

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

DOUGLAS MARÇAL BRITO RIBEIRO

AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO AÇO AISI 4140 SUBMETIDO À
SOLDAGEM A ARCO SUBMERSO UTILIZANDO DIFERENTES CONDIÇÕES DE
SOLDAGEM

BELO HORIZONTE

2015

DOUGLAS MARÇAL BRITO RIBEIRO

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO AÇO AISI 4140 SUBMETIDO À
SOLDAGEM A ARCO SUBMERSO UTILIZANDO DIFERENTES CONDIÇÕES DE
SOLDAGEM**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no curso de graduação em Engenharia de Materiais no 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

BELO HORIZONTE

2015

DOUGLAS MARÇAL BRITO RIBEIRO

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO AÇO AISI 4140 SUBMETIDO À
SOLDAGEM A ARCO SUBMERSO UTILIZANDO DIFERENTES CONDIÇÕES DE
SOLDAGEM**

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

Aprovado em 05/02/2015

BANCA EXAMINADORA

Prof^o. Msc. Joel Romano Brandão

Prof^a. Dra. Maria Celeste Monteiro de S. Costa (Co-orientadora) CEFET-MG

Prof^a. Dra. Elaine Carballo Siqueira Corrêa CEFET-MG

AGRADECIMENTOS

“Deus é bom o tempo todo, o tempo todo Deus é bom” e assim começo os meus agradecimentos, pois Ele é a base de tudo e junto a Ele estendo os meus agradecimentos àqueles que estiveram ao meu lado até aqui:

Aos meus pais e minha irmã, por um sorriso ou puxão de orelha, me deram força e apoio para nunca desistir dos meus estudos. Muito Obrigado!

Ao anjinho que Deus colocou em minha vida, Mariane, por acreditar sempre em mim e em tão pouco tempo me mostrar o quanto Deus é bom.

Ao Prof. Joel Romano Brandão, pela oportunidade de poder trabalhar com ele e me mostrar que sempre existe uma solução para as adversidades no ambiente de trabalho.

A Prof. Maria Celeste, que de prontidão abraçou o meu trabalho e acreditou podíamos fazer um trabalho bem feito.

A querida Prof. Elaine Carballo, que desde o início, da Iniciação Científica ao TCC, com sua paciência e atenção, me ajudou a fazer um ótimo trabalho.

As meninas do Laboratório de Microdureza do CEFET-MG, Suzanny e Aline, que também contribuíram para a realização deste trabalho.

E aos meus amigos do CEFET-MG e de vida, que sempre estiveram ao meu lado direta ou indiretamente.

RESUMO

O crescente uso de novas ligas de aço, em particular os aços de alta resistência e baixa liga, em aplicações industriais, tem solicitado uma grande variedade de estudo em cima do comportamento e tecnologia de produção desses materiais. Partindo desse pressuposto, a soldagem vem sendo um processo de fabricação muito estudado hoje em dia. O presente trabalho tem como objetivo avaliar o comportamento do aço AISI 4140, que é um aço de alta resistência e baixa liga, submetido ao processo de soldagem à Arco Submerso (SAW), onde serão utilizadas diferentes condições de soldagem, como por exemplo, pré-aquecimento e resfriamento controlado. Por fim, serão analisados a dureza, penetração, largura e reforço do cordão de solda.

Palavras-chaves (04): AISI 4140, SAW, Dureza, Penetração da Solda.

ABSTRACT

The increasing use of new steel alloys, particularly high strength low alloy steel, for industrial applications has prompted a large number of studies on the behavior and production technology of these materials. Based on this assumption, the welding has been a manufacturing process much studied today. This study aims to evaluate the behavior of steel AISI 4140, which is a steel high strength low alloy, submitted to the welding process the Submerged Arc (SAW), where different welding conditions will be used, such as pre -heating and controlled cooling. Finally, we will analyze the hardness, penetration, width and reinforcement of the weld bead.

Keywords (04): AISI 4140, SAW, Hardness, Weld Penetration.

SUMÁRIO

1. OBJETIVO	15
1.1. Objetivos específicos	15
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1. União de materiais	16
2.2. Histórico e definição da soldagem	16
2.3. Principais processos de soldagem	18
2.4. Processo de soldagem a arco submerso	20
2.4.1. Equipamentos	22
2.4.2. Fluxos	23
2.4.3. Arames/Eletrodos	25
2.5. Aço 4140	27
2.5.1. Cromo	28
2.5.2. Molibdênio	28
2.6. Parâmetros de soldagem	28
2.6.1. Arco Elétrico	28
2.6.2. Tensão	30
2.6.3. Corrente	31
2.6.4. Velocidade de Soldagem	32
2.7. Defeitos da soldagem	32

2.7.1.	Tensões Residuais	32
2.7.2.	Porosidade	33
2.7.3.	Inclusões	33
2.7.4.	Mordeduras.....	34
2.8.	Geometria do cordão.....	34
2.8.1.	Morfologia do cordão de solda.....	35
2.8.2.	Largura e altura do cordão de solda	36
2.8.3.	Penetração do cordão de solda.....	37
2.9.	Metalografia.....	38
2.9.1.	Macrografia	38
2.9.2.	Micrografia	39
2.9.3.	Ferrita	40
2.9.4.	Austenita.....	40
2.9.5.	Cementita.....	40
2.9.6.	Perlita.....	41
2.9.7.	Martensita	41
3.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	43
3.1.	Descrição Geral do Trabalho Realizado	43
3.2.	Material	44
3.3.	Corpo de Prova	45

3.4. Procedimento de Soldagem	45
3.5. Caracterização Macro e Microestrutural do Material Soldado	48
3.6. Ensaio de Microdureza	50
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	51
4.1. Macroestrutura dos Corpos de Prova Soldados	51
4.2. Microestrutura dos Corpos de Prova Soldados	54
4.3. Distribuição de Microdureza nos Corpos de Prova Soldados.....	58
5. CONCLUSÃO.....	61
REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	62

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Desenvolvimento dos processos de soldagem a partir de 1800.....	17
Figura 2: Duas superfícies em contato.	18
Figura 3: Desenho esquemático da soldagem por fusão.....	19
Figura 4: Desenho esquemático do processo de soldagem a arco submerso.....	21
Figura 5: Desenho esquemático do equipamento para soldagem a arco submerso.....	22
Figura 6: Grãos do fluxo fundido	24
Figura 7: Grãos de fluxos aglomerados.....	25
Figura 8: Classificação do sistema arame-fluxo, norma AWS A 5.17.....	26
Figura 9: Classificação do sistema arame-fluxo, norma AWS A 5.23.....	27
Figura 10: Desenho esquemático do arco elétrico.....	29
Figura 11: Desenho esquemático mostrando a queda de potencial ao longo do arco elétrico	30
Figura 12: Morfologia do cordão devido a polaridade	32
Figura 13: Diferentes tipos de junta e chanfros	35
Figura 14: Corte transversal de uma junta soldada.....	36
Figura 15: Características do cordão de solda.....	36
Figura 16: Desenho esquemático mostrando a penetração no cordão de solda.....	37
Figura 17: Fotomicrografia de uma junta soldada	39
Figura 18: Fotomicrografia de uma peça soldada	39
Figura 19: Grãos de ferrita e pequenas inclusões não-metálicas.....	40

Figura 20: Colônias de perlita em um aço eutectóide	41
Figura 21: Desenho esquemático da morfologia da martensita.....	42
Figura 22: Martensita formada em um processo de soldagem	42
Figura 23: Fluxograma da parte experimental.....	44
Figura 24: Distinção dos corpos de prova	45
Figura 25: Forno utilizado para o pré-aquecimento	46
Figura 26: Equipamento para soldagem a arco submerso do CEFET-MG	47
Figura 27: Desenho esquemático do gabarito.....	47
Figura 28: Gabarito utilizado durante a soldagem a arco submerso.....	48
Figura 29: Corpo de prova soldado	48
Figura 30: Serra de fita	49
Figura 31: Peças cortadas	49
Figura 32: Representações esquemáticas do procedimento de microdureza.....	50
Figura 33: Macrografias dos corpos de prova soldados sem pré-aquecimento	51
Figura 34: Macrografias dos corpos de prova soldados com pré-aquecimento	51
Figura 35: Gráfico com valores de largura, reforço e penetração dos CPs, sem pré-aquecimento.	52
Figura 36: Gráfico com valores de largura, reforço e penetração dos CPs, com pré-aquecimento.	53
Figura 37: Valores da média de largura, reforço e penetração dos CPs, com e sem pré- aquecimento.....	53

Figura 38: Morfologias de constituintes conforme a classificação da Tabela 5.....	55
Figura 39: Micrografias dos corpos de prova soldados sem pré-aquecimento.....	56
Figura 40: Micrografias dos corpos de prova soldados com pré-aquecimento.	57
Figura 41: Perfil de dureza dos cordões depositados, sem pré-aquecimento.	59
Figura 42: Perfil de dureza dos cordões depositados, com pré-aquecimento.....	59
Figura 43: Média dos perfis de dureza dos cordões, com e sem pré-aquecimento.	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Principais processos de soldagem por fusão.....	20
Tabela 2: Composição química do aço ABNT 4140.....	28
Tabela 3: Composição química do aço SAE 4140.....	45
Tabela 4: Parâmetros de Soldagem.....	46
Tabela 5: Valores de largura, reforço e penetração dos CPs sem pré-aquecimento.....	52
Tabela 6: Valores de largura, reforço e penetração dos CPs com pré-aquecimento.....	53
Tabela 7: Constituintes no esquema de classificação de microestrutura do IIW.....	54
Tabela 8: Resultados de microdureza Vickers (HV).....	58

INTRODUÇÃO

A soldagem é o método mais utilizado atualmente na construção e união de estruturas e peças. Na soldagem existem vários diferentes tipos de processos e a soldagem a arco submerso (SAW) é um dos principais, pois é conhecido por ser um processo de alta produtividade e é amplamente utilizado em indústrias mecânico-metalúrgicas na produção de tanques, peças automotivas, confecção de tubos, entre outros produtos (ANNONI, 2011).

O mercado necessita cada vez mais de novos materiais, exigindo uma evolução paralela na qualidade dos aços, como os microligados e os de alta resistência e baixa liga. É o caso do aço ABNT 4140 que é um aço de baixa liga e possui uma elevada resistência mecânica. Porém não é um aço usualmente utilizado para soldagem.

O presente trabalho tem como objetivo principal avaliar o comportamento do aço ABNT 4140 sob a soldagem a arco submerso submetido a diferentes condições de soldagem.

1. OBJETIVO

Este trabalho tem o objetivo geral de caracterizar e avaliar o comportamento do aço 4140 submetido à soldagem a Arco Submerso.

1.1. Objetivos específicos

- Preparação do aparato para a execução da soldagem para garantir a repetitividade do cordão;
- Análise da morfologia do cordão de solda (largura, reforço e penetração).
- Análise microestrutural das regiões do cordão de solda;
- Análise da propriedade mecânica do cordão na zona termicamente afetada (ZTA) através da microdureza.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. União de materiais

De maneira geral, a união de dois materiais, tratada a nível atômico, baseia-se na atração dos átomos de dois corpos distintos. A partir disso, há um arranjo molecular, de maneira regular, dando origem a várias estruturas cristalinas (MACHADO, 1996).

Partindo desse ponto vista, pode-se dividir a união de materiais em duas categorias, baseado a partir de forças microscópicas (interatômicas e intermoleculares) e de forças macroscópicas. Na primeira situação, o foco é a aproximação dos átomos ou moléculas das peças que serão unidas, ou de um material intermediário adicionado à junta, com isso, há a formação de ligações químicas, em particular, ligações metálicas e de Van der Waals. Um exemplo é a soldagem, a colagem e a brasagem. Já na segunda situação, a presença da resistência ao cisalhamento e das forças de atrito entre as superfícies de contato, é que dão origem a essas forças macroscópicas. A rebitagem e a parafusagem são um bom exemplo (MARQUES et al, 2009).

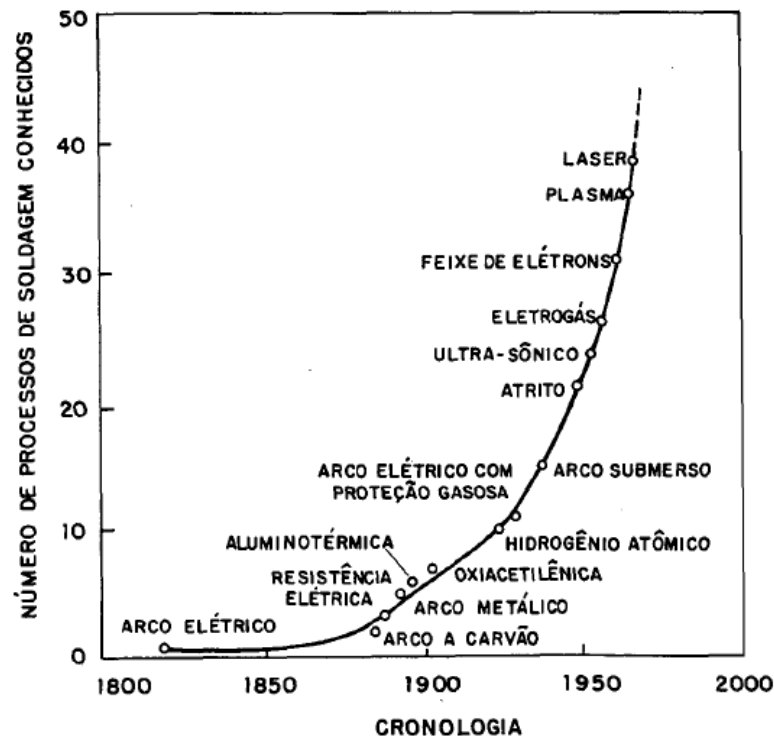
2.2. Histórico e definição da soldagem

Apesar de possuir aparência moderna, existem fortíssimos indícios de que a união de materiais já era praticada há cerca de quatro mil e oitocentos anos, nos vales dos rios Nilo e Tigre-Eufrates (MACHADO, 1996).

Em 1800, na Itália, Alessandro Volta descobriu os princípios da bateria, a dessa descoberta, em 1801, Humphry Davy (Inglaterra) conseguiu produzir um arco elétrico entre dois eletrodos de carvão. Entretanto, a soldagem realmente ganhou impulso e foi se modernizando nos últimos 60 anos (MACHADO, 1996). A FIG. 1 apresenta a evolução dos processos de soldagem ao longo do tempo.

Durante a II Guerra Mundial, devido à fabricação de navios e aviões soldados, o processo de soldagem teve seu grande impulso, apesar de o arco elétrico ter sido desenvolvido no século XIX.

Figura 1: Desenvolvimento dos processos de soldagem a partir de 1800.



Fonte: WAINER et al, 2011.

A união de dois materiais é realizada, ou através da fusão dos mesmos em íntimo contato; ou pela fusão de ambos e adição de outro material fundido; ou, ainda, simplesmente, por contato destes materiais, nas fases sólida ou semi-sólida. Em geral, a soldagem provoca maior distorção no metal de base e normalmente não é utilizada sobre cerâmicos (MACHADO, 1996).

A soldagem é basicamente um processo que utiliza uma fonte de calor para unir duas partes metálicas, com ou sem aplicação de pressão. A solda é resultado desse processo (WAINER et al, 2011).

Os processos de soldagem devem atender os seguintes requisitos:

- Para unir dois materiais, similares ou não, o processo de soldagem deve gerar uma quantidade de energia suficiente para essa união;
- Remover as contaminações das superfícies a serem unidas;
- Evitar que o ar atmosférico contamine a região durante a soldagem;
- Propiciar o controle da transformação de fase, para que a solda alcance as propriedades desejadas, sejam elas físicas, químicas ou mecânicas (WAINER et al, 2011).

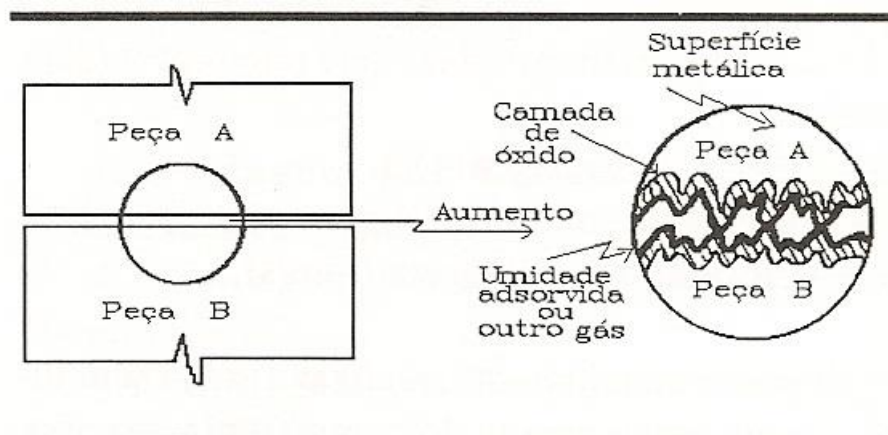
Quando se trata da união de dois materiais distintos, a atração entre os átomos é a maneira mais básica de se pensar. Isso se deve ao rearranjo dos átomos de maneira regular, o que resulta em diversas estruturas cristalinas.

A partir disso, uma solda seria realizada de maneira espontânea, se os átomos dessas superfícies estivessem bem próximos, resultaria uma força de atração entre eles.

Existem dois problemas que dificultam a realização de uma solda de forma espontânea, são eles:

- A limpeza e a preparação de superfícies perfeitamente planas e limpas a nível atômico;
- Presença de gás adsorvido sobre as superfícies e a presença de camadas oxidadas (MACHADO, 1996). A FIG. 2 evidencia a presença da camada de oxido e da camada de umidade adsorvida.

Figura 2: Duas superfícies em contato.



Fonte: MACHADO, 1996.

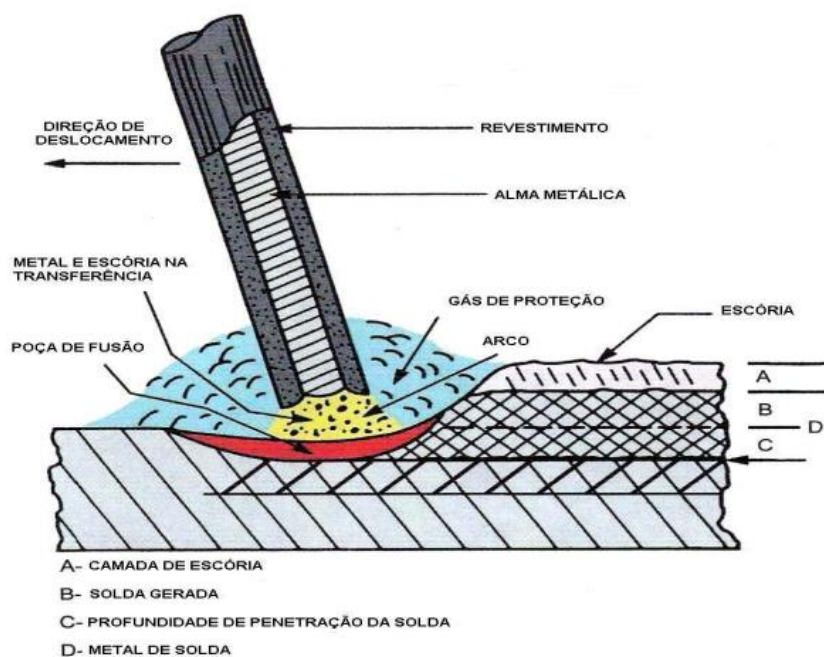
2.3. Principais processos de soldagem

Soldagem por fusão, soldagem no estado sólido ou por pressão, brasagem e solda branda, são os principais tipos de processos de soldagem. A soldagem por fusão inicia-se a partir da fusão do metal de adição e do metal base, onde a energia aplicada no processo produz um calor capaz de fundir o metal base, fazendo com que ocorra a solubilização no estado líquido. Um exemplo é o arco submerso. Já a união dos materiais, na soldagem no estado sólido ou por pressão, ocorre através da difusão. A energia aplicada no processo é responsável por criar uma tensão no metal base. Um exemplo é a soldagem por ponto (WAINER et al, 2001).

A TAB. 1 resume os principais tipos de soldagem empregando o processo por fusão.

De maneira geral, para ilustrar a soldagem por fusão, onde o metal base, que é o material das peças que serão soldadas, é misturado ao metal de adição, que é um metal adicional que será fornecido para a formação da solda. Para que o metal de adição funda ele recebe uma quantidade de calor suficiente para que possa ocorrer essa fusão (MARQUES et al, 2009). Aliado ao metal base forma-se a poça de fusão, como pode ser identificado na FIG. 3.

Figura 3: Desenho esquemático da soldagem por fusão.



Fonte: FARNEZE, 2007

Tabela 1: Principais processos de soldagem por fusão.

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 aço 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 aço 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 aço 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 aço 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 ($\gg 10^{-4}$ 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 oxiacetilênica		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: Disponível em: <<http://demet.eng.ufmg.br/wp-content/uploads/2012/10/metalurgia.pdf>>

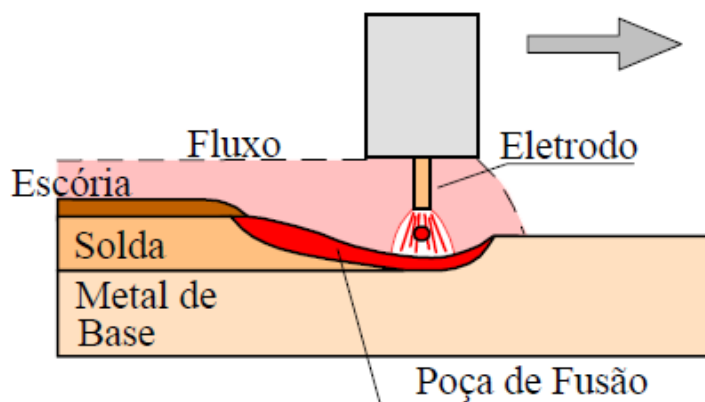
O processo de soldagem escolhido para o presente trabalho é o processo a arco submerso.

2.4. Processo de soldagem a arco submerso

A soldagem a arco submerso (Submerged Arc Welding – SAW) é um dos processos de soldagem por fusão, esse processo gera um arco elétrico entre um eletrodo metálico nu e a peça de trabalho. O arco ocorre sob uma camada de um material granular fusível, chamado de “fluxo”, que é colocado sobre a região de solda, protegendo-o da contaminação pela atmosfera (MARQUES et al, 2009). Dessa forma, a soldagem ocorre sem faíscas, respingos

ou luminosidade, características dos demais processos de soldagem com arco aberto (WAINER et al, 2011). A FIG. 4, apresenta a exemplificação do processo.

Figura 4: Desenho esquemático do processo de soldagem a arco submerso



Fonte: Disponível em: <<http://demet.eng.ufmg.br/wp-content/uploads/2012/10/metalurgia.pdf>>

De acordo com Marques et al (2009), “A adição de metal é obtida do próprio eletrodo, que tem a forma de fio ou fita contínuos e é alimentado por um dispositivo mecânico, podendo ser suplementada por outros eletrodos ou materiais contidos no fluxo de soldagem. A operação é normalmente mecanizada, embora possa também ser realizada de modo semimecanizado, isto é, o soldador é quem movimenta a tocha ao longo da junta e mantém a distância entre a tocha e a peça”.

Durante a soldagem, o calor produzido pelo arco elétrico funde uma parte do fluxo juntamente com a ponta do eletrodo. A zona de soldagem fica sempre envolta e protegida pelo fluxo escorificante, sobrepondo-se ainda por uma camada de fluxo não fundido. O eletrodo permanece um pouco acima do metal de base, e o arco elétrico se desenvolve nesta posição. Com o deslocamento do eletrodo ao longo da junta, o fluxo fundido sobrenada e se separa do metal de solda líquida na forma de uma escória (WAINER et al, 2011). Marques et al (2009), complementa que o fluxo fundido atua como uma camada protetora que evita a contaminação do cordão e reduz sua velocidade de resfriamento e a parte não fundida do fluxo pode ser reciclada em novas operações, desde que não se contamine durante a operação.

No processo SAW, convencionalmente, os eletrodos para esse tipo de soldagem têm o diâmetro geralmente entre 2,4 e 6 mm, permitindo a soldagem com elevada densidade de corrente, em uma ampla faixa, de tal forma que o processo é aplicável a espessuras a partir de 3,0 mm, com elevada taxa de deposição. Variações no processo, como a utilização simultânea

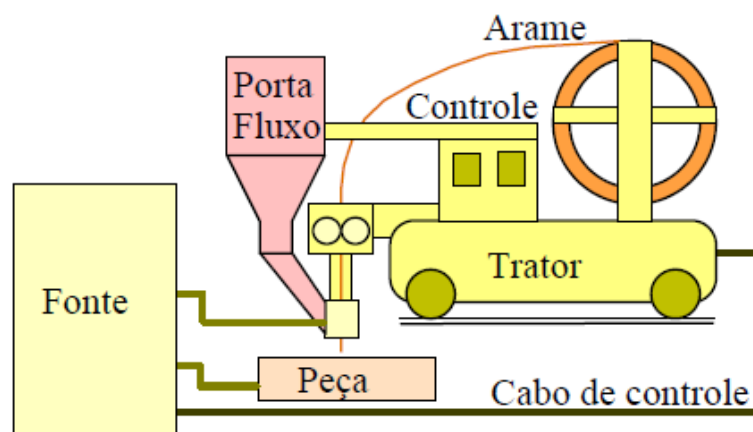
de mais de um eletrodo e adição de pó metálico ao fluxo permitem elevar ainda mais a taxa de deposição (MARQUES et al, 2009).

Concluindo, Marques et al (2009), afirma que a limitação da soldagem SAW é quanto à posição de soldagem. Como o processo utiliza alta intensidade de corrente, o volume da poça de fusão é grande e o metal líquido tende a escorrer para fora da junta. Além disso, o fluxo é constituído por um material granular, assim o processo fica limitado à soldagem nas posições plana e horizontal.

2.4.1. Equipamentos

O equipamento básico para a soldagem a arco submerso consiste de uma fonte de energia, tocha de soldagem, alimentador de arame, sistema de controle, dispositivo para alimentação do fluxo e cabos elétricos. Muitas vezes, alguns destes elementos estão montados num único conjunto chamado de cabeçote de soldagem, usado particularmente na soldagem mecanizada (MARQUES et al, 2009), como mostrado na FIG. 5.

Figura 5: Desenho esquemático do equipamento para soldagem a arco submerso



Fonte: Disponível em: <<http://demet.eng.ufmg.br/wp-content/uploads/2012/10/metalurgia.pdf>>

A alimentação do fluxo é feita por meio de um reservatório acoplado a tocha ou cabeçote, que alimenta continuamente o sistema. O movimento deste sistema pode ser feito de duas formas; ou o cabeçote se movimenta sobre a peça a ser soldada, ou esta se movimenta e o cabeçote permanece fixo (WAINER et al, 2011).

Wainer et al (2011) fala que as fontes de energia do tipo gerador, utilizando corrente contínua (CC) ou transformador-retificador, para o uso de corrente alternada (CA). Machado (1996) analisa dos dois tipos de corrente, da seguinte maneira:

Em geral, a corrente contínua permite um melhor controle da geometria do cordão, fácil início e apurado controle do comprimento do arco e alta velocidade;

- A corrente contínua eletrodo positivo (CCEP) fornece o arco mais estável, melhor controle da geometria do cordão e maior penetração;
- A corrente contínua eletrodo negativo (CCEN) resulta na maior taxa de deposição, com menor penetração;
- A corrente alternada produz penetração intermediária entre CCEP e CCEN, minimizando a deflexão magnética, utilizando preferencialmente correntes acima de 1000 A.

2.4.2. Fluxos

De acordo com Marques et al (2009) os fluxos para soldagem a arco submerso são compostos por uma mistura de óxidos e outros minerais, podendo conter ferro-ligas e têm diversas funções na operação, entre elas: estabilizar o arco, fornecer elementos de liga para o metal de solda, proteger o arco e o metal aquecido da contaminação pela atmosfera, minimizar as impurezas no metal de solda, formar escória com determinadas propriedades físicas e químicas que podem influenciar o aspecto e o formato do cordão de solda, sua destacabilidade, a ocorrência de mordeduras etc.

As características de desempenho e as propriedades mecânicas são os dois fatores que influenciam a escolha de um fluxo. As características de desempenho incluem facilidade de remoção da escória, capacidade de remoção de óxidos e carepa, capacidade de condução elétrica, possibilidade de uso de vários arames e possibilidade de utilizar corrente alternada. Já as propriedades mecânicas são fatores de influência quando requer um serviço a baixas temperaturas. Para essas soldas, deve haver um compromisso das características de desempenho para satisfazer às propriedades mecânicas requeridas (Apostila Arco Submerso ESAB, 2004).

Os fluxos podem ser divididos, basicamente, em fluxos fundidos e fluxos aglomerados, sendo o último o de maior utilização.

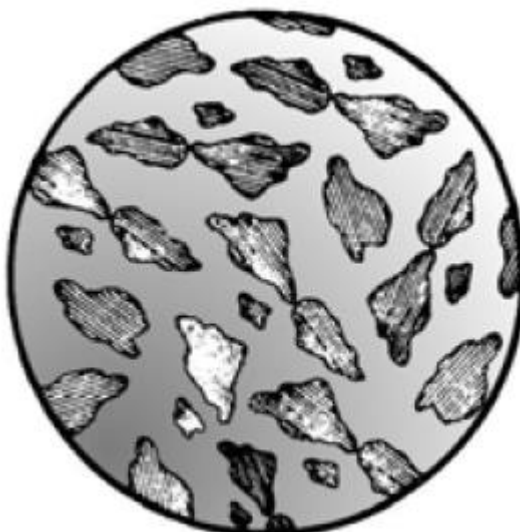
Machado (1996) explica que para se produzir um fluxo fundido deve-se fazer uma mistura a seco dos compostos e, então, fundi-la (geralmente num forno a arco). O banho é vazado em água, ou sobre uma superfície metálica, assim, ocorre um choque térmico reduzindo o fluxo a

partículas de tamanhos variados, que posteriormente serão peneirados. Dependendo do caso, essas partículas são, ainda, moídas para alcançar as granulometrias desejadas, a FIG 6 exemplifica o aspecto do fluxo fundido.

Por fim, Machado (1996) destaca as principais propriedades desses fluxos:

- Possuem boa homogeneidade química;
- Podem ser utilizados com a menor velocidade de soldagem;
- Não são higroscópicos e, portanto, requerem menores cuidados com sua estocagem, além de praticamente não introduzirem hidrogênio no metal de solda.

Figura 6: Grãos do fluxo fundido



Fonte: Apostila Arco Submerso, ESAB, 2004.

Para fabricar os fluxos aglomerados deve-se pulverizar, misturar a seco os ingredientes e aglomera-los com silicato de potássio, sódio ou uma mistura dos dois (MARQUES et al, 2009). A apostila Arco Submerso, ESAB, 2004 completa que essa massa resultante deve ser pelotizada, seca e reduzida mecanicamente, FIG. 7. As partículas que são peneiradas e classificadas para obter as seguintes características:

- Melhor desempenho na remoção de óxidos e carepa;
- Menor consumo de fluxo;
- Bom desempenho sobre uma gama de aplicações com uma única distribuição granulométrica;
- Podem ser ligados.

Figura 7: Grãos de fluxos aglomerados



Fonte: Apostila Arco Submerso, ESAB, 2004.

2.4.3. Arames/Eletrodos

Uma vez que o fluxo foi escolhido por suas características de desempenho, pode ser selecionado um arame de soldagem para obtenção das propriedades mecânicas requeridas para a solda (Apostila Arco Submerso ESAB, 2004).

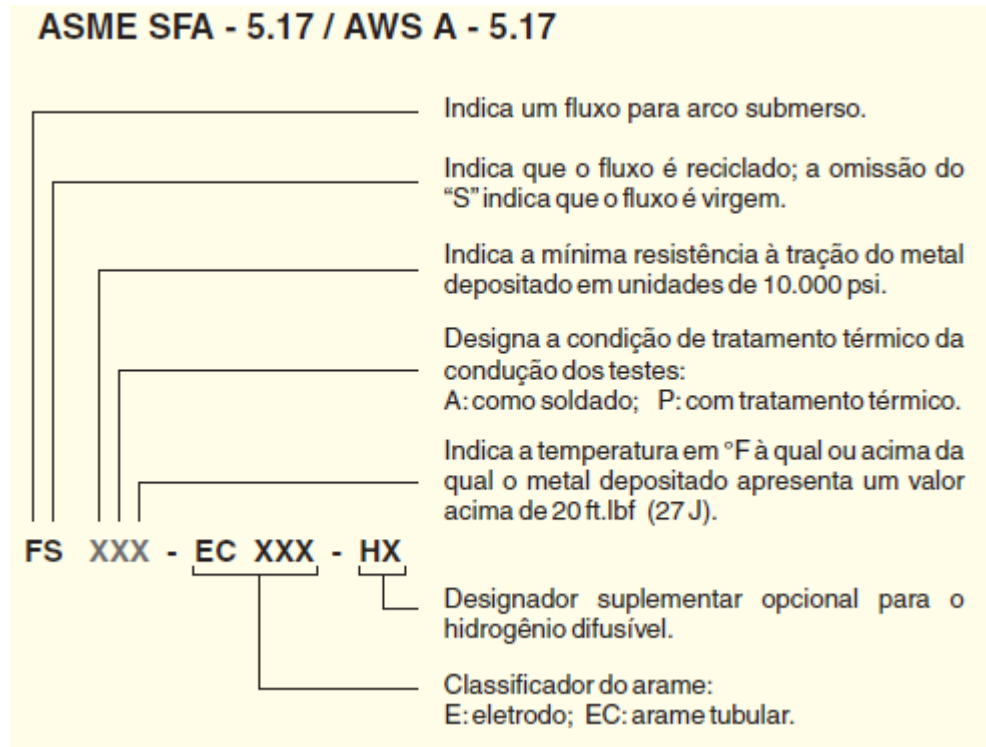
Os eletrodos podem ser arames sólidos, tubulares ou fitas e são fornecidos na forma de carretéis ou bobinas, em diferentes dimensões e quantidades. Os arames sólidos normalmente são cobreados, exceto aqueles para soldagem de materiais resistentes à corrosão ou para aplicações nucleares (MARQUES et al, 2009).

Segundo a apostila Arco Submerso ESAB, 2004 os arames para soldagem por arco submerso são escolhidos primeiramente por sua influência nas propriedades mecânicas e/ou na composição química requerida para o metal depositado. Carbono e manganês são os elementos de liga mais comuns, com adições de Si, Mo, Ni, Cr, Cu e outros elementos adicionados para aumentar a resistência mecânica e controlar as propriedades mecânicas a altas ou baixas temperaturas. Adições de manganês e silício também auxiliam na eliminação da porosidade gerada pelo gás CO.

De acordo com Marques, et al (2009) as especificações mais usuais de consumíveis para a soldagem a arco submerso são da American Welding Society – AWS. A classificação é feita

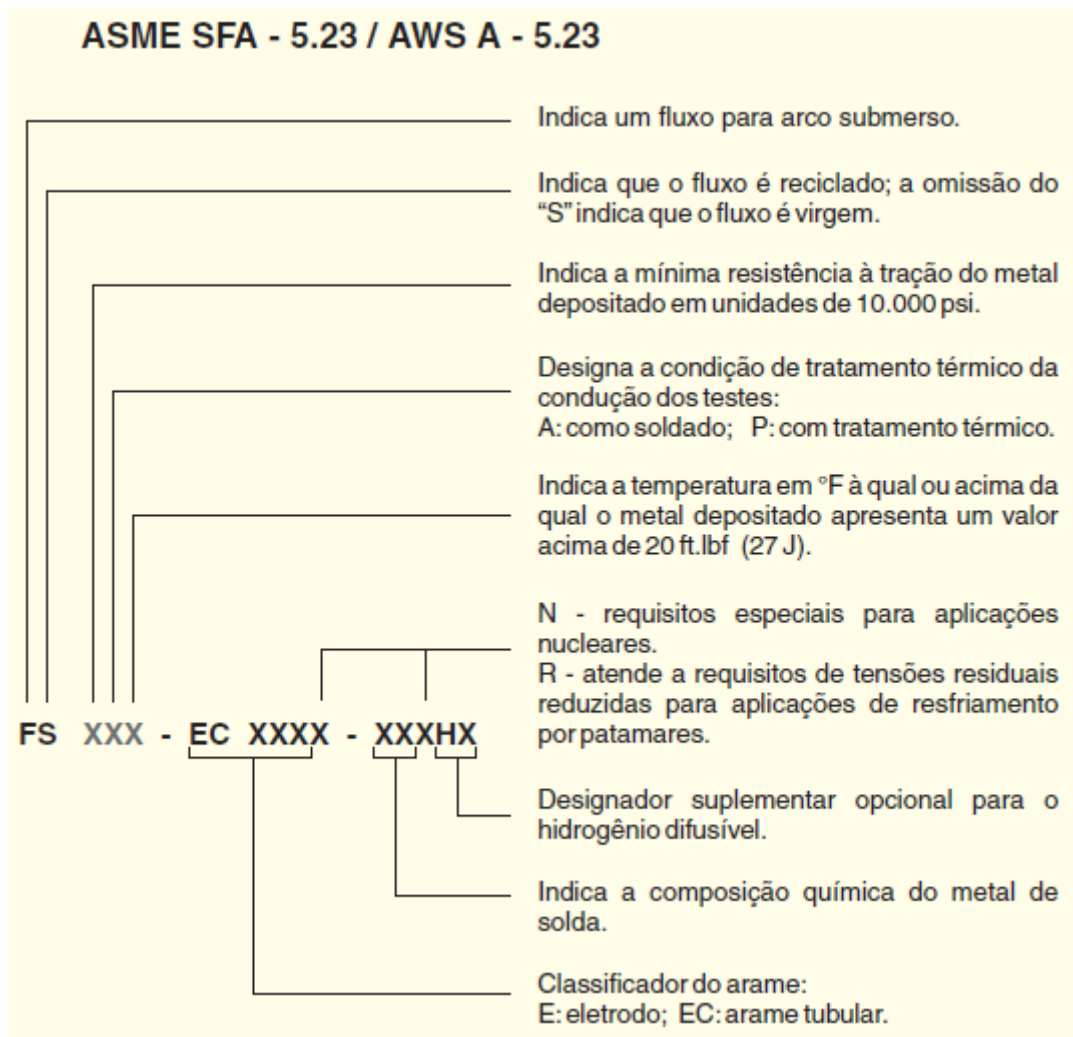
por duas normas a A5.17, FIG. 8, que trata de arames de aço carbono e fluxos para soldagem a arco submerso e a A5.23, FIG. 9, que especifica eletrodos de aço de baixa liga e fluxos para a soldagem SAW.

Figura 8: Classificação do sistema arame-fluxo, norma AWS A 5.17



Fonte: Catálogo de Fluxos, ESAB, 2004.

Figura 9: Classificação do sistema arame-fluxo, norma AWS A 5.23



Fonte: Catálogo de Fluxos, ESAB, 2004.

2.5. Aço 4140

O aço 4140 pode ser chamado de várias formas: ABNT 4140, AISI 4140, SAE 4140.

A ABNT classifica os aços segundo a NBR NM 172/2000. O aço ABNT 4140 é classificado como aço para construção mecânica, ligado e especial. É considerado especial devido às exigências de ensaio de impacto no estado temperado e revenido (AGUIAR, 2001).

Segundo AGUIAR, 2001 a NBR NM 87/2000 designa e fornece a composição química dos aços ao carbono e ligados para construção mecânica. De acordo com esta norma, o aço 4140 é ligado ao cromo e ao molibdênio e deve apresentar a composição química descrita na TAB. 2.

Tabela 2: Composição química do aço ABNT 4140

C	Si	Mn	P (máx.)	S (máx.)	Cr	Mo
0,38-0,43	0,15-0,30	0,75-1,00	0,035	0,035	0,80-1,10	0,15-0,25

Fonte: AGUIAR, 2001.

As propriedades mais importantes que podem ser melhoradas pela adição de pequenas quantidades de elementos de liga são a dureza, a resistência mecânica, a ductilidade e a resistência à corrosão (Metalurgia da Soldagem ESAB, 2004). Portanto, os elementos de liga presentes no aço ABNT 4140 são o cromo e o molibdênio.

2.5.1. Cromo

De acordo com a Apostila Metalurgia da Soldagem ESAB, 2004 o cromo, combinado com o carbono, é um poderoso elemento de liga que aumenta a dureza dos aços. Também, o cromo aumenta a resistência à corrosão e a resistência do aço a altas temperaturas. É o principal elemento de liga dos aços inoxidáveis. O cromo auxilia no aumento da dureza devido à formação de carbonetos estáveis, fazendo com que aumente a dureza do aço (AGUIAR, 2001).

2.5.2. Molibdênio

O molibdênio aumenta fortemente a profundidade de têmpera característica do aço. É muito usado em combinação com o cromo para aumentar a resistência do aço a altas temperaturas. Esse grupo de aços é referido como aços ao cromo-molibdênio (Metalurgia da Soldagem ESAB, 2004).

O AISI 4140 é um aço cromo-molibdênio de média temperabilidade, que proporciona elevada resistência em seções médias. É aplicado na indústria mecânica e automotiva em componentes que exigem elevada dureza, resistência e tenacidade, tais como virabrequins, bielas, braços, juntas, engrenagens, eixos e componentes para equipamentos de produção e perfuração de petróleo (BRANDÃO, 2010).

2.6. Parâmetros de soldagem

2.6.1. Arco Elétrico

Na soldagem por fusão de materiais metálicos, a fonte de calor mais utilizada é o arco elétrico. Ele apresenta várias características importantes para o processo, como facilidade de

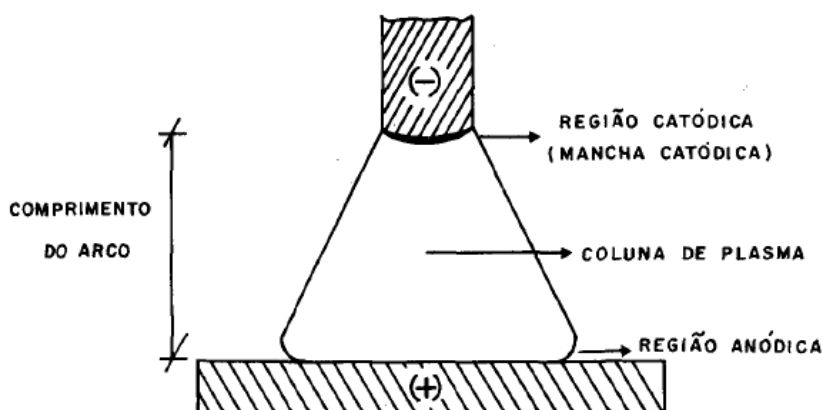
controle, baixo custo do equipamento, a diminuição de riscos para o operador e produz uma quantidade de energia necessária para a fusão localizada do metal base (MARQUES et al, 2009).

De acordo com Wainer et al (2011), arco elétrico é “a descarga elétrica mantida através de um gás ionizado, iniciada por uma quantidade de elétrons emitidos do eletrodo negativo (catodo) aquecido e mantido pela ionização térmica do gás aquecido”. Temperaturas entre 5.000 e 30.000K são alcançadas pelo arco elétrico, devido a isso, a matéria se apresenta em seu quarto estado, denominado plasma, composto por um gás eletricamente neutro e altamente ionizado (MACHADO, 1996).

O calor gerado no processo deve-se ao movimento das cargas elétricas no arco de um eletrodo permanente, a existência de choques entre as cargas gera o calor. O verdadeiro gerador de calor são os elétrons, que possuem uma alta velocidade (WAINER et al, 2011).

O arco elétrico tem a forma de um cone e é dividido em três regiões: região catódica, coluna de plasma e região anódica. A FIG. 10 exemplifica o formato do arco elétrico.

Figura 10: Desenho esquemático do arco elétrico.



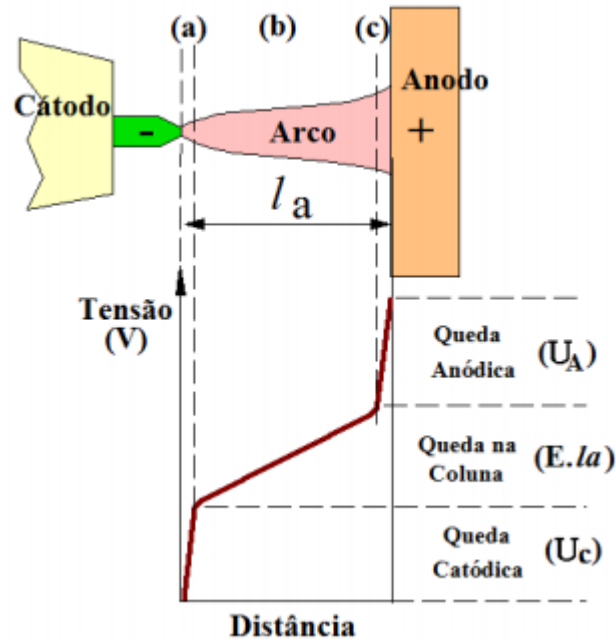
Fonte: WAINER et al, 2011.

A coluna de plasma é composta por íons positivos, elétrons livres, átomos neutros e íons negativos, esses são emitidos e acelerados até o anodo através de campos elétricos. Mesmo o arco elétrico possuindo todos esses elementos, ele é eletricamente nulo (WAINER et al, 2011).

Como mostrado acima o arco elétrico possui três regiões distintas, e apresenta uma diferença

de potencial entre as extremidades e entre a corrente elétrica que circula no arco. Porém a queda de potencial não é uniforme (MARQUES et al, 2009). A FIG. 11 explicita as quedas de tensão do arco elétrico nas suas respectivas regiões.

Figura 11: Desenho esquemático mostrando a queda de potencial ao longo do arco elétrico



Fonte: Disponível em: < <http://demet.eng.ufmg.br/wp-content/uploads/2012/10/fundamentosfisicos1.pdf> >

Existem elevados gradientes elétricos e térmicos nas regiões, catódica e anódica, já na coluna de plasma (parte visível do arco) apresenta baixa variação elétrica e térmica, essa diferença de potencial varia linearmente com o comprimento do arco. Existem vários fatores que alteram a diferença de potencial entre as extremidades do arco são elas: o tamanho e material dos eletrodos, composição e pressão do gás no plasma e a corrente que atravessa o arco (MARQUES et al, 2009).

2.6.2. Tensão

De acordo com Wainer et al (2011) a tensão no processo de soldagem influencia na forma da seção transversal do cordão e a aparência externa da solda. Para entender a atuação da tensão no processo devem-se manter todas as outras condições constante, com isso o aumento da tensão proporciona:

- Um cordão mais plano e largo;
- Aumento do consumo de fluxo;

- Aumento do teor de liga proveniente do fluxo, o que pode constituir vantagem para elevar o teor da liga do depósito quando, em revestimento duro, usam-se fluxos ligados; ele pode também reduzir a ductilidade e aumentar a sensibilidade à trinca, especialmente em soldas de passes múltiplos.

2.6.3. *Corrente*

A variação da corrente elétrica determina a profundidade de penetração da solda no metal base, a taxa de deposição e a quantidade de metal de base fundido. A corrente utilizada no processo deve estar em concordância com o diâmetro do eletrodo que será utilizado, pois uma corrente muito baixa ocasiona um arco instável e uma corrente muito elevada acarreta mordeduras e um cordão estreito e alto (WAINER et al, 2011)

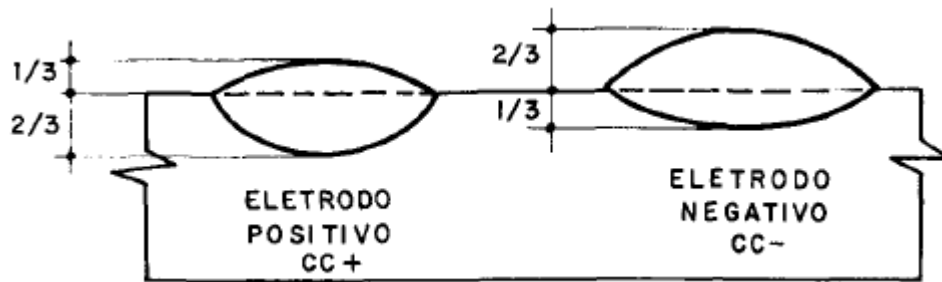
Wainer et al (2011), acrescenta que o tipo de corrente altera a morfologia do cordão. O uso de corrente contínua de polaridade reversa CCPR(+) é recomendada para grande parte dos casos na soldagem de arco submerso, pois oferece melhor resistência à porosidade e melhor formato do cordão de solda. Já o uso de corrente contínua de polaridade direta CCPD(-) promove uma taxa de deposição cerca de 30% superior à obtida com CCPR(+), porém produz menor penetração. Ela pode ser usada nos seguintes casos:

- Onde a baixa penetração é condição necessária para reduzir a diluição em aços de difícil soldabilidade, evitando trincas;
- Em aplicações como revestimento, onde uma taxa de deposição mais elevada é necessária;

Para se obter um cordão similar quando se altera a polaridade, deve-se aumentar a tensão cerca de 4V.

E por fim, Wainer et al (2011), fala que “o uso de corrente alternada, proporciona penetração e taxa de deposição intermediária entre CCPR(+) e CCPD(-), sendo que ela deve ser utilizada para eletrodos auxiliares na soldagem, em algumas aplicações onde ocorre sopro magnético ou apagamento do arco com CC e para velocidade de soldagem muito baixa” o que é mostrado na FIG. 12.

Figura 12: Morfologia do cordão devido a polaridade



Fonte: WAINER et al 2011, p. 143.

2.6.4. Velocidade de Soldagem

A velocidade de soldagem e a corrente são usadas para se obter uma penetração desejada. Velocidades de soldagem elevadas ocasionam o apagamento do arco e o surgimento de porosidades e trincas. Já velocidades baixas tendem a reduzir a porosidade, pois o material gasoso terá tempo de flutuar e escapar da solda ainda no estado líquido (WAINER et al, 2011).

2.7. Defeitos da soldagem

Solidificação, fusão e transformações no estado sólido são alguns fenômenos metalúrgicos que acontecem durante a soldagem. Além disso, as tensões residuais, porosidade, incluso de escória, trincas e deformações ocasionadas pelo calor são alguns dos problemas que ocorrem durante o processo. Para que esses problemas sejam evitados, aplicação alguns métodos metalúrgicos para corrigir esses defeitos.

2.7.1. Tensões Residuais

De acordo com Marques et al (2011) “Essas tensões podem aparecer em materiais submetidos a diferentes processamentos térmicos ou mecânicos (fundição, soldagem, laminação, forjamento, usinagem, dobramento, têmpera etc.)”. No processo de soldagem o aquecimento e resfriamento de uma peça soldada são muito importantes. As tensões residuais surgem a partir daí. Uma variação heterogênea de temperatura no material pode ocasionar dilatações e contrações não homogêneas, possibilitando o surgimento das tensões (COFIÑO, 2010).

Portanto, quando ocorre uma deformação plástica não uniforme causada por variações térmicas desiguais no material, são desenvolvidas tensões residuais térmicas.

A partir do surgimento de uma tensão residual, outros efeitos indesejáveis na região da zona de solda podem aparecer. Quando se trata, por exemplo, do campo das construções soldadas, problemas ligados a propagação de trincas, corrosão sob tensão e fadiga são problemas preocupantes (WAINER et al, 2011).

2.7.2. Porosidade

A porosidade em uma solda pode prejudicar as propriedades mecânicas diminuindo a seção efetiva da junta (MARQUES et al, 2009). A ocorrência dela deve-se ao fato, da presença de gás, que é expulso da solução à medida que a solda solidifica, um exemplo, é quando se solda alumínio e o hidrogênio originado da umidade desse processo é absorvido, formando o poro, porém depois ele é liberado (Apostila Metalurgia da Soldagem ESAB, 2004).

Outro caso de aparecimento de porosidade é quando a poça de fusão do aço não for desoxidada adequadamente, ocorrendo reações químicas do óxido de ferro com o carbono presente liberando monóxido de carbono e favorecendo a criação do poro (Apostila Metalurgia da Soldagem ESAB, 2004).

Para evitar a presença de poros aconselha-se um uso adequado dos parâmetros de soldagem, manter os materiais sempre limpos e secos, evitando a umidade (MARQUES et al, 2009).

2.7.3. Inclusões

Processos que tem a utilização de fluxo para soldar, como por exemplo, a Soldagem por Arco Submerso, algumas partículas do fluxo podem ficar incrustadas e podem formar inclusões no cordão de solda. Uma técnica de soldagem ruim e limpeza mal feita entre os passes acarreta o aparecimento dessas inclusões (Apostila Metalurgia da Soldagem ESAB, 2004).

Também, muitas reações ocorrem na poça de fusão, gerando produtos insolúveis no metal líquido tendendo a se separar deste e formar escória. As inclusões mais alongadas que são formadas entre os passes de solda facilitam a formação de trincas, isso ocorre porque a inclusão faz o papel de um concentrador de tensões, sendo assim tem a capacidade de nuclear uma trinca (MARQUES et al, 2009).

2.7.4. Mordeduras

De acordo com Marques et al (2009) as mordeduras tem o com a fusão do metal de base na margem do cordão de solda, sem ocorrer o enchimento desta área, resultando na formação de uma reentrância nesta região. Tem como principais consequências a redução da área útil, é um concentrador de tensões e a resistência a fadiga é reduzida.

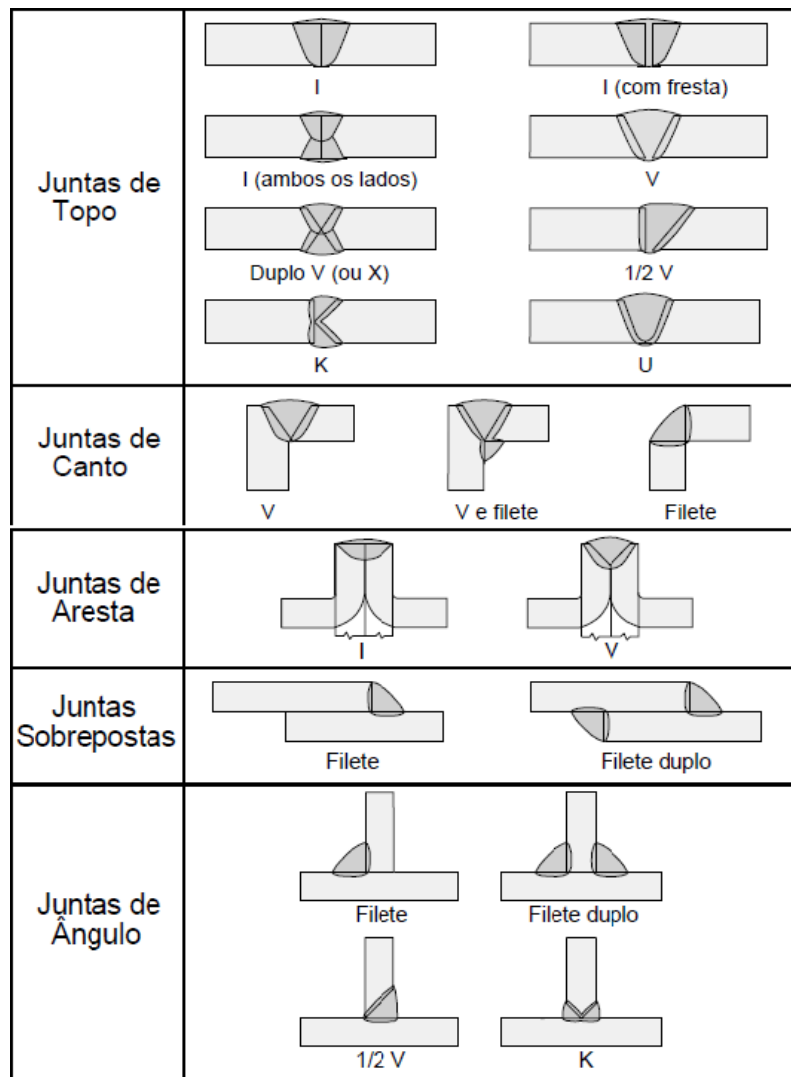
As causas práticas para o surgimento das mordeduras é a manipulação incorreta do eletrodo, comprimento excessivo do arco, corrente ou velocidade de soldagem muito elevadas (MARQUES et al, 2009).

2.8. Geometria do cordão

Existem várias situações para se realizar uma solda, mas junta e chanfro são termos básicos da soldagem que devem ser entendidos. Junta é o encontro das peças onde irá ocorrer a soldagem. Porém, dependendo do projeto ou situação, as peças necessitam ser preparadas, realizando cortes ou uma conformação especial. Chanfro é o nome dado a essas aberturas ou sulcos feitos na superfície das peças, que são espaços onde irá conter a solda (MARQUES et al, 2009). A FIG. 13, a seguir, exemplifica a aplicação dos chanfros em diferentes tipos de junta.

Uma junta soldada apresenta diferentes regiões, de acordo com a metalurgia da soldagem, qualquer região na qual em decorrência dos efeitos da soldagem tenham ocorrido consideráveis alterações em suas condições iniciais, é constituinte da junta soldada. E por convenção a junta é chamada de cordão de solda (FILHO, 2008).

Figura 13: Diferentes tipos de junta e chanfros



Fonte: Disponível em: <www.inspetordesoldagem.com.br>

2.8.1. Morfologia do cordão de solda

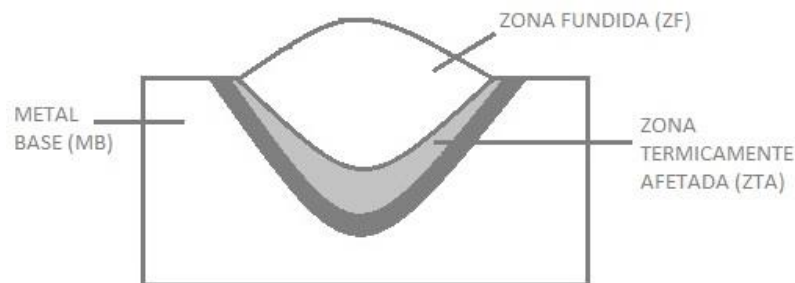
Como já foi falado anteriormente, o cordão de solda é composto pelo metal base (MB), zona fundida (ZF) e a zona termicamente afetada (ZTA). O metal base é o material onde irá receber a solda, e é a única região onde não sofre nenhuma alteração em suas propriedades metalúrgicas, físicas ou químicas, é possível dizer que ele não sofreu influência do processo de soldagem (FILHO, 2008).

O processo de soldagem por fusão requer uma temperatura muito elevada para que ocorra a fusão dos materiais envolvidos, e a zona fundida é onde terá esse maior aporte de temperatura. Parte do metal base junto com o metal de adição passam para a forma líquida formando a poça de fusão. A análise da ZF é de extrema importância, pois a forma com que ocorre a

solidificação dessa poça fundida varia o comportamento mecânico da solda, e isso pode ser observado na morfologia dos grãos metálicos resultantes (FILHO, 2008).

A ZTA é a zona de transição entre o metal base e a zona fundida e como o próprio nome diz, é a zona que é afetada termicamente, segundo a apostila de Metalurgia da Soldagem da ESAB, 2004, “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”. Essa tempera pode ocasionar a formação martensita, que é um constituinte metálico duro e frágil e dependendo da solitação da junta soldada é uma desvantagem. A FIG. 14 apresenta um corte transversal de uma junta soldada.

Figura 14: Corte transversal de uma junta soldada.

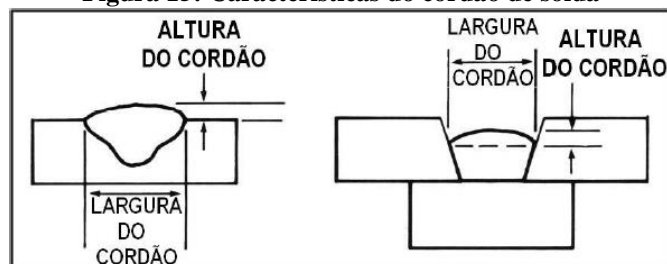


Fonte: AUTOR

2.8.2. *Largura e altura do cordão de solda*

Duas características do cordão de solda são sua altura e largura, conforme é mostrado na FIG. 15. Essas características são importantes para garantir que a junta de solda seja adequadamente preenchida, com um mínimo de defeitos, particularmente em soldas multipasses. Nesse caso, se a altura do cordão de solda for muito grande, torna-se muito difícil depositar os passes de solda subsequentes com boa fusão. Quanto mais protuberante e estreito for o cordão de solda, maior a probabilidade de ocorrer falta de fusão. As características do cordão de solda podem ser alteradas em seu tamanho e/ou em sua forma (FORTES, 2005).

Figura 15: Características do cordão de solda



Fonte: FORTES, 2005.

Para alterar o tamanho do cordão de solda, deve ser mudada a quantidade de metal de solda depositado (kg) por unidade de comprimento linear da solda (m). A corrente e a velocidade de soldagem são os parâmetros mais influentes no controle do tamanho do cordão de solda. Por exemplo, quando a corrente de soldagem é diminuída, o cordão de solda torna-se menor e vice-versa.

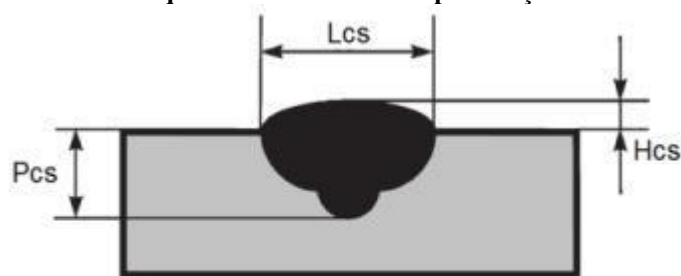
2.8.3. Penetração do cordão de solda

Quando ocorre o processo de soldagem por fusão e uma peça está sendo soldada, o metal de adição tem certa penetração na peça, FIG. 16, constituindo um dos elementos do cordão de solda. Porém podem ser encontrados alguns defeitos nessa penetração:

- Quando o cordão de solda não penetrar completamente na espessura do metal de base;
- Quando dois cordões de solda opostos não se interpenetrarem;
- Quando o cordão de solda não penetra na garganta de uma junta em ângulo;

A corrente de soldagem é o parâmetro que tem o maior efeito na penetração. A penetração incompleta é normalmente causada pela aplicação de uma corrente de soldagem muito baixa e pode ser evitada simplesmente aumentando essa corrente de soldagem. Outras causas podem ser o emprego de uma velocidade de soldagem muito baixa e um ângulo incorreto da tocha. Ambas permitirão que a poça de fusão passe à frente do arco, atuando como um amortecimento à penetração. O arco deve ser mantido na margem anterior da poça de fusão (FORTES, 2005).

Figura 16: Desenho esquemático mostrando a penetração no cordão de solda



L_{cs} = Largura do cordão

H_{cs} = Altura do cordão

P_{cs} = Penetração do cordão

Fonte: HAAS, 2010.

2.9. Metalografia

Para iniciar o assunto de metalografia é necessário saber sobre a estrutura cristalina das ligas de ferro. Colpaert (2008) inicia falando que a maior parte dos metais apresenta à pressão ambiente (1 atm) uma única estrutura cristalina, estável desde a temperatura ambiente até o ponto de fusão. As estruturas de ocorrência mais comum são as estruturas compactas CFC (cúbica de face centrada) e HCP (hexagonal compacta) e a estrutura não-compacta CCC (cúbica de corpo centrado).

O ferro é excepcional, pois nesse caso ele apresenta polimorfismo, isto é, apresenta duas estruturas cristalinas à pressão ambiente, dependendo da temperatura. A baixas temperaturas (até 910°C) o ferro tem estrutura CCC. Acima dessa temperatura, a estrutura CFC se torna mais estável. Acima de 1394°C a estrutura CCC volta a ser estável até o ponto de fusão do ferro (1535°C) (COLPAERT, 2008).

2.9.1. Macrografia

Colpaert (2008) fala que “a macrografia consiste no exame do aspecto de uma peça ou amostra metálica, segundo uma seção plana devidamente polida e, em geral, atacada por um reativo apropriado. O aspecto, assim obtido, chama-se macroestrutura. O exame é feito a vista desarmada ou com a ajuda de uma lupa”.

O ataque com reativo usualmente é realizado de dois modos: Ataque por imersão, quando a superfície é mergulhada em uma cuba contendo certo volume de reagente. E o ataque por aplicação, é quando uma camada de reativo é aplicada sobre a seção em estudo, com auxílio de um pincel ou chumaço de algodão. Os reagentes mais utilizados para essa caracterização são: o Nital (1 a 5%) e o reativo de Iodo (COLPAERT, 2008).

Por fim, Colpaert (2008) diz o que macrograficamente se pode constatar, em consequência da ação do reativo, resulta do contraste que se estabelece entre as áreas de composição química diferentes ou entre as áreas de estrutura metalográfica diferente (seja por diferenças das fases presentes ou da fração volumétrica das fases ou até por diferenças de tamanho e distribuição das fases). O contraste decorre do fato de certas regiões escurecerem muito mais do que outras. A FIG. 17, ilustra uma fotomacrografia de uma peça soldada.

Figura 17: Fotomacrografia de uma junta soldada



Fonte: Disponível em:

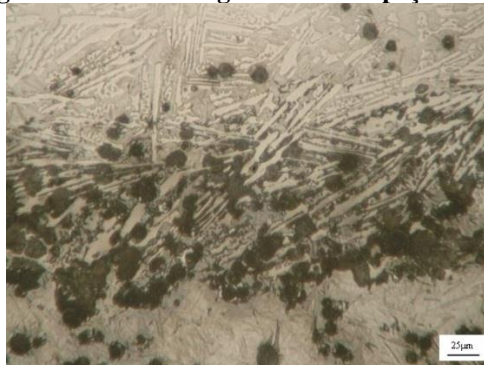
<http://www.bytest.it/inglese/attivita/attivita_lab_metallografico.asp>

2.9.2. Micrografia

Dentre as diversas técnicas de observação da microestrutura dos aços e ferros fundidos, a mais comum é a microscopia ótica. Neste caso, emprega-se luz visível que incide sobre a amostra e é refletida até o observador. Embora existam microscópicos óticos capazes de fornecer aumentos superiores a 1400X, tais aumentos são chamados aumentos “vazios” por não fornecerem informação adicional àquela obtida com o aumento máximo de cerca de 1400X (COLPAERT, 2008).

Logo após a amostra passar por um processo de lixamento e polimento, é necessário um ataque químico da superfície para uma melhor visualização no microscópio. O ataque é realizado da mesma forma que realizado na macrografia, com os mesmos reagentes e dos mesmos modos. Passado o procedimento de preparação da superfície da amostra, ela é levada ao microscópio ótico e é realizada a análise das regiões desejadas e é obtida a fotomicrografia em diversos aumentos. A FIG. 18 ilustra uma fotomicrografia de uma peça soldada, com um aumento de 400X.

Figura 18: Fotomicrografia de uma peça soldada



Fonte: Autor

2.9.3. Ferrita

Ferro puro ou aços que contenham teores de carbono abaixo do limite de solubilidade da cementita na fase CCC, chamada “ferrita” a temperatura ambiente (COLPAERT, 2008). A ferrita é um ferro no estado alotrópico alfa, contendo em solução traços de carbono, apresentando também estrutura de grãos poligonais irregulares. Possui baixa dureza e baixa resistência à tração, porém, excelente resistência ao choque e elevado alongamento (CHIAVERINI, 2008).

A FIG. 19 mostra uma amostra de Ferro Armco, ferro de baixíssimo teor de carbono em que a microestrutura é composta por grãos de ferrita (COLPAERT, 2008).

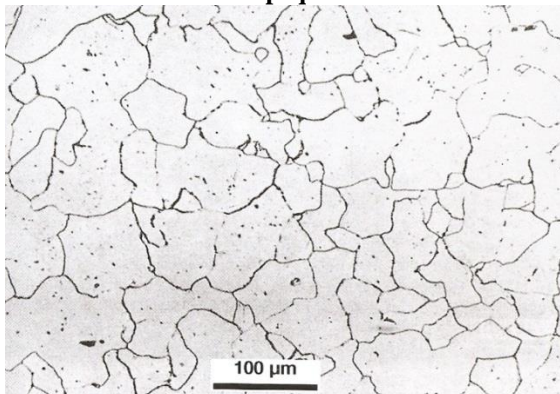
2.9.4. Austenita

Colpaert (2008) fala que o aquecimento da ferrita em aços Fe-C leva à formação da fase FCC, chamada “austenita”. A austenita, em ferro puro e ligas Fe-C, só é observável diretamente em microscópicos que possam operar a temperatura elevada, onde esta fase é estável.

2.9.5. Cementita

Quando a solubilidade do carbono na ferrita é excedida, a cementita começa a aparecer na estrutura do aço. Aços para conformação, de baixo teor de carbono, normalmente apresentam a cementita distribuída ao longo do produto, como uma segunda fase dispersa (COLPAERT, 2008). A cementita é o carboneto de ferro Fe_3C contendo 6,67% de carbono; muito dura e quebradiça. É responsável pela elevada dureza e resistência dos aços de alto carbono, assim como pela sua menor ductilidade. Possui estrutura cristalina ortorrômbica (CHIAVERINI, 2008).

Figura 19: Grãos de ferrita e pequenas inclusões não-metálicas



Fonte: COLPAERT, 2008.

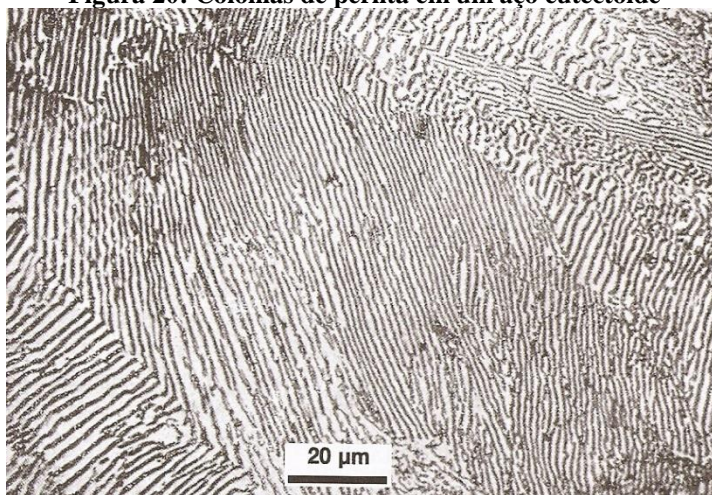
2.9.6. *Perlita*

Colpaert (2008) explica que o diagrama Fe-C apresenta um equilíbrio eutectóide entre ferrita, cementita e austenita, a 723°C. Quando aços contendo teores de carbono mais significativos do que os discutidos acima se transformam de austenita para o campo abaixo da temperatura eutectóide, com isso as fases esperadas são ferrita e cementita.

Chiaverini (2008) complementa que a perlita é uma mistura mecânica de 88,5% de ferrita e 11,5% de cementita, na forma de lâminas finas, dispostas alternadamente. As propriedades mecânicas da perlita são, portanto, intermediárias entre as da ferrita e da cementita, dependendo do tamanho de partícula de cementita.

A transformação da austenita em perlita contendo ferrita e cementita é típica de muitas reações no interior de sólidos, ou seja, começa nos contornos de grãos e prossegue em direção ao seu centro, o que é de se esperar, pois os átomos nos contornos dos grãos apresentam maiores energias que os átomos dentro dos grãos (CHIAVERINI, 2008). A FIG 20 mostra um aço eutectóide resfriado lentamente e atacado com nital, onde é possível ver as colônias de perlita.

Figura 20: Colônias de perlita em um aço eutectóide



Fonte: COLPAERT, 2008.

2.9.7. *Martensita*

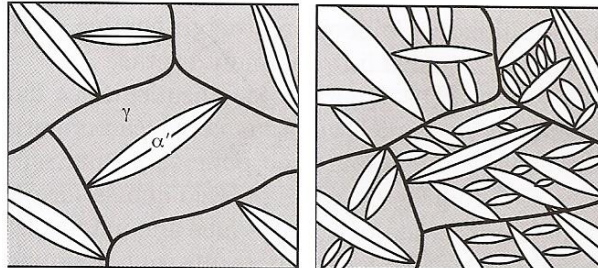
A martensita se forma em velocidades extremamente rápidas e em formas alongadas, sejam em forma de “ripas” ou “placas”. De maneira geral, em um corte bidimensional, aparece em forma alongada, “acicular”. A martensita é um constituinte duro e frágil, o que dependendo da aplicação pode ser um fator prejudicial ao material utilizado. A FIG 21 ilustra

esquemáticamente a martensita. Placas nucleadas crescem rapidamente, mais no sentido de alongar-se do que no sentido de aumentar sua espessura (COLPAERT, 2008).

A martensita possui estrutura cristalina tetragonal de corpo centrado (TCC). Dentre as várias maneiras de visualizar as transformações “displacivas” que podem conduzir a estrutura da austenita (CFC) a uma estrutura TCC. O processo de formação da martensita difere das transformações por difusão. A composição química da martensita formada é a da austenita (matriz) que a origina; A transformação é “atérmica”, isto é, a quantidade de austenita transformada depende da temperatura atingida e não depende do tempo em que o material é mantido a temperatura (COLPAERT, 2008).

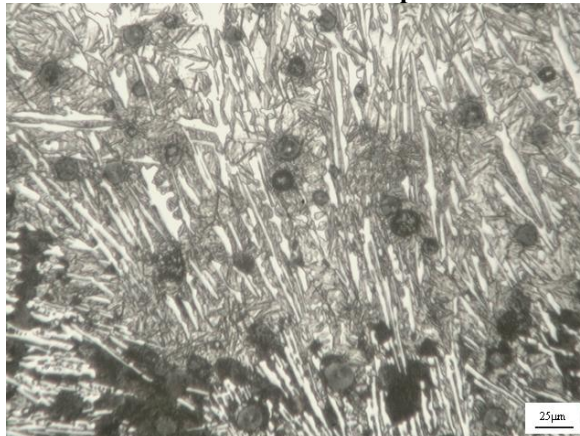
Colpaert (2008) termina dizendo que “à medida que o aço tem mais carbono em sua composição, maior será a distorção associada à formação da martensita. Para que seja possível transformar a austenita em martensita é preciso haver, assim, cada vez mais energia disponível como força motriz para a transformação. Assim, é razoável imaginar que, à medida que o teor de carbono da austenita aumenta, esta fase precisará ser mais super-resfriada para viabilizar a formação da fase martensita”. A FIG 22 mostra a morfologia da martensita formada em um processo de soldagem em ferro fundido nodular.

Figura 21: Desenho esquemático da morfologia da martensita



Fonte: COUPAERT, 2008.

Figura 22: Martensita formada em um processo de soldagem



Fonte: Autor.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Descrição Geral do Trabalho Realizado

O trabalho experimental envolve a deposição de cordões de solda sobre amostras de aço SAE 4140 utilizando o processo SAW (Submerged Arc Welding – Soldagem a arco submerso).

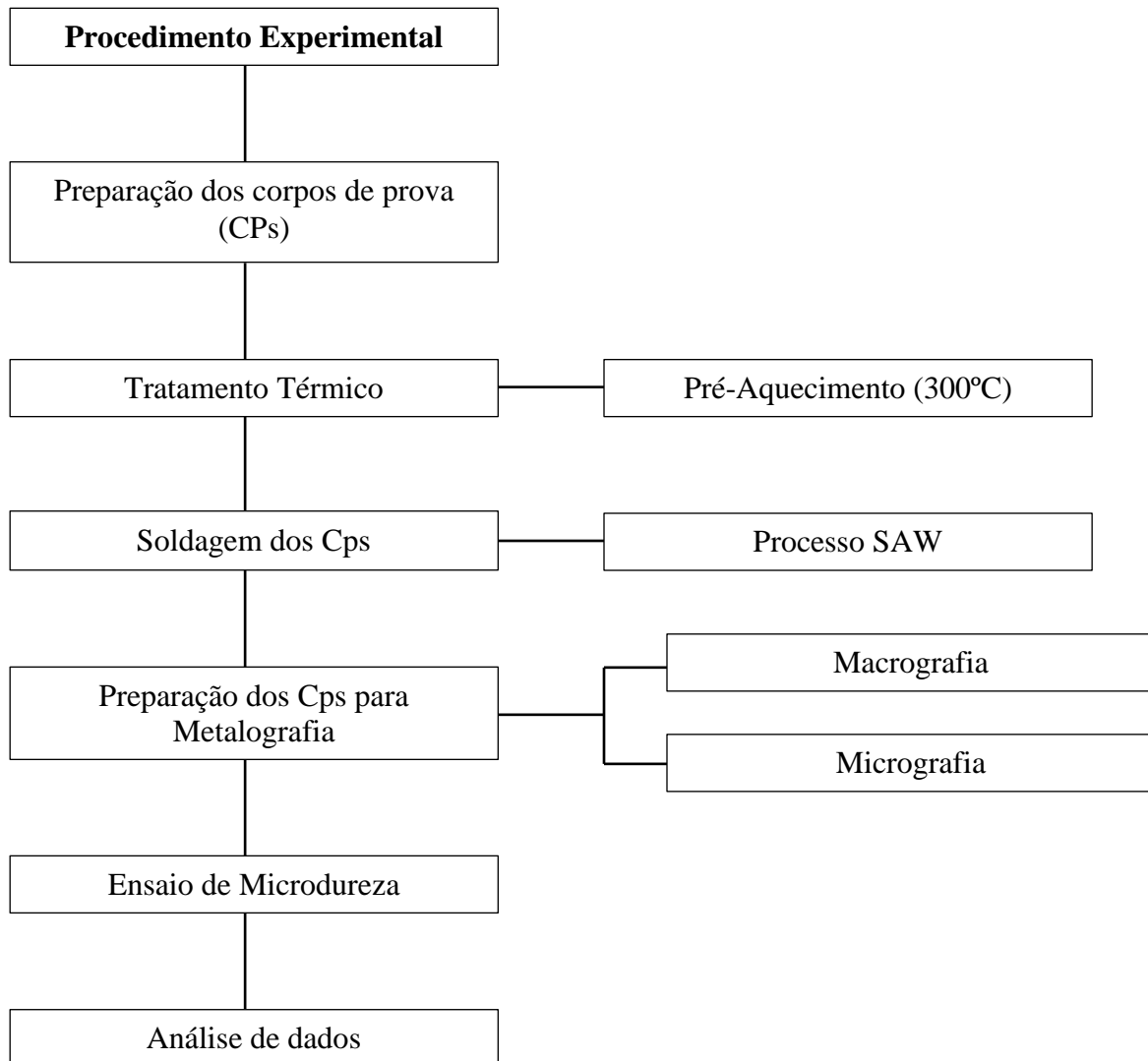
Foram utilizados 10 corpos de prova (CPs), sendo cinco CPs soldados sem pré-aquecimento e os outros cinco CPs com pré-aquecimento a 300°C e resfriamento lento na areia com duração de 24 horas.

Os consumíveis recomendados para a soldagem do aço AISI 4140 são consumíveis com composição química similar, tipo o E8018 B2 (AGUIAR, 2001). Portanto, utilizou-se o arame tubular OK TUBRODUR ECF6 da ESAB, que deposita um aço ligado ao Mn, Cr, Ni e Mo e um fluxo OK Flux 10.61B.

Os efeitos das condições de soldagem definidas foram verificados por meio da análise metalográfica, possibilitando a observação da macro e microestrutura, essa última por microscopia óptica. Logo após, para a análise de propriedade mecânica foram realizados os ensaios de Microdureza ao longo da seção transversal dos corpos de prova soldados.

O fluxograma do procedimento experimental do trabalho é apresentado na FIG. 23, onde podem ser observadas as etapas.

Figura 23: Fluxograma da parte experimental



Fonte: Autor

3.2. Material

O metal de base utilizado nesse trabalho foi o SAE 4140, sendo que os corpos de prova foram preparados nas dimensões aproximadas de 12 x 50 x 100mm, essa variação se deu pelo fato do material ter sido retirado de um lingote. O material foi fornecido com certificado de qualidade, afirmando que o material foi conformado por processo de laminação e apresenta a composição química do aço, fornecida na TAB. 3.

Tabela 3: Composição química do aço SAE 4140

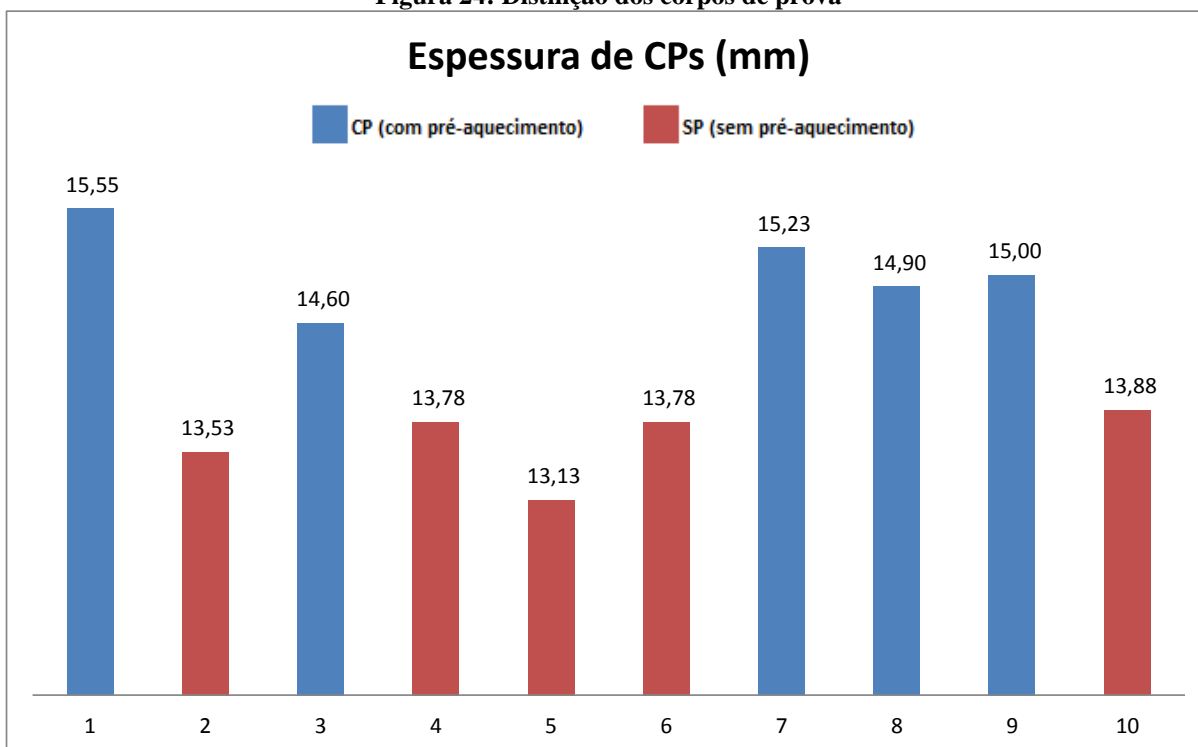
C	Co	Cr	Cu	Mn	Mo	N	Ni	P	S	Si	V
0,40000	0,01000	0,91000	0,03000	0,90000	0,19000	0,00650	0,16000	0,00600	0,00100	0,26000	0,01000

Fonte: Açoliver Comércio de Ferro e Aço LTDA

3.3. Corpo de Prova

Os corpos de prova foram separados por proximidade de espessura. Foram realizadas três medidas de espessura ao longo da peça e calculou-se a média, logo após foram separados cinco CPs com espessuras próximas a 13,00 mm e cinco CPs com espessuras acima de 14,00 mm.

Cinco dessas peças foram utilizadas para a soldagem sem pré-aquecimento (SP) e as outras cinco foram utilizadas para a soldagem com pré-aquecimento (CP), como mostrado na FIG. 24.

Figura 24: Distinção dos corpos de prova

Fonte: Autor

3.4. Procedimento de Soldagem

Para a determinação dos parâmetros que foram utilizados na soldagem, realizaram-se vários testes, soldando peças com a mesma espessura dos corpos de prova utilizados e observando,

visualmente, o aspecto do cordão até encontrar o padrão ideal. Junto a esses testes, a experiência do operador foi o diferencial para determinação desses parâmetros. Durante o procedimento de soldagem foram fixados alguns parâmetros para análise de dados. Os parâmetros fixados foram à velocidade de soldagem, a tensão do arco, a corrente e o distância entre o bico de contato e a peça (DBCP). Os parâmetros fixados estão apresentados na TAB. 4.

Tabela 4: Parâmetros de Soldagem

Velocidade de Soldagem (cm/min)	Tensão do arco (V)	Corrente de soldagem (A)	DBCP (mm)
15	26	300	33

Fonte: Autor

O processo de soldagem foi realizado em duas etapas, a primeira com a soldagem dos cinco corpos de prova sem pré-aquecimento e a segunda etapa com a soldagem com pré-aquecimento e resfriamento em areia dos outros cinco CPs.

Para realização o tratamento térmico de pré-aquecimento a 300°C nos corpos de prova foi utilizado um forno tipo “mufla”. Este forno ficou posicionado ao lado do equipamento de soldagem para que não houvesse perda de calor durante o transporte do CP do forno até o gabarito. É importante observar que a temperatura de pré-aquecimento foi controlada através do infravermelho. A FIG. 25 ilustra o forno utilizado.

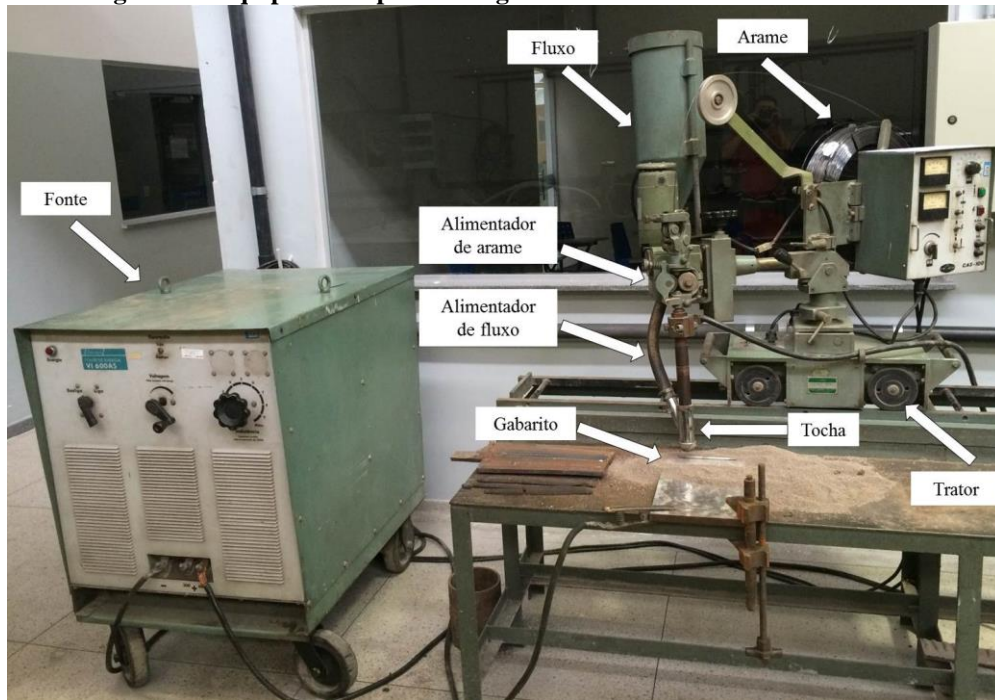
Figura 25: Forno utilizado para o pré-aquecimento



Fonte: Autor

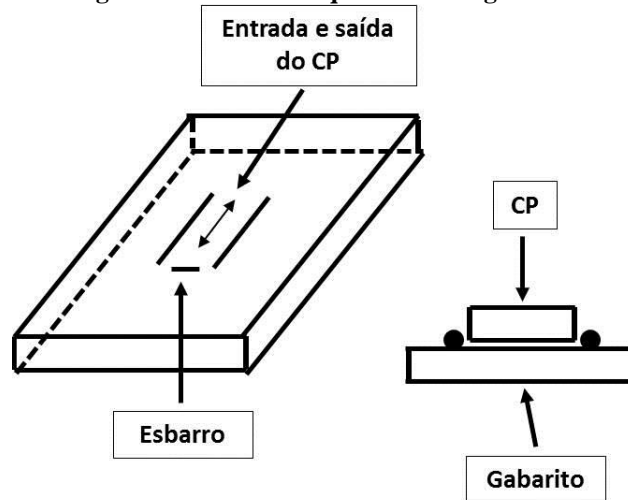
Para a realização da soldagem foi utilizado o equipamento UNIONMELT/800, da marca S.A White Martins (FIG. 26). Um gabarito foi confeccionado para garantir posicionamento dos corpos de prova e a repetitividade do processo, a FIG. 27 apresenta o desenho esquemático do gabarito e a FIG. 28 uma imagem do aparato.

Figura 26: Equipamento para soldagem a arco submerso do CEFET-MG



Fonte: Autor

Figura 27: Desenho esquemático do gabarito



Fonte: Autor

Figura 28: Gabarito utilizado durante a soldagem a arco submerso



Fonte: Autor

Após a soldagem, cada corpo de prova foi retirado e com uma escova de aço realizou-se a limpeza do gabarito para que pudesse dar início à soldagem do próximo CP. A FIG. 29 mostra o corpo de prova após a soldagem.

Figura 29: Corpo de prova soldado



Fonte: Autor

3.5. Caracterização Macro e Microestrutural do Material Soldado

Para a caracterização macro e microestrutural das chapas soldadas foi feito o corte utilizando a serra de fita FRANHO FM 1600. Uma amostra foi retirada de cada corpo de prova para estudo. O corte refrigerado foi realizado na seção transversal localizada na parte central de cada CP. Todos os corpos de prova foram cortados com largura de aproximadamente 20mm. A FIG. 30 apresenta o equipamento utilizado para o corte. A FIG. 31 apresenta alguns corpos de prova com as suas respectivas dimensões.

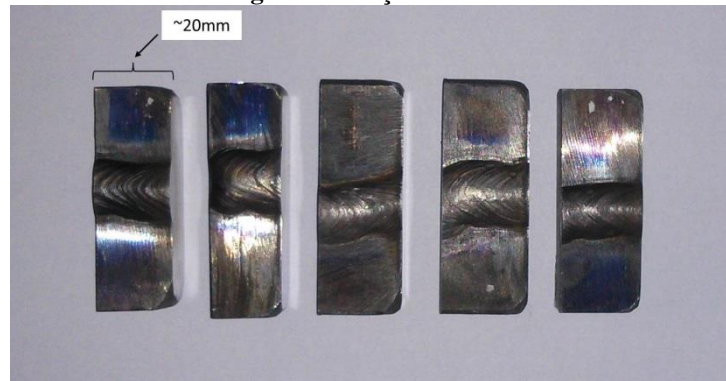
Figura 30: Serra de fita



Fonte: Disponível em:

<http://www.ferramentasnordeste.com.br/portal/index.php?option=com_content&view=article&id=138:serra-franho-fm-1600&catid=46:maquinas-em-novas>

Figura 31: Peças cortadas



Fonte: Autor

Após a obtenção das amostras, foi realizada a preparação para a análise macrográfica, seguindo a técnica metalográfica convencional, consistindo em lixamento em lixadeiras elétricas da marca *Struers* com lixas de granulometrias distintas (#120, #240, #320, #400 e #600) e ataque químico por aplicação com o reagente Nital 5%. Em seguida, as amostras foram digitalizadas em uma impressora/scanner multifuncional da marca *Hewlett Packard*, modelo HP Photosmart C4280 All-in-One, de forma a possibilitar a observação da zona fundida e da zona termicamente afetada.

A caracterização microestrutural foi realizada posteriormente para a obtenção das imagens macroestruturais, novamente envolvendo o procedimento metalográfico usual: embutimento a frio com acrílico autopolimerizante, lixamento em lixadeiras elétricas da marca *Struers* com lixas de granulometrias distintas (#240, #320, #400 e #600) e polimento em politrizes da marca *Arotec*, com pasta de diamante com granulometrias de 9 μ m, 3 μ m e 1 μ m. O reagente químico utilizado foi o Nital 3%.

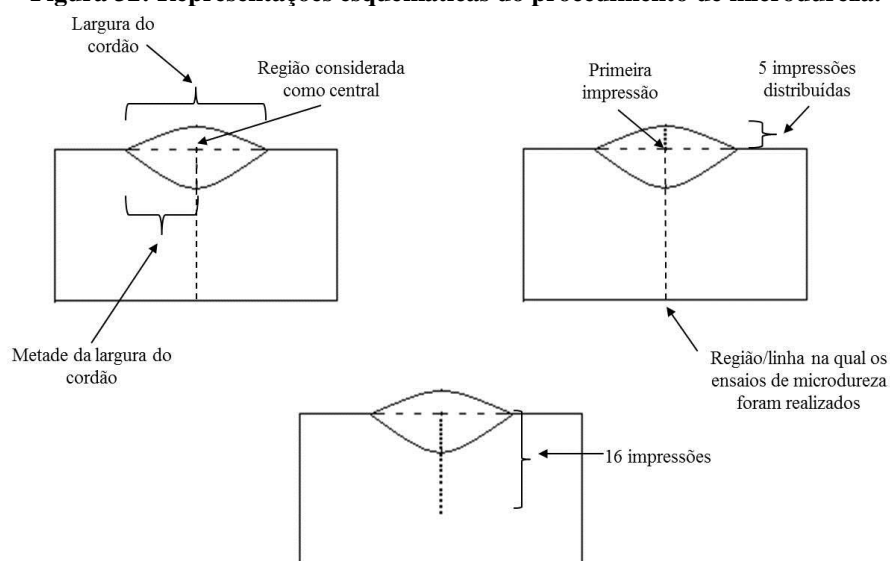
Após a preparação, a microestrutura das amostras foi analisada por microscopia óptica (MO), através do microscópio da marca *Fortel*, com sistema de digitalização de imagens da marca *Kontrol*.

3.6. Ensaio de Microdureza

A avaliação das propriedades do aço SAE 4140 soldado com o processo de soldagem a arco submerso foi realizada por meio de ensaios de microdureza Vickers, conduzidos em um microdurômetro da marca *Shimadzu* modelo HMV-2, com dois micrômetros digitais da marca *Mitutoyo* acoplados, empregando carga de 500g e tempo de aplicação de 15 segundos.

Os ensaios foram realizados no material após a análise micrográfica. Os testes foram realizados ao longo da seção transversal das amostras soldadas. Na FIG. 32 são mostradas representações esquemáticas do procedimento e localização das impressões. Inicialmente, após o posicionamento adequado da amostra, a largura do cordão de solda era determinada com o auxílio de um dos micrômetros do próprio equipamento e, a partir da mesma, a região central da linha considerada. Nessa região central era conduzido o primeiro dos ensaios de microdureza e os demais eram realizados acima e abaixo da mesma, perpendicularmente à largura do cordão, constituindo 21 impressões ao todo, sendo 5 impressões com distância de 0,4 mm acima da região central e 16 impressões com distância de 0,4 mm abaixo da região central.

Figura 32: Representações esquemáticas do procedimento de microdureza.



Fonte: Autor

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Macroestrutura dos Corpos de Prova Soldados

Nas FIG. 33 e 34 são apresentadas as macrografias das amostras do aço SAE 4140 soldadas a arco submerso com e sem pré-aquecimento. A partir da análise das imagens, pode-se observar a zona fundida e a zona termicamente afetada.

Figura 33: Macrografias dos corpos de prova soldados sem pré-aquecimento

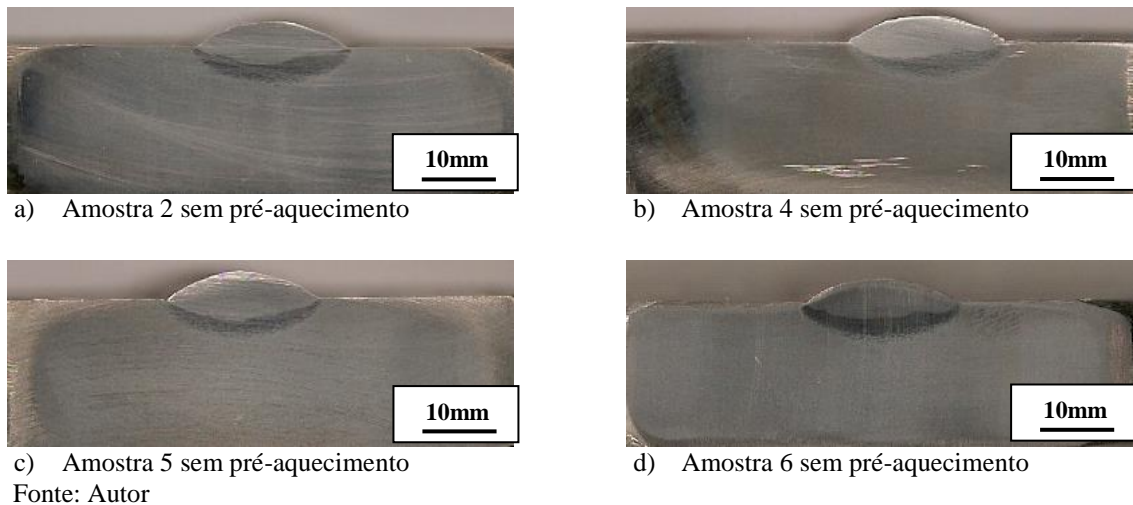
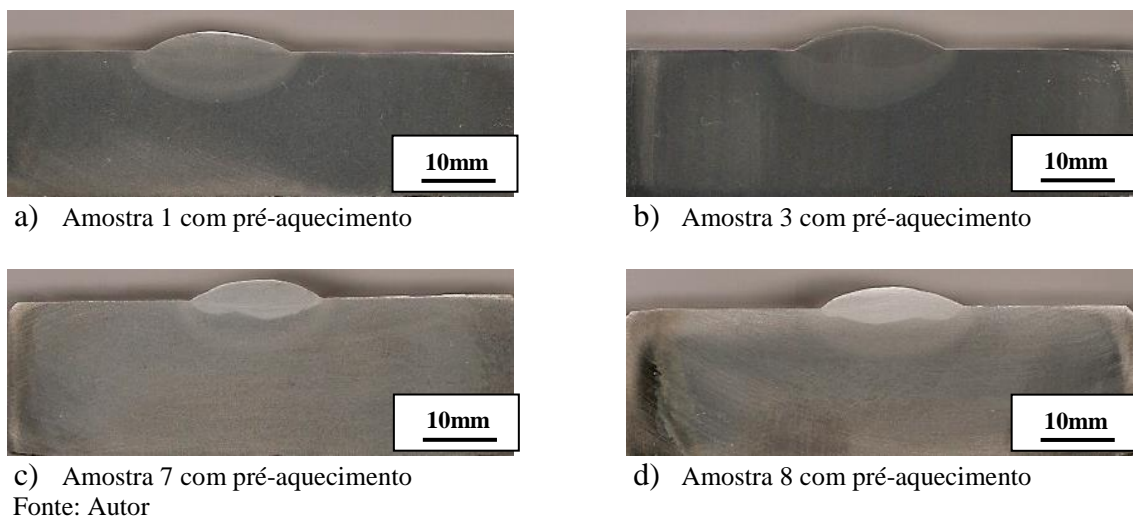


Figura 34: Macrografias dos corpos de prova soldados com pré-aquecimento



A partir das macrografias foi possível medir o reforço, a largura e a penetração dos cordões de solda, utilizando o programa Autodesk AutoCAD 2015. As TAB. 5 e 6 juntamente com as

FIG. 35 e 36 evidenciam os valores encontrados em cada corpo de prova. A partir desses valores, conclui-se que não houve diferença na morfologia do cordão de solda nos CPs de cada condição de soldagem, tal fato se deve pelo modo como o processo foi conduzido, de maneira mecanizada e com parâmetros constantes, o que permite um melhor controle do cordão de solda.

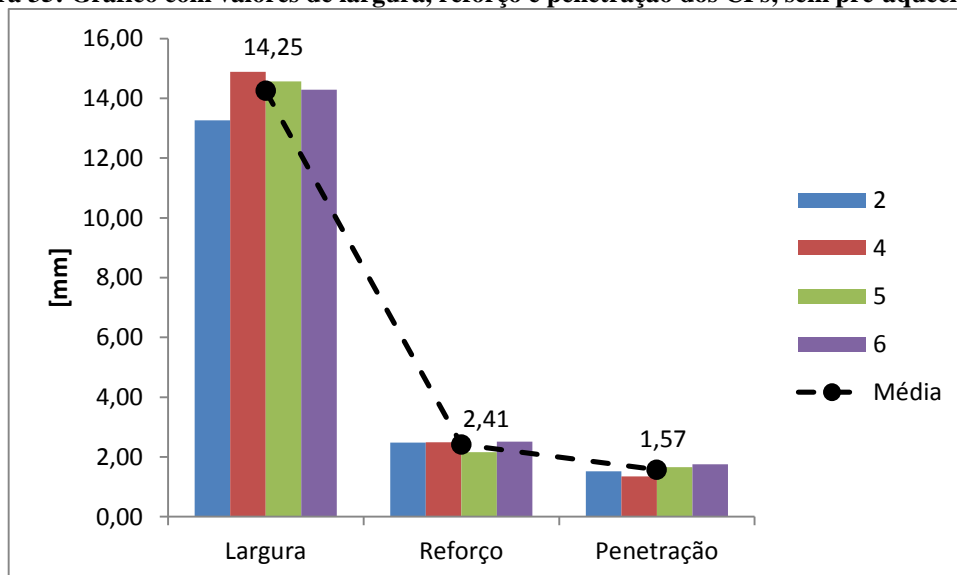
A FIG. 37 ilustra a comparação das médias da largura, penetração e reforço, dos corpos de prova em cada condição de soldagem. De acordo com a literatura, o pré-aquecimento auxilia na formação e morfologia do cordão de solda – largura, penetração e reforço – porém, de acordo com as medições feitas no AutoCAD, não houve muita diferença na morfologia das duas condições de soldagem, com e sem pré-aquecimento.

Tabela 5: Valores de largura, reforço e penetração dos CPs sem pré-aquecimento.

Peça	Largura (mm)	Reforço (mm)	Penetração (mm)
2	13,26	2,48	1,52
4	14,88	2,49	1,35
5	14,56	2,16	1,66
6	14,29	2,51	1,75
Média	14,25	2,41	1,57

Fonte: Autor

Figura 35: Gráfico com valores de largura, reforço e penetração dos CPs, sem pré-aquecimento.



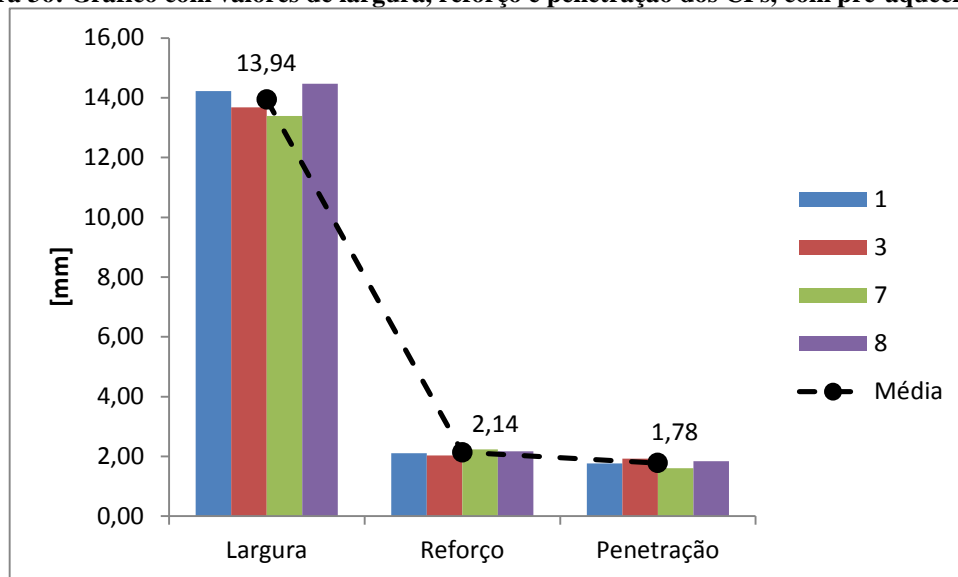
Fonte: Autor

Tabela 6: Valores de largura, reforço e penetração dos CPs com pré-aquecimento.

Peça	Largura (mm)	Reforço (mm)	Penetração (mm)
1	14,22	2,11	1,76
3	13,67	2,03	1,92
7	13,39	2,23	1,6
8	14,46	2,17	1,84
Média	13,94	2,14	1,78

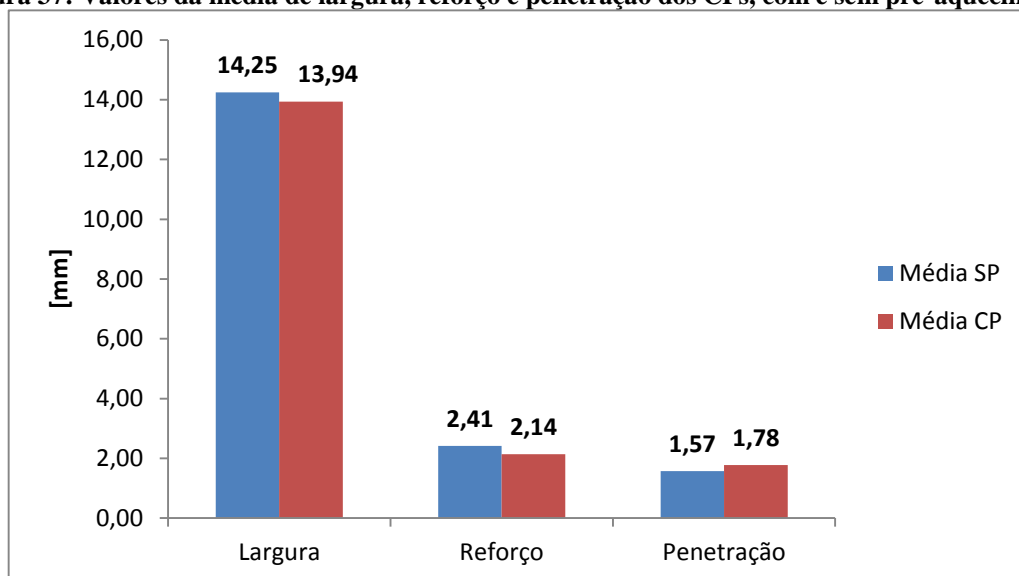
Fonte: Autor

Figura 36: Gráfico com valores de largura, reforço e penetração dos CPs, com pré-aquecimento.



Fonte: Autor

Figura 37: Valores da média de largura, reforço e penetração dos CPs, com e sem pré-aquecimento.



Fonte: Autor

4.2. Microestrutura dos Corpos de Prova Soldados

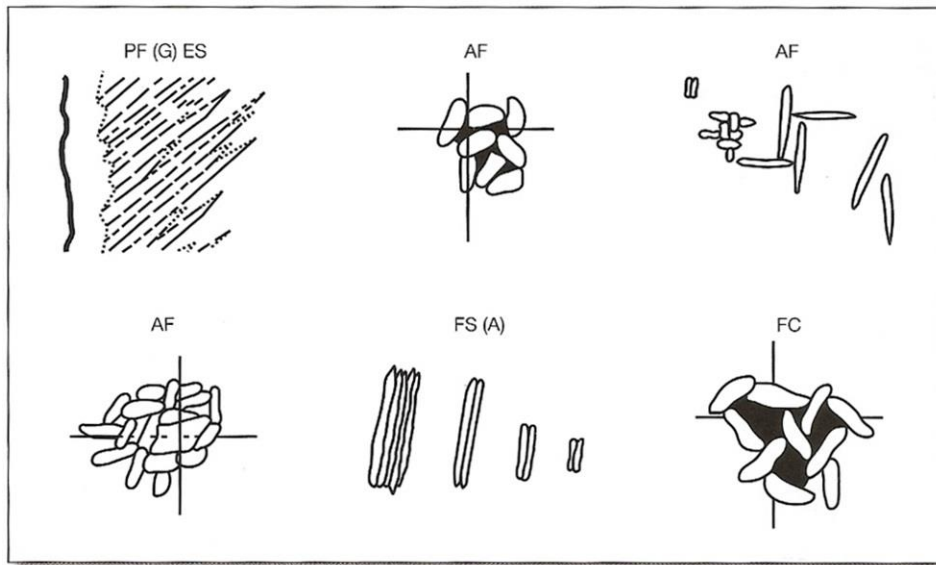
Para a análise microestrutural foi utilizada a classificação do Instituto Internacional de Soldagem (IIW) onde foi desenvolvido um sistema de classificação para os constituintes do metal depositado na zona fundida e zona termicamente afetada (COLPAERT, 2008). A TAB. 7 e a FIG. 38 ilustram essa classificação.

Tabela 7: Constituintes no esquema de classificação de microestrutura do IIW.

Categoria principal do constituinte	Subcategoria do constituinte	Abreviação
	Ferrita primária	PF
	Ferrita de contorno de grão	PF(G)
	Ferrita intragranular	PF(I)
	Ferrita com segunda fase	FS
	Ferrita com segunda fase não-alinhada	FS(NA)
	Ferrita com segunda fase alinhada	FS(A)
	Placas laterais de ferrita (side plates)	FS(SP)
	Bainita	FS(B)
	Bainita superior	FS(UB)
	Bainita inferior	FS(LB)
	Ferrita acicular	AF
	Agregado ferrita carboneto	FC
	Perlita	FC(P)
Martensita	Martensita em ripas	M(L)
	Martensita maclada	M(T)

Fonte: COLPAERT, 2008 (Adaptado).

Figura 38: Morfologias de constituintes conforme a classificação da Tabela 5.

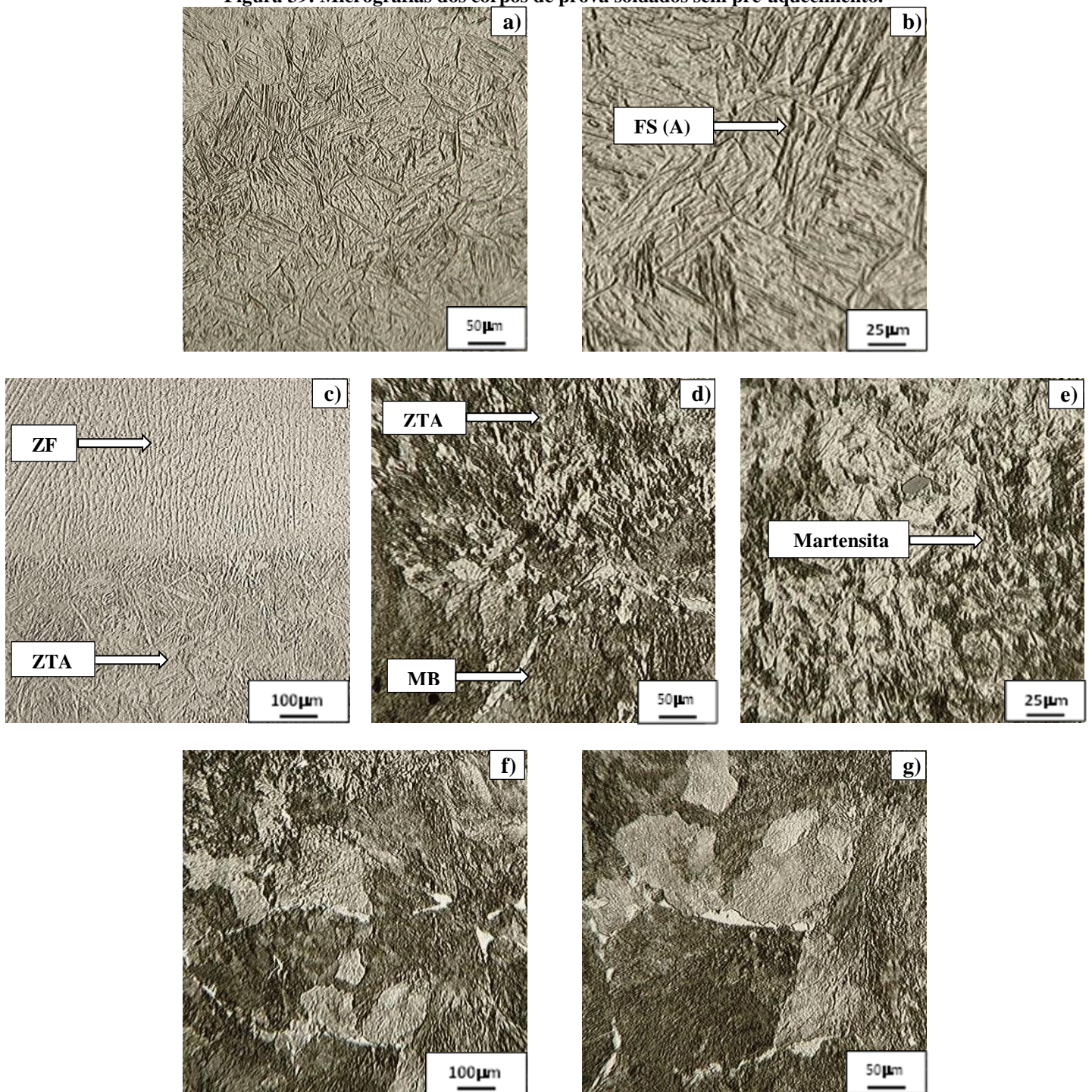


Fonte: COLPAERT, 2008.

A partir do microscópio óptico (MO) foi possível capturar imagens das peças soldadas. Nota-se que são exibidas imagens da zona fundida (ZF), zona termicamente afetada (ZTA) e do metal base. Considerando a condição de soldagem sem pré-aquecimento e sem pós-aquecimento (FIG. 39), a zona fundida (FIG. 39 a) e b)) apresenta ferrita com segunda fase alinhada (FS (A)). Na FIG. 39 c) e d) é evidenciada a interface entre a ZF e a ZTA e ZTA com o MB, respectivamente. Colpaert (2008) indica uma martensita que surgiu a partir de um aço que sofreu um resfriamento brusco, o qual se assemelha com a FIG. 39 e), estando de acordo com o procedimento realizado (sem resfriamento lento). Por fim, o metal de base apresenta grãos mais grosseiros de ferrita e perlita.

Considerando a condição de soldagem com pré-aquecimento e resfriamento lento (FIG. 40), de maneira similar à situação anterior, a zona fundida (FIG. 40 a) e b)) é caracterizada pela ocorrência de ferrita acicular, o que confere ganho de tenacidade, possibilitando uma capacidade de aplicação maior na indústria. A zona termicamente afetada (Figuras 40 c), d) e e)) é marcada pela ocorrência de ferrita de contorno de grão, PF(G), juntamente com martensita. Por fim, o metal de base, FIG. 40 f) e g), é composta de grãos de ferrita e colônias de perlita. Ressalta-se que a análise foi conduzida a partir da comparação dos resultados com a literatura (ASM HANBOOK, 1993).

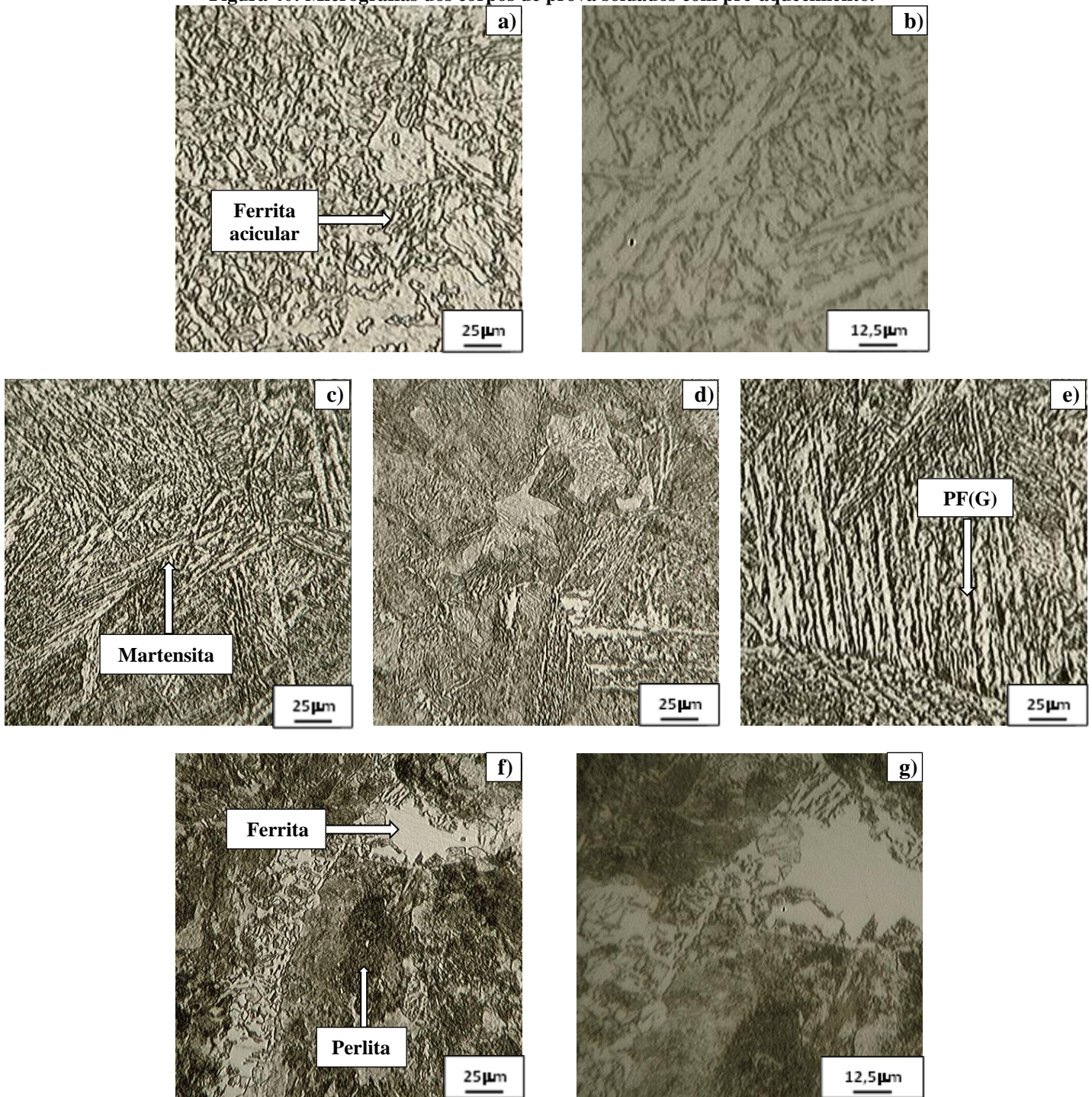
Figura 39: Micrografias dos corpos de prova soldados sem pré-aquecimento.



(a) e (b) ZF em diferentes ampliações; (c), (d) e (e) ZTA - três regiões; (f) e (g) MB em diferentes ampliações.

Fonte: Autor

Figura 40: Micrografias dos corpos de prova soldados com pré-aquecimento.



(a) e (b) ZF em diferentes ampliações; (c), (d) e (e) ZTA - três regiões; (f) e (g) MB em diferentes ampliações.

Fonte: Autor

4.3. Distribuição de Microdureza nos Corpos de Prova Soldados

Os resultados de microdureza Vickers do aço 4140 como recebido estão apresentados na TAB. 8, assim como a média das medidas realizadas.

Tabela 8: Resultados de microdureza Vickers (HV)

Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Medida 5	Medida 6	Medida 7	Média
316	322	350	353	350	367	336	342

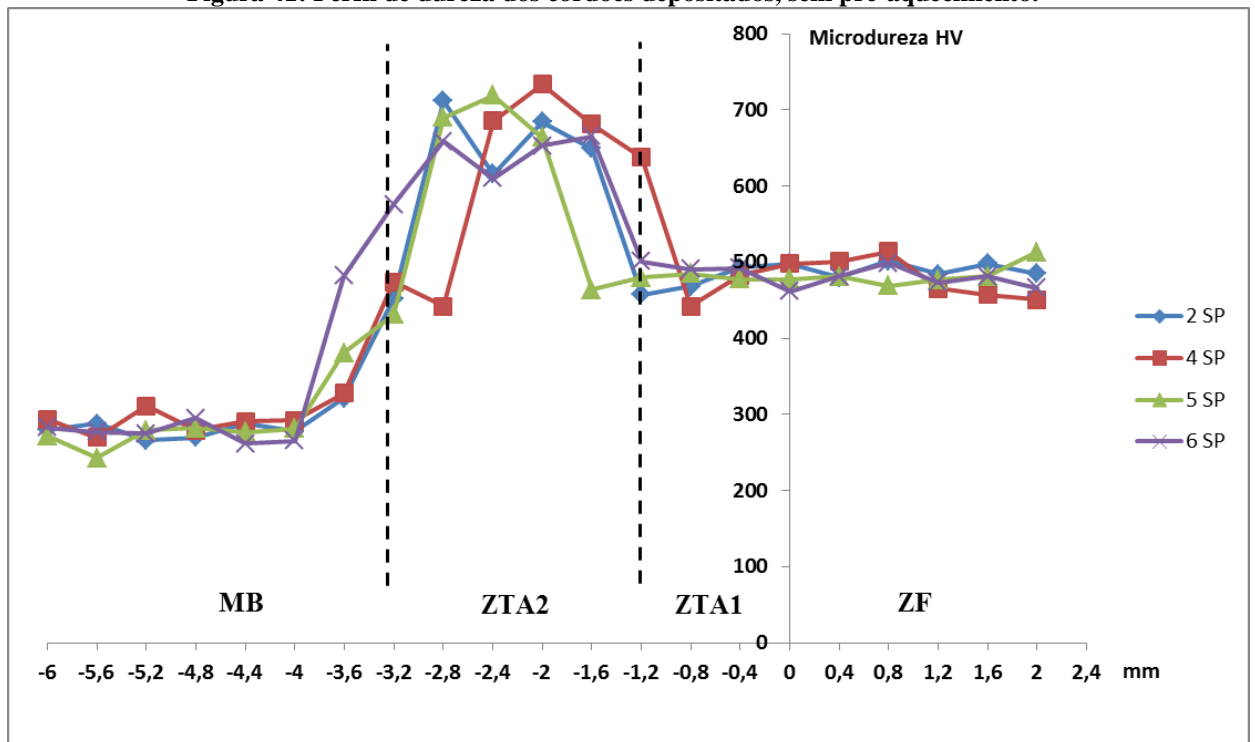
Fonte: Autor

Na FIG. 41 e 42 são apresentadas as distribuições de dureza Vickers do aço SAE 4140 soldado utilizando o processo a arco submerso sem e com pré-aquecimento, respectivamente, conforme o procedimento representado esquematicamente na FIG. 32.

Considerando inicialmente as amostras com deposição de cordão de solda sem pré-aquecimento, observa-se que os valores iniciais de dureza (FIG. 41) são superiores àquele relativo à liga no estado como adquirida. A ZTA possui duas regiões, a ZTA1, mais próxima da ZF e a ZTA2, próxima ao MB. Nas proximidades da ZTA2 o valor de dureza média fica próximo de 700HV. Esse alto valor de dureza se deve pela grande quantidade de martensita formada na região da ZTA, conferindo alta fragilidade na região. Esta estrutura frágil aliada às tensões residuais, frequentemente geradas nos procedimentos de soldagem, pode levar ao aparecimento de trincas e até mesmo a fratura da junta.

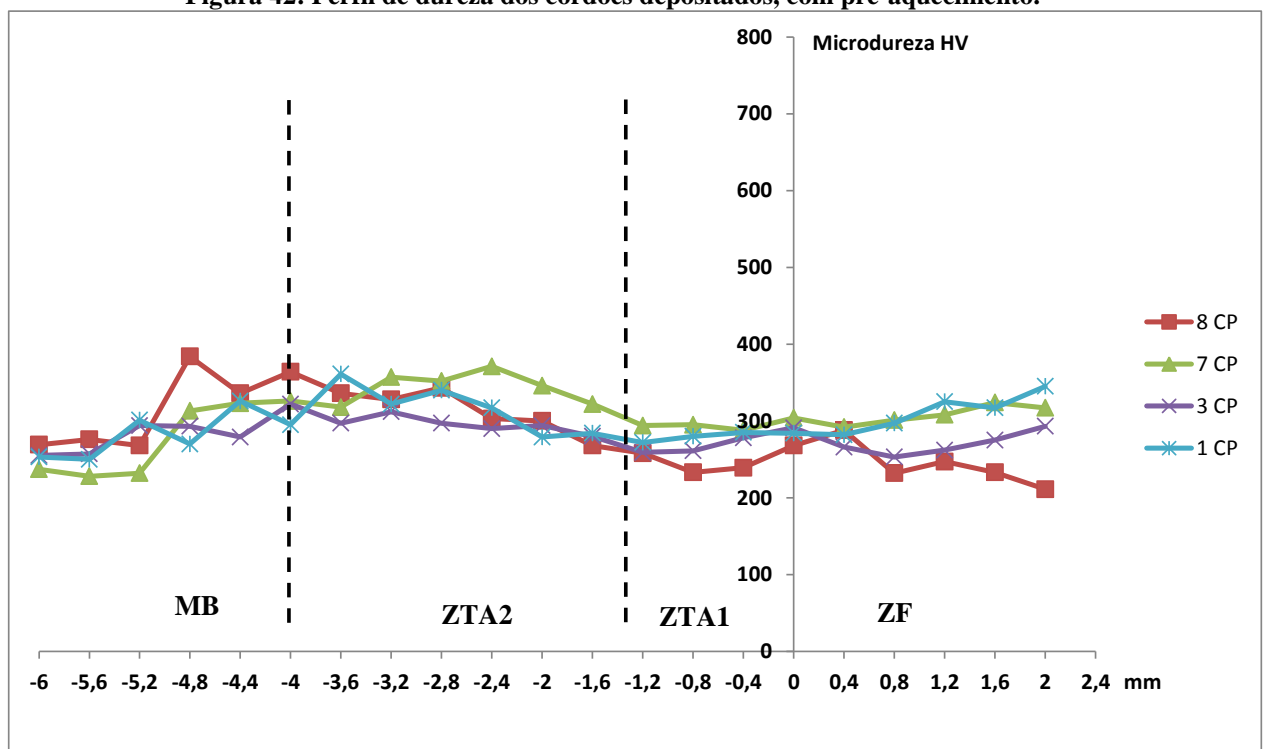
Analisando o perfil de dureza dos cordões soldados com pré-aquecimento e resfriamento lento (FIG. 42), percebe-se que devido a esse procedimento, os valores de dureza ficaram menores em relação à situação sem pré-aquecimento, o que se deve ao surgimento de uma menor quantidade de martensita na região da ZTA. Fato esse que confirma a análise microestrutural realizada no item 5.2.

Figura 41: Perfil de dureza dos cordões depositados, sem pré-aquecimento.



Fonte: Autor

Figura 42: Perfil de dureza dos cordões depositados, com pré-aquecimento.

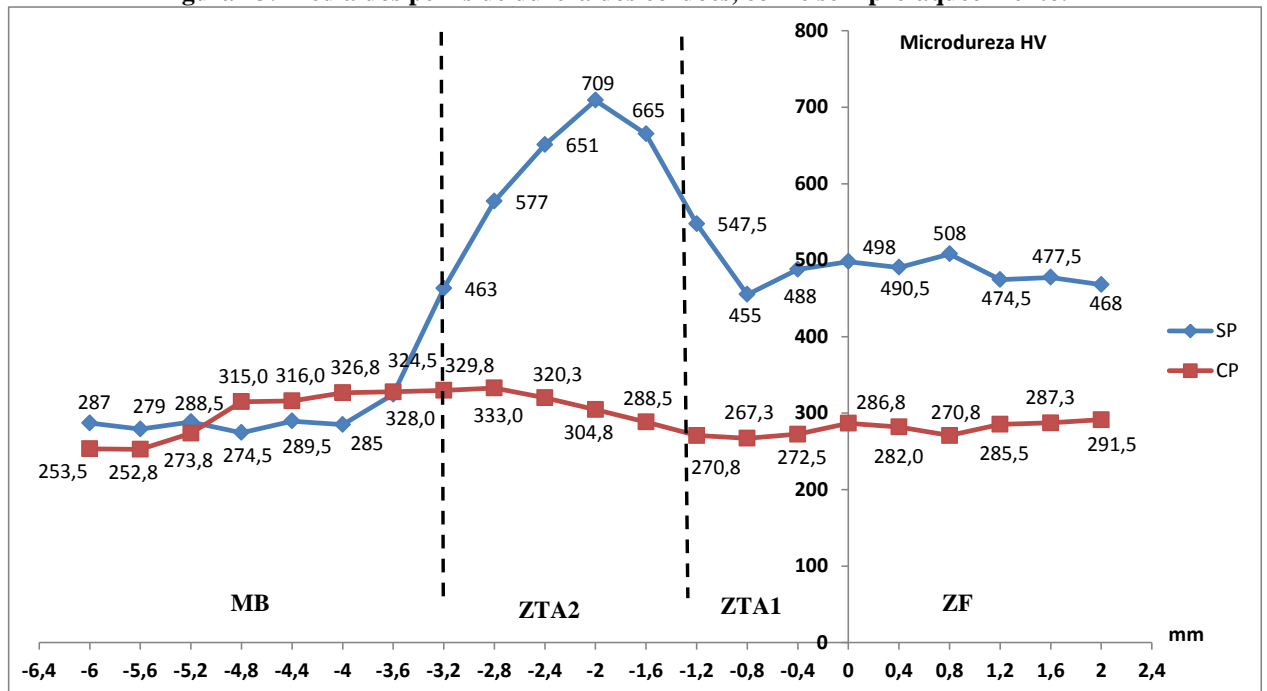


Fonte: Autor

Para efeito comparativo, a FIG. 43 ilustra a média dos valores de microdureza dos corpos de prova de cada procedimento (com e sem pré-aquecimento), onde evidencia a diferença de se realizar o tratamento térmico nas peças soldadas. Percebe-se também, que os valores de

microdureza das peças com pré-aquecimento e resfriamento lento obtiveram valores praticamente constantes por toda a seção, o que é favorável, dependendo da aplicação. Porém, nas peças sem pré-aquecimento houve uma variação de microdureza na ZTA2, onde se encontra uma maior quantidade de martensita, ocasionando valores altos de dureza na peça.

Figura 43: Média dos perfis de dureza dos cordões, com e sem pré-aquecimento.



Fonte: Autor

5. CONCLUSÃO

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

- a) Não houve diferença significativa nas dimensões da penetração, do reforço e da largura do cordão nas condições com e sem pré-aquecimento.
- b) Nas duas condições de soldagem, ou seja, com e sem pré-aquecimento, houve o surgimento de ferrita com segunda fase alinhada na zona fundida, conferindo uma melhor tenacidade à região.
- c) As peças soldadas sem pré-aquecimento apresentaram aumento de dureza e fragilidade do material devido a grande quantidade de martensita.
- d) Os corpos de prova soldados com pré-aquecimento e resfriamento lento apresentaram uma microdureza aproximadamente linear em toda a seção transversal das peças e um valor próximo a microdureza do material como recebido.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

AGUIAR, W. M. **Soldagem do Aço 4140 sem Tratamento Térmico Posterior**. Proposta de Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais) – Departamento de Engenharia Mecânica e Produção, UFC, Fortaleza, 2001.

AMERICAN WELDING SOCIETY. AWS. Welding handbook; welding process. 8ed. Miami: AWS, 2001. v. 1.

ANNONI, R. **Lixiviação de Escórias de Soldagem a Arco Submerso Visando à Recuperação dos Óxidos de Alumínio e Titânio**. Proposta de Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica) - Escola de Engenharia Metalúrgica e de Minas, UFMG, Belo Horizonte, 2011.

ASM HANDBOOK. **Metallography and microstructures**. 10 ed. Ohio: American Society for Metals - ASM International, 2004.

BRANDÃO, J. R. **Estudo da Soldagem MIG-MAG na Resistência a Fadiga do Aço AISI 4140 em Diferentes Condições Operacionais de Soldagem e Tratamentos Térmicos**. Proposta de Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, PUC-MG, Belo Horizonte, 2010.

CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**. 7a ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais - ABM, 2008.

COFIÑO, R. C. **Análise das Tensões Residuais em uma Junta Soldada em Condição Overmatch**. Trabalho de Conclusão de Curso – Centro Universitário da FEI, São Bernardo do Campo, 2010.

COLPAERT, H. **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns**. 4a ed. São Paulo: Blücher, 2008.

COSTA, M. C. M. S. **Fenômenos de Instabilidade do Arco na Soldagem GMAW com Gases de Baixo Potencial de Oxidação**. Proposta de Dissertação (Doutorado em Engenharia Metalúrgica) - Escola de Engenharia Metalúrgica e de Minas, UFMG, Belo Horizonte, 2006.

FILHO, C. A. **Metalurgia da Soldagem**. Texto base da disciplina Metalurgia da Soldagem. Curso Técnico em Mecânica, CEFET-PA, Pará, 2008.

FORTES C. ESAB. **Metalurgia da Soldagem.** (2005). Disponível em: <http://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/index.cfm>. Acesso: Agosto, 2014.

FORTES C. ESAB. **Soldagem Arco Submerso.** (2005). Disponível em: <http://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/index.cfm>. Acesso: Agosto, 2014.

FORTES C. ESAB. **Soldagem MIG MAG.** (2005). Disponível em: http://www.esab.com.br/br/por/Instrucao/biblioteca/upload/1901104rev0_ApostilaSoldagemMIGMAG.pdf>. Acesso em: Agosto, 2014.

HAAS, A, R **Análise da Influência dos Parâmetros de Operação Sobre a Geometria do Cordão de Solda Obtido Pelo Processo de Soldagem por Eletrodo Tubular.** Proposta de Monografia (Título de Engenheiro Mecânico) – Departamento de Engenharia Mecânica, UFRGS, Porto Alegre, 2010.

MACHADO, I.G. **Soldagem e tecnologia e técnicas conexas: processos.** Porto Alegre, 1996. 477p. editado pelo autor.

MARQUES, P.V.; MODENESI, P.J.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem – fundamentos e tecnologia.** Belo Horizonte: Editora UFMG, 2009.

MODENESI, P.J. **Introdução à física do arco elétrico e sua aplicação na soldagem dos metais.** Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Metalurgia da UFMG, 2004. 141p. (Apostila).

WAINER, E.; BRANDI, Sérgio. D.; MELLO, F. D. H. **Soldagem: processos e metalurgia.** São Paulo. Ed Bulcher, 2011.