045**

<b>Amostra</b>	<b>Penetração</b>	<b>Reforço</b>	<b>Largura</b>
<b>1045 A</b>	3,20	2,62	14,62
<b>1045 B</b>	2,16	2,56	15,18
<b>1045 C</b>	2,95	2,48	14,77
<b>Média</b>	2,77	2,55	14,86
<b>Desvio padrão</b>	± 0,54	± 0,07	± 0,29

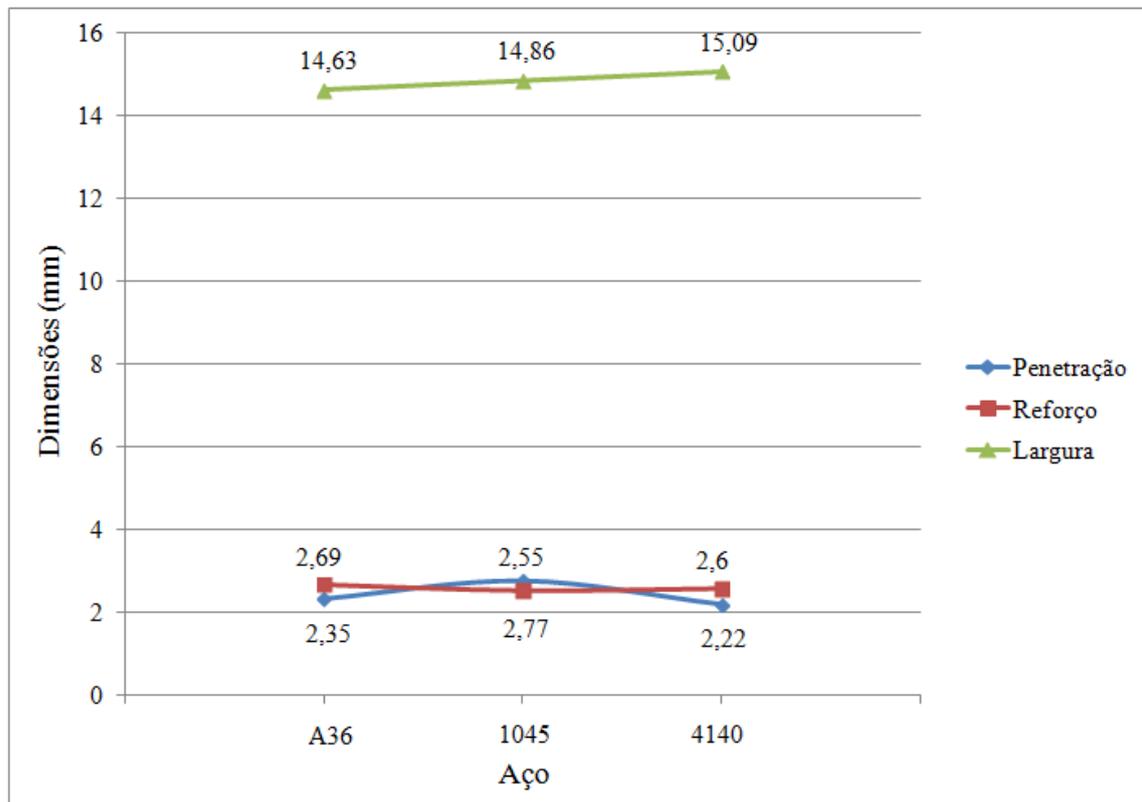
Fonte: Elaborado pelo autor

**Tabela 18 - Dimensões do cordão de solda para o aço 4140**

Amostra	Penetração	Reforço	Largura
4140 A	2,02	2,57	15,57
4140 B	2,08	2,60	15,05
4140 C	2,57	2,65	14,66
Média	2,22	2,60	15,09
Desvio padrão	± 0,30	± 0,04	± 0,46

Fonte: Elaborado pelo autor

A figura 46 apresenta o gráfico com o comparativo entre as médias das dimensões da penetração, reforço e largura dos cordões de solda dos três aços.

**Figura 46 - Gráfico comparativo das dimensões dos cordões**

Fonte: Elaborado pelo autor

Observando as tabelas e gráfico acima, conclui-se que houve ligeira diferença nas dimensões da penetração, do reforço e da largura do cordão, mais evidenciada na largura do cordão, uma vez que os parâmetros de soldagem utilizados foram os mesmos para a soldagem dos três tipos de materiais. Essa diferença pode ter sido ocasionada pela composição química dos materiais.

#### 4. Análise do comportamento mecânico - microdureza

Os resultados de microdureza Vickers obtidos para as amostra controle se encontram na tabela 19, assim como respectivas médias de microdureza e desvio padrão.

**Tabela 19 - Resultados de microdureza Vickers para amostras controle (HV)**

	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Medida 5	Média	Desvio padrão
<b>Aço A36</b>	121	127	133	135	136	130,40	± 6,31
<b>Aço 1045</b>	220	233	220	228	222	224,60	± 5,73
<b>Aço 4140</b>	238	235	256	235	242	241,20	± 8,76

Fonte: Elaborado pelo autor

Observa-se que o aço 4140 possui dureza superior ao aço 1045 e este apresenta maior dureza que o aço A36, como era esperado. Isto se deve ao fato de que o aço A36 possui a menor razão perlita/ferrita, enquanto o aço 4140 possui maior quantidade de perlita em sua microestrutura. A quantidade de perlita na estrutura do aço interfere em sua dureza, uma vez que este microconstituente possui dureza superior à da ferrita.

As medidas de microdureza para os pontos 1, 2, 3 e 4 das amostras de aço A36 estão representadas na tabela 20.

**Tabela 20 - Resultados de microdureza Vickers para amostras de aço A36 (HV)**

	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4
<b>A36 A</b>	218	187	168	160
<b>A36 B</b>	213	147	157	151
<b>A36 C</b>	203	182	159	157
<b>Média</b>	211,33	172	161,33	156
<b>Desvio padrão</b>	± 7,64	± 21,79	± 5,86	± 4,58

Fonte: Elaborado pelo autor

O ponto 1 diz respeito à zona fundida. Percebe-se que a dureza é elevada nesta zona, uma vez que ela é composta pelo metal do eletrodo utilizado no processo de soldagem. O ponto 2 apresenta dureza maior que a da amostra controle do aço A36. Isto acontece devido ao refino de grão que leva ao endurecimento do material. À medida que se afasta da zona fundida, percebe-se que a dureza vai diminuindo, o que evidencia que a soldagem influenciou na microestrutura do aço A36 soldado. Como a dureza do ponto 4 ainda se apresentava elevada em comparação com a amostra controle, fez-se a medida de dureza em um ponto aleatório e mais afastado, de 137 HV, mais próxima da medida de dureza encontrada para a amostra controle. Com isto, evidencia-se o efeito de aumento na dureza devido à alta temperatura utilizada e alta taxa de resfriamento do processo de soldagem.

Na tabela 21 são apresentados os resultados de microdureza Vickers para o aço 1045.

**Tabela 21 - Resultados de microdureza Vickers para amostras de aço 1045 (HV)**

	<b>Ponto 1</b>	<b>Ponto 2</b>	<b>Ponto 3</b>	<b>Ponto 4</b>
<b>1045 A</b>	202	278	237	213
<b>1045 B</b>	229	266	206,5	198
<b>1045 C</b>	205	258	230	214
<b>Média</b>	212	267,33	224,5	208,33
<b>Desvio padrão</b>	± 14,80	± 10,07	± 15,98	± 8,96

Fonte: Elaborado pelo autor

A dureza do ponto 1 nas amostras de aço 1045 apresenta uma dureza superior à do aço 1045 porém, similar ao ponto 1 das amostras de aço A36. Isso acontece porque o eletrodo utilizado para soldar os 2 aços foi o mesmo, logo o material da zona fundida é similar ao do aço A36. Também evidencia-se o aumento da dureza quanto mais próximo da zona fundida.

Este aumento da dureza pode ser explicado devido ao aparecimento de martensita na estrutura do aço, devido às altas temperatura e taxa de resfriamento oriundas do processo de soldagem. A dureza no ponto 4 apresentou-se inferior à da amostra controle e pode ser explicada devido à normalização.

Na tabela 22 são apresentados os resultados de microdureza Vickers para o aço 4140.

**Tabela 22 - Resultados de microdureza Vickers para amostras de aço 4140 (HV)**

	<b>Ponto 1</b>	<b>Ponto 2</b>	<b>Ponto 3</b>	<b>Ponto 4</b>
<b>4140 A</b>	258	330	294	257
<b>4140 B</b>	214	462	353	230
<b>4140 C</b>	254	379	253	230
<b>Média</b>	242	390	300	239
<b>Desvio padrão</b>	$\pm 24,33$	$\pm 66,73$	$\pm 50,27$	$\pm 15,59$

Fonte: Elaborado pelo autor

A dureza no ponto 1 do aço 4140 apresenta-se um pouco elevada em comparação às medidas realizadas nos outros aços também na zona fundida. Como a zona fundida é composta por material de adição e material de base, a elevada dureza do metal de base e formação de martensita faz com que a dureza no ponto 1 eleve-se. Também é evidenciado o aumento de dureza quanto mais próximo da zona fundida é feita a medida. Em comparação com as medidas de dureza na amostra controle, percebe-se um grande aumento na dureza do material, devido à formação de martensita na ZTA. Isto evidencia a mudança na microestrutura do aço devido às altas temperaturas utilizadas no processo de soldagem.

A têmpera é caracterizada pelo aquecimento do aço acima da temperatura eutetóide de 727 °C, obtendo-se assim, uma austenitização do aço e, graças ao rápido resfriamento, têm-se a formação de martensita. Durante a soldagem, o aço é fundido, e então pode-se afirmar que o aço é aquecido acima da temperatura eutetóide, uma vez que a temperatura de fusão do AISI 4140 é superior à temperatura eutetóide. Há então a formação de uma fase mais dura, porém mais frágil, a martensita. Com o processo de têmpera, o material também sofre redução da ductilidade, da tenacidade e aparecimento de apreciáveis tensões internas. Como o aço 4140 possui alta temperabilidade, forma muita martensita ao sofrer o tratamento térmico de têmpera, o que eleva muito a sua fragilidade, facilitando a formação de trincas.

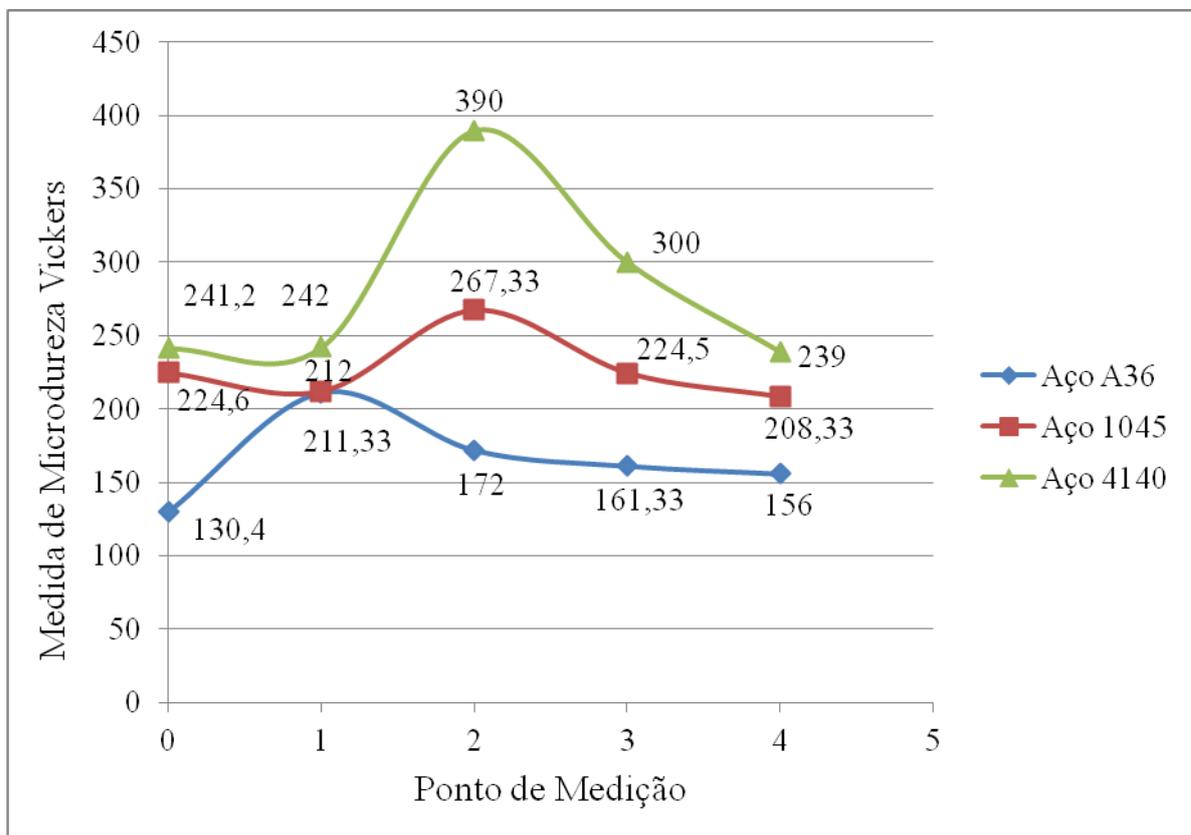
No ponto 4, a microdureza encontrada foi similar à da amostra controle, o que evidencia mais fortemente a formação de martensita na ZTA.

Para amenizar os efeitos de endurecimento do aço devido ao processo de soldagem, deve ser realizado um pré-aquecimento de aproximadamente 250 a 300°C antes da soldagem, sempre controlando a temperatura com o auxílio de um termômetro infravermelho ou termopar. O controle de temperatura interpasse também faz-se necessário. Além do pré-aquecimento, também deve ser realizado pós-aquecimento com auxílio de forno ou de uma

junta de amianto ou similar para reter o calor e impedir o resfriamento rápido das amostras soldadas e então, formação de martensita.

A figura 47 se refere a um gráfico com os valores de microdureza encontrados para todos os aços. O ponto 0 refere-se à microdureza da amostra controle. Percebe-se que, em algum ponto há aumento na dureza do CP, mesmo esta elevação na dureza não sendo evidenciada no mesmo ponto para todos os CP's. Além disso, percebe-se claramente que, quanto mais próximo da zona fundida, maior é a dureza do aço.

**Figura 47 - Gráfico comparativo dos valores de microdureza**



Fonte: Elaborado pelo autor

## 6. CONCLUSÃO

De acordo com os fatores avaliados neste trabalho e considerando os resultados obtidos, pode-se concluir que:

- a) Houve ligeira diferença nas dimensões da penetração, do reforço e da largura do cordão, que pode ter sido ocasionada pela diferente composição química dos materiais.
- b) Os aços A36, 1045 e 4140 apresentam aumento de dureza devido a mudanças em sua microestrutura em função das altas temperaturas atingidas durante a soldagem e rápido resfriamento que são consequências do processo. Este aumento de dureza é mais evidenciado no aço 4140, devido à sua maior temperabilidade.
- c) Quanto mais próximo da zona fundida, maior foi a dureza encontrada para o aço 4140, isso se deve em função da martensita formada.
- d) Deve-se utilizar processos de pré e pós-aquecimento do material para que se possa minimizar ou prevenir a formação de martensita, bem como o aumento da fragilidade.

## **7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

- a) Realizar normalização em todas as amostras antes da soldagem;
- b) Selecionar uma amostra de cada material apenas para caracterização do material como recebido;
- c) Avaliar a análise de microdureza das amostras soldadas através de perfil de microdureza;
- d) Avaliar a influência de outros parâmetros de soldagem na microdureza dos materiais estudados;
- e) Analisar a resistência à fadiga dos aços após a soldagem;
- f) Realizar fotomicrografias para as amostras soldadas a fim de evidenciar as transformações acontecidas.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBUQUERQUE, V.H.C. et al. **Sistema de segmentação de imagens para quantificação de microestruturas em metais utilizando redes neurais artificiais**. 2007. Rio de Janeiro. Disponível em <[http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1517-70762007000200018&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1517-70762007000200018&script=sci_arttext)> Acesso em 29/10/2012.

BRANDÃO, J.R. **Estudo da soldagem MIG-MAG na resistência à fadiga do aço AISI 4140 em diferentes condições operacionais de soldagem e tratamentos térmicos**. 2010. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte.

CALLISTER, W.D. **Fundamentos da ciência e engenharia de materiais**. 2 ed. Rio de Janeiro: LTC. 2006.

CATÁLOGO Açotubo. **Catálogo técnico: aços**. Disponível em <<http://www.guiametal.com.br/uploads/pdf/acos.pdf>> Acesso em 10/08/2013.

COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 4 ed. São Paulo: Blucher. 2008.

COSTA E SILVA, A.L.;MEI, P.R. **Aços e ligas especiais**. 3 ed. São Paulo: Blucher. 2011.

FIGUEIREDO, K.M. **Tecnologia da soldagem**. 2005. Departamento de Mecânica e Materiais, Centro Federal de Educação Tecnológica do Maranhão, São Luís. Disponível em <<http://pt.scribd.com/doc/53660547/Apostila-de-Tecnologia-Da-Soldagem>> Acesso em 26/10/2012.

FORTES, C. **Apostila arco submerso – ESAB**. 2004. Disponível em <<http://www.esab.com.br/br/por/Instrucao/biblioteca/Apostilas.cfm>> Acesso em 19/10/2012.

MARQUES, P.V.; MODENESI, P.J.; BRACARENSE, A.Q. **Soldagem: fundamentos e tecnologia**. 3 ed. Belo Horizonte: Editora UFMG. 2011.

MODENESI, P.J. **Introdução à física do arco elétrico**. 2008. Soldagem I-Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. Disponível em <[www.demet.ufmg.br/grad/disciplinas/emt019/arco\\_graduacao.pdf](http://www.demet.ufmg.br/grad/disciplinas/emt019/arco_graduacao.pdf)> Acesso em 26/10/2012.

MODENESI, P.J, MARQUES, SANTOS. **Metalurgia da soldagem 4: influências metalúrgicas no metal fundido**. Disponível em <[ftp://ftp.demec.ufmg.br/lrssi/MetalurgiaSoldagem\\_Graduacao/ApostilasModenesi/metsol02.pdf](ftp://ftp.demec.ufmg.br/lrssi/MetalurgiaSoldagem_Graduacao/ApostilasModenesi/metsol02.pdf)> Acesso em 31/08/2013.

MODENESI, P.J. **Terminologia usual de soldagem e símbolos de soldagem**. 2001. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. Disponível em <<http://www.embratecno.com.br/TERMINOLOGIA%20E%20SIMBOLOGIA%20DE%20OLDAGEM%20-%20UFMG.pdf>> Acesso em 30/07/2013.

MODENESI, P.J; BRACARENSE, A.Q. **Introdução à física do arco elétrico e sua aplicação na soldagem dos metais**. 2007. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. Disponível em <<http://www.iem.unifei.edu.br/professores/edmilson/Arco.pdf> > Acesso em 30/07/2013.

TYNE, C.V.; WALTERS, J. **Materiais de forjamento: aços-carbono e de baixa liga - parte II**. Revista Forge. Disponível em <<http://www.revistaforge.com.br/artigo/materiais-de-forjamento-acos-carbono-e-de-baixa-liga-parte-ii/?conteudo=4>> Acesso em 29/10/2012.