

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

NATHÁLIA MELLO MASCARENHAS PAIXÃO

AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE TUBOS DE AÇO AISI 4130
SOLDADOS COM O PROCESSO GTAW

BELO HORIZONTE

2013

NATHÁLIA MELLO MASCARENHAS PAIXÃO

AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE TUBOS DE AÇO AISI 4130
SOLDADOS COM O PROCESSO GTAW

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao 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: Prof. Dr. Ivan José de Santana

Belo Horizonte

2013

NATHÁLIA MELLO MASCARENHAS PAIXÃO

AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE TUBOS DE AÇO AISI 4130
SOLDADOS COM O PROCESSO GTAW

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao 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: ____/____/____

BANCA EXAMINADORA

Prof: Ivan José de Santa, (Doutor), CEFET-MG

Profa.: Maria Celeste M. de Souza Costa, (Doutora), CEFET-MG

Profa.: Rachel Mary Osthues, (Doutora), CEFET-MG

RESUMO

O aço é um material muito utilizado atualmente, ele se destaca entre os outros metais pela sua facilidade de processamento, pelas suas propriedades mecânicas adequadas para várias aplicações, por seu baixo custo relativo e por sua abundância na natureza. Por estes motivos, é muito importante se estudar o aço e suas ligas. A soldagem é um processo muito importante na união de materiais metálicos, principalmente do aço. Portanto, este trabalho trata do estudo da união de tubos de aço AISI 4130 pelo processo *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW). Vários parâmetros podem influenciar na qualidade de uma junta soldada, um destes parâmetros, é a taxa de resfriamento. Uma taxa de resfriamento elevada pode produzir microestruturas que podem ser indesejadas no material. Para diminuir a taxa de resfriamento, pode ser realizado o pré-aquecimento. Neste trabalho, foram analisados corpos de prova soldados com pré-aquecimento e soldados sem pré-aquecimento, para possibilitar uma comparação, e definir se o pré-aquecimento poderia modificar as propriedades da junta soldada. Para a análise das propriedades mecânicas, foram realizados ensaios de dobramento e ensaios de microdureza da zona fundida (ZF), da zona termicamente afetada (ZTA) e do metal base (MB). Para a análise microestrutural do material, foram realizadas micrografias e macrografias. Ao final da análise dos resultados, pôde-se verificar que o MB é formado, basicamente por dois constituintes: ferrita e perlita. Já a ZTA de todas as amostras apresentou martensita. A ZF das amostras também é formada por dois constituintes: ferrita e perlita, porém, com morfologia diferente da microestrutura do MB. A soldagem GTAW em tubos de aço AISI 4130 sem pré-aquecimento mostrou-se menos adequada, pois a ZTA apresentou valores de microdureza maiores em relação às soldadas com pré-aquecimento, e algumas amostras sofreram fratura perpendicular ao cordão de solda durante o ensaio de dobramento. A soldagem GTAW em tubos de aço AISI 4130 com pré-aquecimento mostrou-se adequada, uma vez que nenhuma amostra sofreu fratura durante o ensaio de dobramento.

Palavras-chaves: *Gas Tungsten Arc Welding*. *Tungsten Inert Gas*. Soldagem. Aço AISI 4130.

ABSTRACT

The steel is a material which has been very used currently, its highlight comparing the other metals is due its processability, its mechanic properties are adequated for a lot of aplicaciones, for its low cost and for its ease to be found in the nature. For these reasons, it is very important studying the steel and its alloys. The welding is a process very important to bind metals, mainly the steels. Therefore, this work is about the studying of the binding of tubes made with AISI 4130 steel by the Gas Tungsten Arc Welding (GTAW) process. Various parameters can influence the weld bead quality, one of them, it is the cooling rate. A high cooling rate can produce microstructures which can be undesired in the material. In order to decrease the cooling rate, the pre-heating can be realized. In this work, samples welded with pre-heating and welded without pre-heating were analised, in order to enable one comparison, and define if the pre-heating could modify the weld bead properties. To analyse the mechanic properties of the samples, folding tests were made, and microhardness tests of the melted zone (MZ), of the heat affected zone (HAZ) and of the base metal (BM) were, also, made. To analyse the material microstructure, micrographies and macrographies were realized. At the end of the results analysis, it could be concluded that the BM is formed, basically, with two constituents: ferrite and perlite. The HAZ of all the samples contains martensite. The MZ of the samples is also formed with two constituents: ferrite and perlite, but, with a different morphology from the BM. The GTAW process to bind tubes of AISI 4130 steel without pre-heating showed itself less appropriate, because the HAZ contains microhardness values higher than the HAZ of the samples welded with pre-heating, and, more than this, some samples suffered fracture perpendicularly to the weld bead during the folding test. The GTAW process to bind tubes of AISI 4130 steel with pre-heating showed itself appropriate, because none of the samples suffered fracture during the folding test.

Keywords: Gas Tungsten Arc Welding. Tungsten Inert Gas. Welding. AISI 4130 steel.

Índice de Figuras

Figura 4.1 -	Estruturas possíveis para uma liga de ferro	23
Figura 4.2 -	Diagrama de fases ferro carbono	24
Figura 4.3 -	Distorção de Bain	26
Figura 4.4 -	Esquemas das duas morfologias de bainitas mais comuns	27
Figura 4.5 -	Variação da energia potencial para um sistema composto de dois átomos em função da distância de separação entre eles	30
Figura 4.6 -	Representação esquemática da superfície metálica limpa	31
Figura 4.7 -	Soldagem por pressão ou deformação	32
Figura 4.8 -	Representação esquemática da soldagem por fusão	32
Figura 4.9 -	Posições de soldagem para tubos convencionadas pela ASME	34
Figura 4.10 -	Repartição térmica de uma solda	35
Figura 4.11 -	Soldagem GTAW	43
Figura 5.1 -	Fluxograma com os procedimentos realizados em amostras de tubos de aço AISI 4130	45
Figura 5.2 -	Desenho dos corpos de prova confeccionados a partir de tubos de aço AISI 4130	48
Figura 5.3 -	Cortes realizados em tubo de aço AISI 4130	48
Figura 5.4 -	Equipamento utilizado para fornecer a corrente elétrica na soldagem GTAW	49
Figura 5.5 -	Esquema de soldagem autógena TIG realizada em tubos de aço AISI 4130	50

Figura 5.6 -	Máquina utilizada para realizar ensaio de dobramento	51
Figura 5.7 -	Esquema de ensaio de dobramento realizado em tubos	52
Figura 5.8 -	Ensaio de dobramento realizado em amostra de aço AISI 4130	52
Figura 5.9 -	Região do tubo AISI 4130 para realização de ensaio metalográfico da seção transversal	53
Figura 5.10 -	Região do tubo para análise metalográfica da seção longitudinal	53
Figura 5.11 -	Representação da região utilizada para realização de ensaios metalográficos em tubos soldados pelo processo GTAW	54
Figura 5.12 -	Representação da seção utilizada para realizar ensaios metalográficos em tubos submetidos à simulação de soldagem autógena	55
Figura 5.13 -	Microscópio óptico utilizado para se realizar micrografias	56
Figura 5.14 -	Esquema da região de corpo de prova embutido para realização de medidas de micro dureza	58
Figura 5.15 -	Equipamento para realização de medição de microdureza	59
Figura 5.16 -	Esquema da impressão deixada no material após ensaio de microdureza	59
Figura 6.1 -	Micrografias da seção longitudinal do tubo de aço AISI 4130, (a) 200x e (b) 400x	61
Figura 6.2 -	Micrografias da seção transversal de um tubo de aço AISI 4130, (a) 200x e (b) 400x	62

Figura 6.3 -	Micrografias da seção longitudinal do tubo de aço AISI 4130 pré-aquecido, (a) 200x e (b) 400x	63
Figura 6.4 -	Micrografias da seção transversal do tubo de aço AISI 4130 pré-aquecido, (a) 200x e (b) 400x	64
Figura 6.5 -	Imagens de CP 03 antes e depois do ensaio de dobramento	68
Figura 6.6 -	Imagens de CP 04 antes e depois do ensaio de dobramento	68
Figura 6.7 -	Imagens de CP 05 antes e depois do ensaio de dobramento	69
Figura 6.8 -	Imagens de CP 06 antes e depois do ensaio de dobramento	69
Figura 6.9 -	Imagens de CP 07 após o ensaio de dobramento	70
Figura 6.10 -	Imagens de CP 08 após o ensaio de dobramento	70
Figura 6.11 -	Imagens de CP 09 após o ensaio de dobramento	71
Figura 6.12 -	Imagens de CP 10 após o ensaio de dobramento	71
Figura 6.13 -	Imagens de CP 11 após o ensaio de dobramento	72
Figura 6.14 -	Imagens de CP 12 após o ensaio de dobramento	72
Figura 6.15 -	Imagens de CP 13 após o ensaio de dobramento	73
Figura 6.16 -	Macrografia de CP 01	74
Figura 6.17 -	Macrografia de CP 02	74
Figura 6.18 -	Macrografia de CP 03	75
Figura 6.19 -	Macrografia de CP 04	75
Figura 6.20 -	Macrografia de CP 05	76
Figura 6.21 -	Macrografia de CP 06	76
Figura 6.22 -	Macrografia de CP 07	77
Figura 6.23 -	Macrografia de CP 08	77

Figura 6.24 - Macrografia de CP 09	78
Figura 6.25 - Macrografia de CP 10	78
Figura 6.26 - Macrografia de CP 11	79
Figura 6.27 - Macrografia de CP 12	79
Figura 6.28 - Macrografia de CP 13	80
Figura 6.29 - Micrografias de metal base de CP 01 com aumentos de 200x e 400x	82
Figura 6.30 - Micrografias da zona fundida de CP 01 com aumentos de 200x e 400x	83
Figura 6.31 - Micrografias de metal base de CP 02, (a) 200x e (b) 400x	84
Figura 6.32 - Micrografias da região entre ZF e ZTA de CP 02, (a) 200x e (b) 400x	85
Figura 6.33 - Micrografias do metal base de CP 03, (a) 200x e (b) 400x	86
Figura 6.34 - Micrografias da região entre ZTA e ZF de CP 03, (a) 200x e (b) 400x	87
Figura 6.35 - Micrografias do metal base de CP 04, (a) 200x e (b) 400x	88
Figura 6.36 - Micrografias da região entre ZTA e ZF de CP 04, (a) 200x e (b) 400x	89
Figura 6.37 - Micrografias do Metal Base de CP 05, (a) 200x e (b) 400x	90
Figura 6.38 - Micrografias da região entre ZTA e ZF de CP 05, (a) 200x e (b) 400x	91
Figura 6.39 - Micrografias do metal base de CP 06, (a) 200x e (b) 400x	93

Figura 6.40 - Micrografias da região entre ZTA e ZF de CP 06, (a) 200x e (b) 400x	94
Figura 6.41 - Micrografias do metal base de CP 07, (a) 200x e (b) 400x	95
Figura 6.42 - Micrografias da região entre ZTA e ZF de CP 07, (a) 200x e (b) 400x	96
Figura 6.43 - Micrografias do metal base de CP 08, (a) 200x e (b) 400x	97
Figura 6.44 - Micrografias da região entre ZTA e ZF de CP 08, (a) 200x e (b) 400x	98
Figura 6.45 - Micrografias do metal base de CP 09, (a) 200x e (b) 400x	100
Figura 6.46 - Micrografias da região entre ZTA e ZF de CP 09, (a) 200x e (b) 400x	101
Figura 6.47 - Micrografias do metal base de CP 10, (a) 200x e (b) 400x	102
Figura 6.48 - Micrografias da região entre ZTA e ZF de CP 10, (a) 200x e (b) 400x	103
Figura 6.49 - Micrografias do metal base de CP 11, (a) 200x e (b) 400x	104
Figura 6.50 - Micrografias da região entre ZTA e ZF de CP 11, (a) 200x e (b) 400x	105
Figura 6.51 - Micrografias do metal base de CP 12, (a) 200x e (b) 400x	106
Figura 6.52 - Micrografias da região entre ZTA e ZF de CP 12, (a) 200x e (b) 400x	107
Figura 6.53 - Micrografias de CP 13, (a) 200x e (b) 400x	109
Figura 6.54 - Medidas de microdureza Vickers em função do deslocamento, CP 01	111

Figura 6.55 - Medidas de microdureza Vickers em função do deslocamento, CP 02	111
Figura 6.56 - Medidas de microdureza Vickers em função do deslocamento, CP 03	112
Figura 6.57 - Medidas de microdureza Vickers em função do deslocamento, CP 04	113
Figura 6.58 - Medidas de microdureza Vickers em função do deslocamento, CP 05	113
Figura 6.59 - Medidas de microdureza Vickers em função do deslocamento, CP 06	114
Figura 6.60 - Medidas de microdureza Vickers em função do deslocamento, CP 07	115
Figura 6.61 - Medidas de microdureza Vickers em função do deslocamento, CP 08	115
Figura 6.62 - Medidas de microdureza Vickers em função do deslocamento, CP 09	116
Figura 6.63 - Medidas de microdureza Vickers em função do deslocamento, CP 10	117
Figura 6.64 - Medidas de microdureza Vickers em função do deslocamento, CP 11	118
Figura 6.65 - Medidas de microdureza Vickers em função do deslocamento, CP 12	118

Figura 6.66 - Medidas de microdureza Vickers em função do deslocamento,

CP 13

119

Índice de Tabelas

Tabela 4.1 – Composição química do aço AISI 4130	28
Tabela 4.2 – Composição química para eletrodos de tungstênio	42
Tabela 4.3 – Faixas de correntes e bocais para a soldagem GTAW	44
Tabela 5.1 – Composição química de tubos de aço AISI 4130	46
Tabela 5.2 – Composição química do material de deposição de aço, referência ER70S-3	46
Tabela 5.3 – Quantidades de corpos de prova confeccionados e procedimentos de soldagem realizados em tubos de aço AISI 4130	47
Tabela 6.1 – Medidas de microdureza realizadas em tubo de aço AISI 4130	66
Tabela 6.2 – Resultados do ensaio de dobramento realizado em tubos de aço AISI 4130	67
Tabela 6.3 – Valores de microdureza medidos em amostras de tubos de aço AISI 4130	110

Lista de Abreviaturas e Siglas

Abreviaturas

a	Parâmetro de rede
A	Amper (unidade de corrente elétrica)
a.C.	Antes de Cristo
Å	Ångström (0,000001 milímetros)
C	Celsius
CA	Corrente alternada
CC	Corrente contínua
CCC	Cúbica de corpo centrada
C_{eq}	Carbono equivalente
$C_{eqtotal}$	Carbono equivalente total
CFC	Cúbica de face centrada
CP	Corpo de Prova
Cr	Cromo
Cu	Cobre
gf	Gramas-Força (unidade de força)
l	Litros
MB	Metal Base
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
min	Minutos (unidade de tempo)

mm	Milímetros (unidade de comprimento)
Mn	Manganês
Mo	Molibdênio
MPa	Mega Pascal (unidade de pressão)
NBR	Norma Brasileira
Ni	Níquel
s	Segundos (unidade de tempo)
TCC	Tetragonal de corpo centrado
V	Vanádio
W	Tungstênio
X	Vezes
ZF	Zona Fundida
ZTA	Zona Termicamente Afetada

Siglas

AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
AWS	<i>American Welding Society</i>
GTAW	<i>Gas Tungsten Arc Welding</i>
IIW	<i>International Intitute of Welding</i>
TIG	<i>Tungsten Inert Gas</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
2	OBJETIVOS	19
3	JUSTIFICATIVA	20
4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
4.1	Aço como um material	21
4.1.1	<i>A estrutura cristalina dos aços</i>	22
4.1.2	<i>Outras fases e constituintes de um aço – Martensita e Bainita</i>	25
4.2	Aço AISI 4130	28
4.3	Processo de soldagem	29
4.3.1	<i>A formação da solda microscopicamente</i>	30
4.3.2	<i>Soldagem por deformação ou por fusão</i>	31
4.3.3	<i>Vantagens e desvantagens do processo de soldagem</i>	33
4.3.4	<i>Posições de soldagem</i>	34
4.3.5	<i>A Zona Termicamente Afetada (ZTA)</i>	34
4.3.6	<i>Pré-aquecimento e outros tratamentos térmicos</i>	36
4.4	Processos de soldagem a arco elétrico	38
4.5	Processo de soldagem GTAW	39
4.5.1	<i>Técnica operacional</i>	42
5	MATERIAIS E MÉTODOS	45
5.1	Materiais utilizados	46
5.2	Métodos	47
5.2.1	<i>Confecção dos corpos de prova</i>	47
5.2.2	<i>Soldagem dos tubos</i>	49
5.2.3	<i>Solda autógena</i>	50
5.2.4	<i>Ensaio de dobramento</i>	50
5.2.5	<i>Micrografias</i>	53
5.2.6	<i>Macrografias</i>	57
5.2.7	<i>Ensaio de medição de microdureza Vickers</i>	57
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	61

6.1 Tubo como recebido e aquecido à 200° C	61
<i>6.1.1 Micrografias</i>	61
<i>6.1.2 Medição de microdureza Vickers</i>	65
6.2 Tubos de aço AISI 4130 soldados	67
<i>6.2.1 Ensaio de dobramento</i>	67
<i>6.2.2 Macrografias</i>	73
<i>6.2.3 Micrografias</i>	81
<i>6.2.4 Medições de microdureza Vickers</i>	100
7 CONCLUSÃO	120
REFERÊNCIAS	121

1 INTRODUÇÃO

Os materiais metálicos têm sido utilizados pelo homem há muitos anos, e até nos dias de hoje, apresentam grande relevância. Dentre as diversas ligas metálicas, o aço se destaca por apresentar comportamento mecânico adequado para diversas aplicações, pela sua facilidade de processamento, pelo seu custo relativamente baixo, e por sua principal matéria prima, o ferro, ser muito abundante na natureza.. O aço pode conter somente carbono como elemento de liga, ou pode conter outros elementos responsáveis por modificar as propriedades físicas, químicas e mecânicas.

Dentre os tipos de processamentos de materiais metálicos, a soldagem é um processo muito utilizado. A soldagem consiste na união de materiais com elevação da temperatura e/ou deformação plástica. As vantagens de se utilizar a soldagem em relação à fundição, por exemplo, é que não há a necessidade de uma espessura máxima ou mínima, e podem ser usados diferentes materiais ao longo do mesmo conjunto. As vantagens da soldagem em relação às juntas feitas através de rebites e parafusos, é que não há perda de material com a fabricação desses elementos, e na união com rebites, é necessária uma espessura mínima, o que aumenta o peso do conjunto. As juntas soldadas não necessitam de artifícios para prevenir vazamentos.

Devido à grande relevância da utilização de materiais metálicos, este trabalho trata do estudo da união de tubos de aço utilizando-se a soldagem. Os tubos analisados são feitos de aço AISI 4130 que é um aço ligado ao cromo-molibdênio que possui aproximadamente 0,30% de carbono. A presença destes elementos de liga pode fazer com que se eleve a resistência mecânica e a tenacidade dos tubos, e pode aumentar a resistência à corrosão.

Os processos de soldagens são muito amplos, e o selecionado para a realização deste trabalho foi o *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW), que no Brasil é mais comumente chamado de soldagem *Tungsten Inert Gas* (TIG). Este processo consiste em uma soldagem a arco elétrico com a utilização de um eletrodo de tungstênio e, geralmente, argônio como gás de proteção. No processo TIG pode ocorrer a utilização ou não de material de deposição.

Vários parâmetros durante o processo de soldagem podem ser modificados a fim de se obter as propriedades almejadas do material, um desses parâmetros, é a taxa de resfriamento. O processo de difusão atômica demanda um tempo para ocorrer, portanto, uma alta taxa de resfriamento pode dificultar a mobilidade atômica na estrutura cristalina, formando fases com propriedades que podem comprometer o desempenho mecânico da junta soldada. A taxa de resfriamento pode ser diminuída realizando-se o pré-aquecimento, onde a temperatura dependerá do material e dos elementos de liga presentes e das suas proporções.

A fim de adequar as propriedades mecânicas do conjunto, o pré-aquecimento foi realizado nos corpos de provas. Foram feitas comparações entre corpos de prova soldados sem pré-aquecimento e soldados com pré-aquecimento, para analisar se o pré-aquecimento, neste caso, poderia influenciar nas propriedades da junta soldada.

Para realizar a análise da influência do pré-aquecimento e da soldabilidade do aço AISI 4130, foram realizados vários testes nas amostras. Para verificar a resistência mecânica dos corpos de prova, foram realizados ensaios de dobramento e medições de microdureza. Para analisar a microestrutura, foram realizadas micrografias da seção longitudinal dos tubos (seção transversal ao cordão de solda). Para analisar a extensão da zona termicamente afetada (ZTA), da zona fundida (ZF) e o formato dos cordões de solda, foram realizadas macrografias.

Com a análise dos resultados, foi possível verificar que a realização dos processos de soldagem com pré-aquecimento nos tubos de aço AISI 4130 é relevante, pois as juntas soldadas com pré-aquecimento apresentaram comportamento mecânico mais adequado do que as juntas soldadas sem pré-aquecimento.

2 OBJETIVOS

- Verificar a soldabilidade de tubos sem costura de aço AISI 4130 de diâmetro externo 29,20 mm e diâmetro interno 25,40 mm;

- Analisar a microestrutura de tubos sem costura de aço AISI 4130 soldados pelo processo GTAW com material de deposição;

- Verificar a influência do pré-aquecimento a 200°C na soldabilidade de tubos sem costura de aço AISI 4130.

3 JUSTIFICATIVA

Os processos de soldagem, dentre os processos de fabricação, são um dos mais importantes atualmente na união de materiais metálicos, portanto, é muito relevante que os parâmetros dos processos de soldagem sejam definidos e sejam os mais adequados possíveis para cada aplicação.

Para cada processo de soldagem e cada material utilizado, existem parâmetros diferentes que podem alterar as propriedades da junta soldada. Estes parâmetros influenciam diretamente na qualidade da solda, na durabilidade e no comportamento mecânico do conjunto soldado. Portanto, para definir se a utilização ou não do pré-aquecimento na soldagem de tubos de aço AISI 4130 pelo processo GTAW é mais adequada, foi necessária a realização de um estudo científico, que foi obtido por este trabalho.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Aço como um material

O ferro tem sido utilizado há muitos anos pelo homem, desde, pelo menos 1200 a.C. O ferro pode ser basicamente encontrado na natureza na forma de minério (óxidos). Isto ocorre, porque o potencial de oxidação do ferro é maior do que seu o potencial de redução. Para se utilizar o ferro então como metal, várias técnicas foram descobertas e continuam sendo aprimoradas a fim de se extrair o minério de ferro da natureza e realizar a redução para ferro metálico (COLPAERT, 2008).

Após um tempo, os fabricantes de peças metálicas de ferro começaram a perceber que a adição de carbono ao ferro nos estágios iniciais da produção deste metal poderia provocar efeitos sobre as propriedades mecânicas do material. Foi assim que surgiram as principais ligas de ferro e carbono: os aços e ferro fundido. Outros elementos de liga também podem ser adicionados ao carbono, e cada elemento, e cada proporção de cada elemento, também são responsáveis por alterar as propriedades mecânicas e químicas das ligas de ferro. (COLPAERT, 2008).

O aço é muito importante na área industrial, pois, o seu custo é relativamente baixo e o ferro é um material facilmente encontrado na natureza, sendo suas propriedades mecânicas adequadas para muitas aplicações. Atualmente, além de todas estas vantagens, o aço é um material reciclável, sendo que a sua reciclagem consome pouca energia, portanto, é dito como um material de elevada sustentabilidade. A utilização maior do aço em relação ao ferro fundido se deve ao fato do aço ter uma grande capacidade de deformação plástica, o que confere alta tenacidade ao material e, além disto, facilita o seu processamento (COLPAERT, 2008).

Com a crescente utilização do ferro e suas ligas, tem-se buscado pesquisar novas ligas que ofereçam maior desempenho, e aprimorar as ligas de ferro já existentes. A ferramenta que é altamente utilizada para estudar as ligas metálicas é a metalografia. A metalografia é de um conjunto de técnicas utilizadas para a caracterização do material, para verificar a sua microestrutura em escala micrométrica, ou verificar outros fatores em escala milimétrica.

Atualmente é quase impossível encontrar alguma indústria que produza aço ou ferro fundido que não utilize das ferramentas metalográficas. Os cursos de engenharia de materiais dedicam um bom tempo para estudar as técnicas de metalografia, que é uma ciência que surgiu por volta de 1860 (COLPAERT, 2008).

Com o estudo da metalografia, pode-se perceber que as propriedades mecânicas do material constituem em um aliado entre microestrutura e composição química, onde, a composição química também é responsável pela microestrutura do material. Tratamentos térmicos, deformações plásticas, adição de elementos de liga podem modificar a microestrutura, portanto, podem modificar o desempenho do material (COLPAERT, 2008).

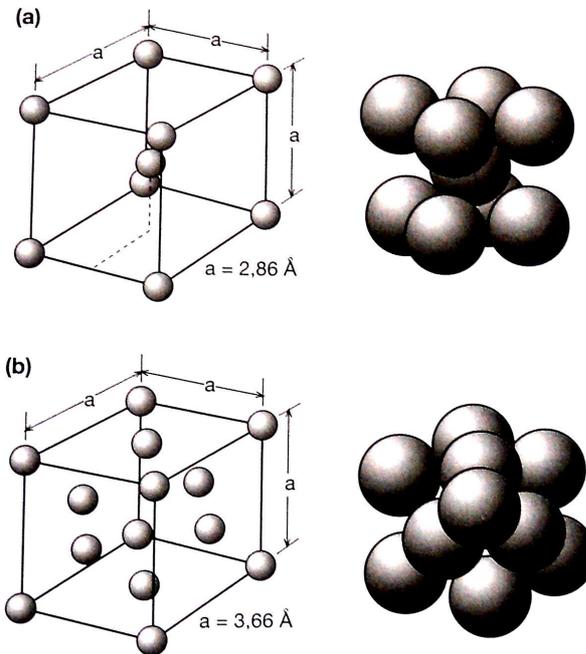
4.1.1 A estrutura cristalina dos aços

Os átomos dos metais possuem a tendência de se organizarem em uma estrutura cristalina. Como é muito difícil obter apenas um único cristal, os materiais metálicos são policristalinos. Um grão é um conjunto de vários cristais com mesma orientação cristalográfica. Devido ao seu tamanho pequeno, um microscópio óptico, operando com aumentos entre 100 e 1000 vezes, é utilizado para examinar o comportamento estrutural associado com os grãos no metal. Estruturas que requerem esta gama de ampliação para sua análise são chamadas de microestruturas. O controle da microestrutura é essencial para obter as propriedades mecânicas requeridas (ABBASCHIAN, R.; ABBASCHIAN, L.; REED HILL, 2009).

A maioria dos metais apresenta, à pressão ambiente, apenas uma organização estrutural (uma única fase) até a temperatura onde ocorre a fusão. As ligas de ferro são bem diferentes disto, à pressão ambiente, a microestrutura de uma mesma amostra pode apresentar várias fases, e estas fases podem mudar de acordo com a temperatura, antes da fusão do metal. Portanto, as ligas de ferro possuem maior complexidade que as outras ligas metálicas, mais uma razão para se ter estudos mais aprofundados sobre seu comportamento microestrutural (COLPAERT, 2008).

O ferro, quando está isento de elementos de liga (inclusive carbono), apresenta organização estrutural cúbica de corpo centrado (CCC) até à temperatura de cerca de 912°C, e esta estrutura é denominada ferrita. Acima desta temperatura até a temperatura de 1394°C, a estrutura que era CCC torna-se cúbica de face centrada (CFC), que é denominada austenita. Acima da temperatura de 1394°C até a temperatura de fusão, que é cerca de 1538°C, a estrutura cristalina volta a ser CCC (COLPAERT, 2008). A Figura 4.1 mostra um desenho esquemático das estruturas CCC e CFC.

Figura 4.1 – Estruturas possíveis para uma liga de ferro



Legenda: (a) Estrutura cúbica de corpo centrado (CCC). O parâmetro de rede do ferro puro, a temperatura ambiente, é de 2,86 Å. (b) Estrutura cúbica de face centrada (CFC). O parâmetro de rede do ferro puro à temperatura de 1200° C é de aproximadamente 3,66 Å.

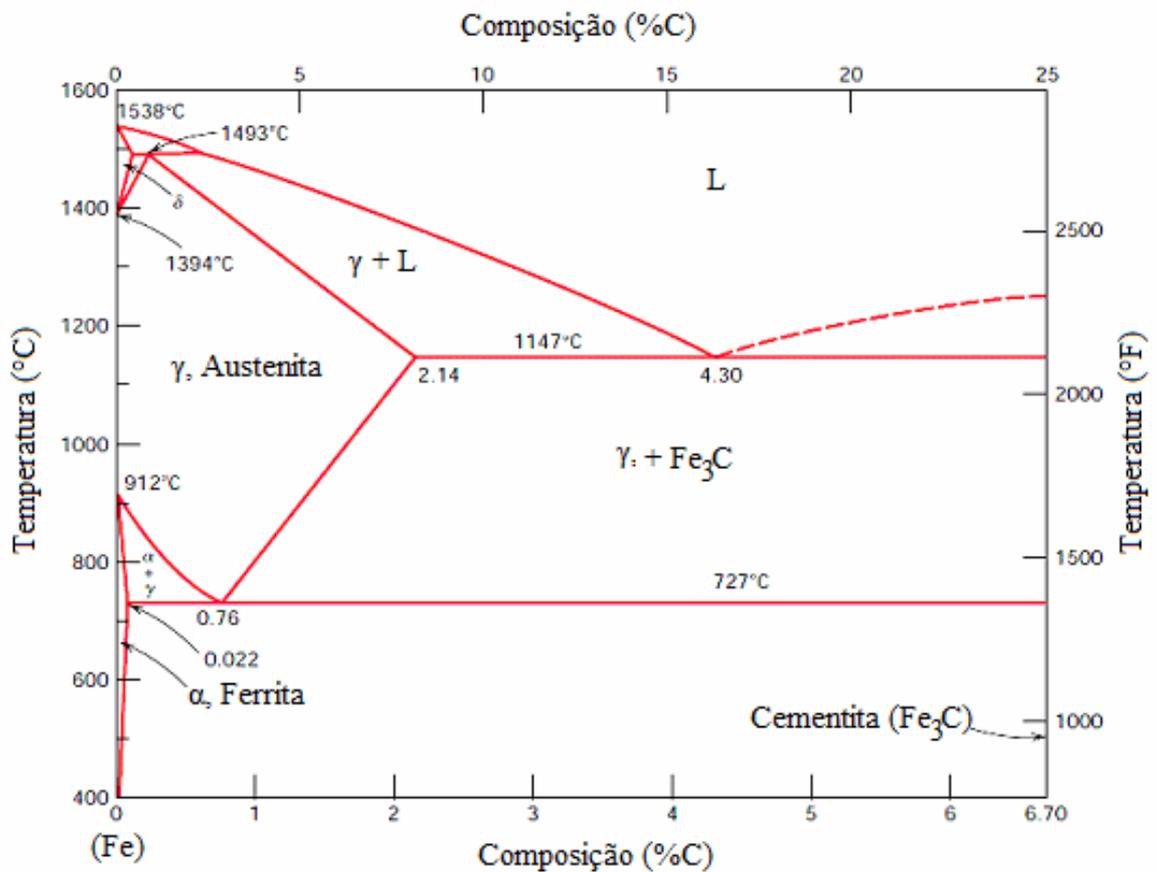
Fonte: COLPAERT, 2008.

O que foi percebido com a adição de carbono, é que as temperaturas de transição de fase e de fusão alteravam significativamente, sendo dependentes da quantidade de carbono presente nas ligas de ferro. Para facilitar a previsão das fases presentes em cada tempo, para cada composição química, foi construído o que é chamado de diagrama de fases ferro carbono. A Figura 4.2

apresenta o diagrama ferro carbono utilizado para ligas de aço carbono e ferro fundido. Com a adição do carbono, além das estruturas ferrita e austenita, o aço pode conter cementita que é o carboneto de ferro, e isto dependerá da quantidade de carbono presente. Lamelas de cementita interpostas a lamelas de ferrita podem originar o constituinte que é denominado perlita. Os ferros fundidos podem apresentar vários outros constituintes em sua microestrutura (ABBASCHIAN, R.; ABBASCHIAN, L.; REED HILL, 2009).

A formação de fases devido às variações de temperaturas prevista pelo diagrama de fases ferro carbono é realizada utilizando-se resfriamento lento. Ao se ter um resfriamento brusco, outras fases podem ser formadas além da ferrita, austenita e cementita, em amostras de aço.

Figura 4.2 – Diagrama de fases ferro carbono



Fonte: CALLISTER, 2001 (adaptado).

Caso outros elementos de liga fossem adicionados às ligas ferrosas, então outro diagrama de fases deveria ser feito, pois, cada elemento de liga, provoca um comportamento de transformação de fase diferente em função da composição. Portanto, os dois fatores essenciais para a utilização do diagrama de fases ferro e carbono para a previsão das fases em uma amostra de aço ou ferro fundido, são: a inexistência de outros elementos de liga (ou então com pequena proporção que não afete a influência do carbono sobre as existências das fases) e se o resfriamento ocorreu de forma lenta.

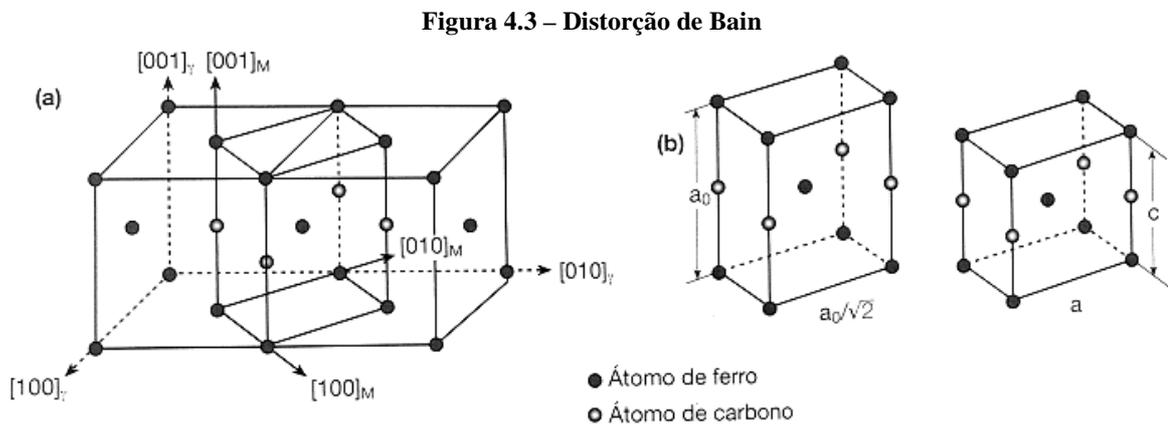
4.1.2 Outras fases e constituintes de um aço – Martensita e Bainita

Quando uma amostra de aço é aquecida ou resfriada entre a temperatura final e inicial, existe uma temperatura de transição de fase, há uma transformação de fases. A formação de fases se dá através da formação de núcleos que vão crescendo até que todos os grãos da amostra tenham modificado sua fase. Se a amostra estiver à temperatura de mudança de fases, não há transformação, pois, as duas fases se encontram em equilíbrio, significa que as fases possuem a mesma quantidade de energia armazenada, uma vez que a força motriz para a mudança de fases é a diminuição da energia livre de Gibbs (COLPAERT, 2008).

As transformações de fases podem ocorrer devido à difusão atômica ou por deformação da rede cristalina. A difusão atômica é quando átomos se movimentam através de todo o material, possibilitando uma reorganização estrutural originando novas microestruturas. Para que a difusão ocorra, não é necessário somente o gradiente de temperatura, mas é um processo que necessita de um tempo para ser realizado (COLPAERT, 2008).

A formação de ferrita, cementita e perlita ocorre devido ao resfriamento de uma amostra em alta temperatura que possui estrutura austenítica. O tempo de resfriamento deve ser suficiente para que o carbono possa realizar difusão e as fases ou constituintes previstos pelo diagrama de fases ferro carbono possam ser formados (COLPAERT, 2008).

Caso uma amostra austenítica passar por um resfriamento brusco, o carbono não terá tempo para se difundir e então outras fases e constituintes podem ser formados. À medida que a temperatura abaixa, os movimentos atômicos ficam cada vez mais restritos, de modo que a difusão atômica é praticamente nula. Em aços, a principal fase formada por uma transformação adifusional, ou também chamada de transformação displaciva, é a martensita. Com o resfriamento, a estrutura austenítica CFC sofre uma distorção onde o parâmetro de rede na direção $[001]$ não é igual aos parâmetros de rede $[010]$ e $[100]$. Portanto, a estrutura da martensita é tetragonal de corpo centrado (TCC) como pode ser visto através da Figura 4.3.



Legenda: (a) Duas células unitárias de austenita (CFC) justapostas e uma célula tetragonal de corpo centrado (TCC) destacada a partir das células CFC (alguns átomos das células CFC foram removidos para facilitar a visualização). (b) Para que a célula TCC se transformasse em CCC seria necessária uma compressão no eixo “vertical” $[001]_m$ e uma expansão dos lados da base $[010]_m$ e $[100]_m$.

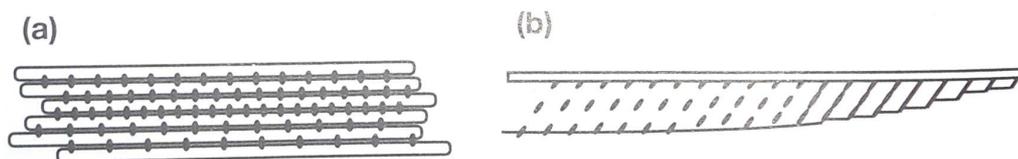
Fonte: COLPAERT, 2008.

Quanto maior for o teor de carbono, maior a possibilidade da formação de martensita no resfriamento, pois, a presença maior de carbono nos interstícios provocará maior dificuldade de mobilidade atômica. Quanto maior o teor de carbono, maior será a dureza do aço quando houver formação de martensita, pois, haverá maior quantidade de martensita, e a martensita formada será mais deformada (maior desproporção entre os parâmetros de rede), isto deve ser levado em consideração, pois a fase martensítica possui dureza maior do que o constituinte perlita, por exemplo (COLPAERT, 2008).

Além da formação da martensita, mecanismos displacivos podem dar origem a outros constituintes no resfriamento. Entre a temperatura de transformação de austenita em perlita e a transformação de austenita em martensita, pode-se ter a formação do constituinte bainita. A bainita utiliza mecanismos difusionais e displacivos, quer dizer que a taxa de resfriamento foi o suficiente para promover a difusão dos átomos, porém, não foi grande o suficiente para permitir total difusão para formação de perlita. A bainita é um constituinte formado por duas fases, ferrita e cementita, e se houver, outros tipos de carbonetos. A bainita é dividida em superior e inferior, a formação de cada uma depende da temperatura final de resfriamento. A sua distinção é muito importante, pois suas propriedades mecânicas são diferentes (COLPAERT, 2008).

A formação da bainita superior ocorre em uma temperatura um pouco abaixo da formação de perlita. A bainita superior é formada de “pacotes” de ferrita paralelos entre si com cristais de carbonetos espalhados entre os contornos de grãos dos cristais de ferrita. A formação da bainita inferior ocorre em temperaturas menores que a formação de bainita superior. A bainita inferior é constituída de placas de ferrita, longas não paralelas com uma microestrutura semelhante com a da martensita, o que faz com que o reconhecimento da bainita inferior seja muito difícil de ser realizado por microscopia ótica (COLPAERT, 2008). A bainita inferior possui carbonetos precipitados dentro da ferrita, e eles formam um ângulo de aproximadamente 60° com o contorno de grão. A Figura 4.4 apresenta um esquema das morfologias da bainita superior e da bainita inferior.

Figura 4.4 – Esquemas das duas morfologias de bainitas mais comuns



Legenda: (a) Bainita superior. (b) Bainita inferior.
Fonte: COLPAERT, 2008.

4.2 Aço AISI 4130

A resistência mecânica e tenacidade dos aços baixa liga é maior do que dos aços carbono, e como sua relação resistência/peso é maior, o peso de carros, caminhões e máquinas pode ser diminuído com a utilização destes tipos de aço. Sua resistência mecânica é atingida após tratamento térmico de têmpera e revenimento. Os aços da família 41XX são muito utilizados na construção de carros, aviões, na indústria de petróleo como perfuradores de poços e possui muitas outras aplicações. São muito aplicados em construções que requerem limite de escoamento e tensão de escoamento entre 410 MPa e 965 MPa.

O número 30 sugere que o aço possui 0,30% de carbono em sua composição química. Apesar da nomenclatura deste aço sugerir uma composição química, a quantidade pode apresentar pequenas variações, tanto para a quantidade de carbono, quanto para a quantidade de outros elementos de liga. A Norma Brasileira (NBR) 87 mostra quais as porcentagens de cada elemento químico são aceitáveis para cada tipo de aço. Para o aço AISI 4130, a composição química requerida deve ser de acordo como a Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Composição química do aço AISI 4130

Composição química (%) requerida para aço AISI 4130						
Carbono	Manganês	Silício	Níquel	Cromo	Molibdênio	Vanádio
0,28 – 0,33	0,40 - 0,60	0,15 - 0,35	-	0,80 - 1,10	0,15 – 0,25	-

Fonte: NBR 87, 2000.

Além destes elementos, os aços ligados podem conter pequenos teores não especificados de outros elementos químicos. Estes elementos podem ser: cobre níquel, enxofre, fósforo, boro e chumbo, e a norma NBR 87 estabelece a quantidade tolerada, pois esses devem ser apenas elementos residuais. Outros valores máximos podem ser especificados pelo cliente ao se pedir a fabricação do aço (NBR 87, 2000).

Os diferentes elementos de liga adicionados ao aço promovem diferentes efeitos em suas propriedades. O cromo aumenta a resistência à corrosão e estabiliza a estrutura cúbica de corpo centrado. A adição de silício relaciona-se com suas propriedades elétricas. A presença do molibdênio pode aumentar a resistência mecânica, inclusive, a sua combinação com o cromo pode fazer com que o aço possa ser utilizado em aplicações de elevadas temperaturas sem perder propriedades de resistência, além disto, aumenta a resistência à corrosão do aço. Já o manganês é utilizado por reagir com o enxofre formando o sulfeto de manganês, evitando com que o enxofre reaja com o ferro. Seu excesso pode reagir com o carbono originando carbetos de manganês, melhorando as propriedades químicas, além disto, o manganês pode evitar a formação de bolhas devido às suas propriedades desoxidantes. O manganês também eleva a resistência mecânica devido a sua alta dureza, porém, torna o aço mais difícil de ser conformado mecanicamente e aumenta a temperabilidade (LIMA, 2006).

4.3 Processo de soldagem

Existem dois métodos de união de materiais, os macroscópicos e os microscópicos. Os métodos macroscópicos consistem na rebiteagem e parafusagem, onde a resistência da união se dá pela resistência ao cisalhamento do rebite ou parafuso. Já os métodos microscópicos, se dão pela aproximação de átomos por interações atômicas ou intermoleculares, e dentro destes processos estão a brasagem, soldagem e colagem (MACHADO, 1996).

A soldagem é o método mais importante na união de materiais metálicos, pode ser utilizada na união de elementos simples, como portões e grades, ou de elementos mais complexos, como pequenos dispositivos eletrônicos. A solda pode ser utilizada até mesmo no artesanato e na confecção de joias (VILLANI; MODENESI; BRACARENSE, 2011).

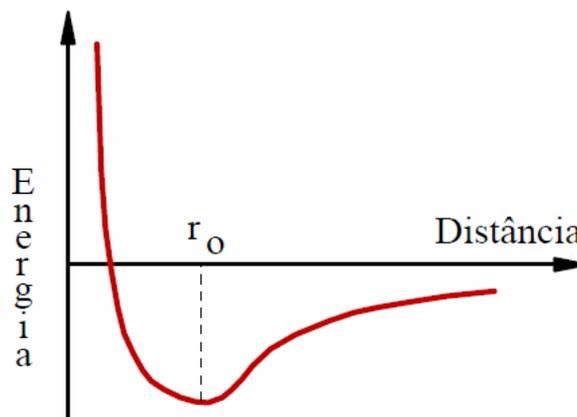
Soldagem é um processo de união de materiais metálicos ou não metálicos, que tem por objetivo estabelecer forças de ligações químicas com natureza similares às forças já existentes no interior do material a ser soldado, na região em que vai se realizar a união (VILLANI; MODENESI; BRACARENSE, 2011).

Para cada solda desejada e material utilizado, existe um processo de soldagem mais adequado, visando sempre a melhor proporção entre custo e benefício. Existem vários processos de soldagem que foram surgindo de acordo com a necessidade de aprimoramento da técnica. Os processos são: soldagem por resistência, soldagem a gás, soldagem a arco elétrico, soldagem por faísca de elétrons, dentre outros (WEMAN, 2012).

4.3.1 A formação da solda microscopicamente

Uma peça metálica é um material constituído de um grande número de átomos com um arranjo espacial que depende do tipo da liga metálica. Os átomos que estão no interior do material estão cercados de vários outros átomos, e eles possuem uma energia mínima armazenada, portanto, a ligação metálica confere estabilidade às configurações. Já os átomos da superfície possuem uma quantidade alta de energia, e ao se aproximarem de outra superfície de material metálico, a uma distância mínima, os átomos podem liberar esta energia armazenada formando a ligação metálica (VILLANI, MODENESI e BRACARENSE, 2011). A energia liberada ao se formar uma ligação química pode ser vista na Figura 4.5. De acordo com esta figura, a distância entre os átomos para que se tenha a ligação metálica é r_0 .

Figura 4.5 – Variação da energia potencial para um sistema composto de dois átomos em função da distância de separação entre eles

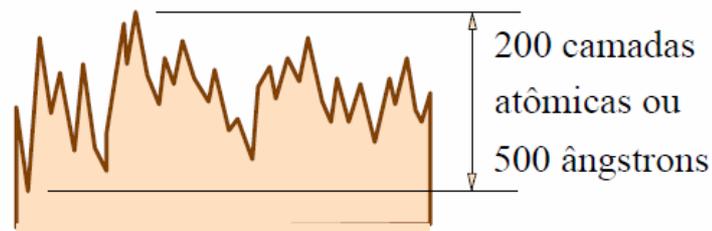


Legenda: r_0 é a distância entre os átomos para que se tenha uma ligação química.

Fonte: CALLISTER, 2001.

A ligação metálica entre duas superfícies feita através de sua aproximação é muito difícil de ocorrer, acontecendo sob condições extremas. Isto porque as superfícies metálicas apresentam alguns obstáculos que torna difícil de atingir a distância mínima necessária para se estabelecer a ligação metálica. Primeiramente, as superfícies metálicas, mesmo as mais polidas, apresentam rugosidade, portanto, apenas em alguns pontos iriam formar ligações, o que não iria conferir resistência à junta. Outro fator, é que as superfícies metálicas possuem camadas de poeira, sujeira, umidade, gordura e etc, e, além disto, possuem camadas de óxidos, que se formam rapidamente, logo que o material é exposto ao ambiente (MACHADO, 1996). A Figura 4.6 mostra um esquema da rugosidade de uma superfície metálica limpa.

Figura 4.6 – Representação esquemática da superfície metálica limpa

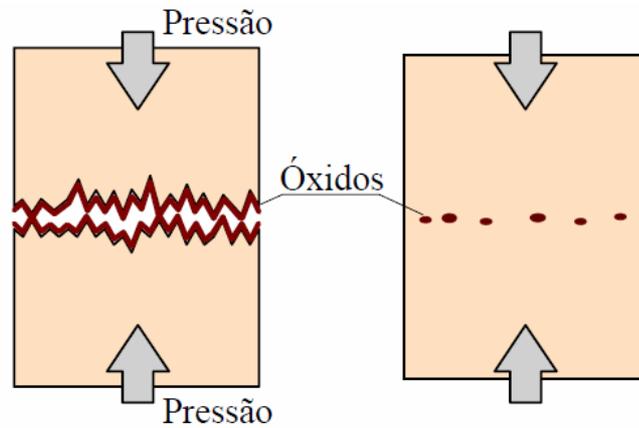


Fonte: MODENESI; VILLANI, 2006.

4.3.2 Soldagem por deformação ou por fusão

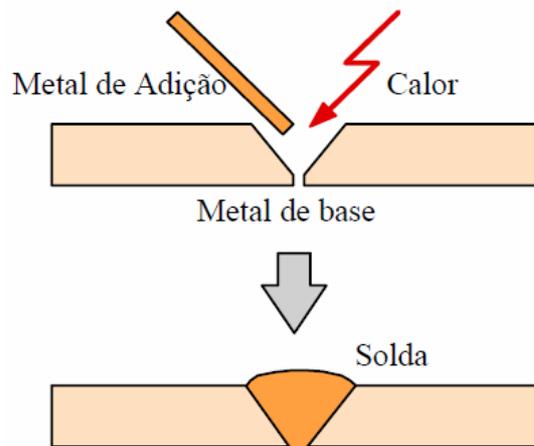
Para realizar a união entre duas peças metálicas, podem ser utilizados dois processos, o processo de soldagem por pressão (ou por deformação) e o processo de soldagem por fusão. No processo de soldagem por deformação, as superfícies de contato são deformadas para que assim exista a aproximação mínima entre os átomos, pode haver aquecimento no local para facilitar a deformação (WEMAN, 2012). No processo de soldagem por fusão, a junta a ser soldada é fundida fazendo com que desapareçam as superfícies entre as peças, e depois solidificada, quando se estabelece a união entre os materiais. A Figura 4.7 apresenta um esquema de como seria uma soldagem por deformação e a Figura 4.8 apresenta um esquema de como seria a soldagem por fusão.

Figura 4.7 – Soldagem por pressão ou deformação



Fonte: MODENESI; VILLANI, 2006.

Figura 4.8 – Representação esquemática da soldagem por fusão



Fonte: MODENESI; VILLANI, 2006.

Os processos de soldagem por pressão (ou deformação) que existem são: a soldagem por resistência (por ponto, costura, por projeção, de ponta à ponta por resistência), soldagem por fricção (por rotação, por atrito de superfície), soldagem de alta frequência, soldagem por ultrassom, soldagem por explosão, soldagem por impulsão magnética, soldagem por pressão a frio e soldagem por difusão. A soldagem por pressão possibilita a união de discos de materiais

diferentes, dentre várias outras aplicações, que seriam difíceis ou impossíveis de serem realizadas pela soldagem por fusão (WEMAN, 2012).

4.3.3 Vantagens e desvantagens do processo de soldagem

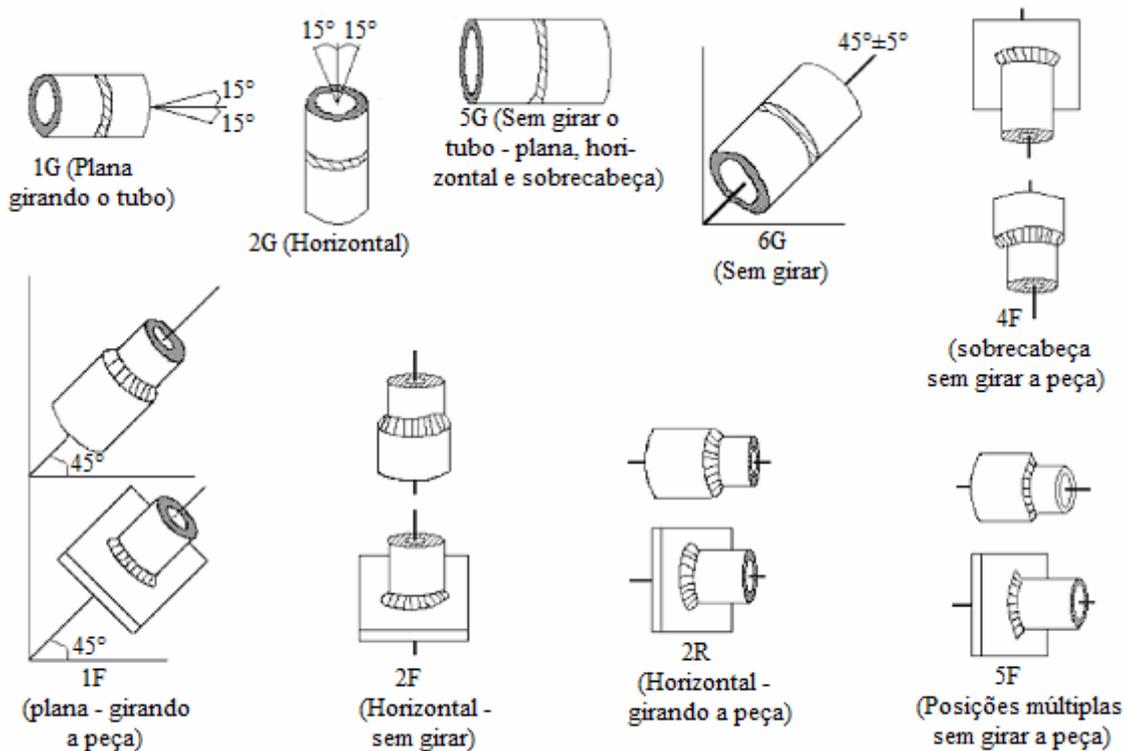
As vantagens do processo de soldagem em relação à fundição, por exemplo, é que uma peça a ser soldada não necessita de uma espessura mínima ou máxima, há a possibilidade de se utilizar materiais diferentes ao longo da peça, e isto pode ser desejado em um projeto, uma vez que cada parte da peça pode estar submetida a condições diferentes, e peças soldadas possuem menor investimento inicial. Em relação às juntas feitas através de parafusos e rebites é que, no caso de peças rebitadas, há uma perda de material para se furar a peça, há uma espessura mínima para haver a união, e deve-se utilizar um parafuso ou rebite, e estes dois fatores aumentam o peso da peça. As juntas soldadas, por si só, podem ser estanques, sem haver a necessidade de artifícios para prevenir vazamentos (VILLANI; MODENESI; BRACARENSE, 2011).

Como desvantagens, praticamente todos os processos de soldagem tem o envolvimento de energia térmica e mecânica na junta, e isto pode modificar os estado de tensões internas, pode aumentar a presença de descontinuidades e trincas, e também pode modificar a microestrutura do material alterando as propriedades no local, tudo isto influenciando negativamente no desempenho da peça soldada. Outra desvantagem, é que uma trinca pode se propagar por todo o material, pois a solda torna a estrutura contínua, e isto pode resultar em falhas catastróficas. A solda não deve ser utilizada em peças que necessitam ser desmontadas, pois a solda torna a estrutura em uma única peça. Mesmo com suas limitações, o processo de soldagem é muito versátil e muito importante nos dias de hoje como processamento de materiais metálicos (VILLANI; MODENESI; BRACARENSE, 2011).

4.3.4 Posições de soldagem

As soldas podem ser feitas em posições variadas. A região onde foi soldada, e a maneira como foi realizada a solda, pode influenciar no desempenho da peça unida. Portanto, a escolha da posição de soldagem deve ser de acordo com o tipo de conjunto a ser unido. A Figura 4.9 apresenta quais são as posições de soldagem podem ser realizadas unindo-se duas partes de tubos ou um seguimento de tubo com uma superfície plana.

Figura 4.9 – Posições de soldagem para tubos convencionadas pela ASME



Fonte: MACHADO, 1996 (adaptado).

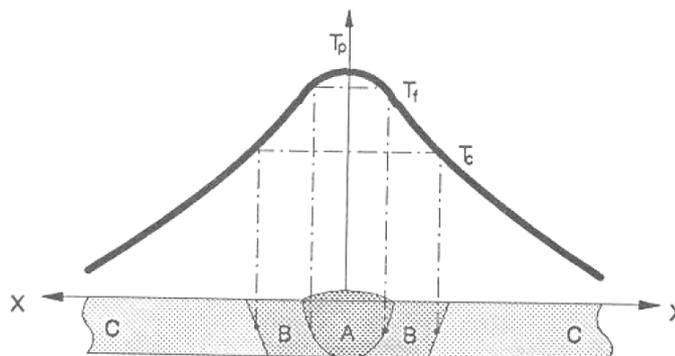
4.3.5 A Zona Termicamente Afetada (ZTA)

A maioria dos processos de soldagem é acompanhada de um aquecimento localizado e/ou de deformação plástica. Resultado disto é a formação de estruturas ou mudanças estruturais que às

vezes não são desejáveis para a junta soldada. A maioria destas transformações depende da solidificação e do resfriamento após o processo de soldagem, portanto, o entendimento destes fenômenos metalúrgicos é muito importante para a realização de uma solda (VILLANI; MODENESI; BRACARENSE, 2011).

A temperatura de pico T_p de cada ponto da peça, após a realização da solda, depende da distância do ponto até o centro do cordão de solda. Quanto mais longe o ponto estiver do centro do cordão de solda, menor será a temperatura. Portanto, consegue-se colocar em gráfico, as temperaturas de pico em função da distância do ponto ao centro do cordão de solda, e esta curva é chamada de repartição térmica, e pode ser vista na Figura 4.10.

Figura 4.10 – Repartição térmica de uma solda



Legenda: Região A é a zona fundida, a região B é a zona termicamente afetada e a região C é o metal base.

Fonte: FORTES, 2004.

A repartição térmica depende do tipo de material base (capacidade de condução térmica), geometria da junta – geometria em forma de T possui mais direções para a condução de calor do que uma junta de topo, portanto, a velocidade de resfriamento em juntas em forma de T será mais rápida –, a espessura da junta – quanto maior a espessura, maior a velocidade de transferência de calor até uma espessura crítica onde a taxa de transferência de calor passa a ser independente da espessura – e a velocidade de resfriamento depende da temperatura inicial da peça a ser soldada, quanto maior a temperatura, mais larga será a curva de repartição térmica (MACHADO, 1996).

A zona termicamente afetada (ZTA) é a região do metal base que não sofreu fusão durante a soldagem, mas que teve suas propriedades mecânicas e arranjos estruturais modificados. Em um ponto muito próximo ao material que sofreu fusão, esta região da ZTA teve um aumento de temperatura muito grande que possibilita a formação de austenita, após a solda, há um resfriamento rápido nesta região e há uma alta possibilidade de formação de martensita em soldagem de aços. Nas regiões da ZTA onde houve uma alta temperatura, há o crescimento de grãos, e em uma região mais distante do centro do cordão de solda, onde houve energia o suficiente para transformações, porém não houve formação de austenita, houve o refino de grãos. Em uma região mais distante ainda, onde a temperatura foi menor, não há alteração do tamanho de grão, porém o calor recebido foi o suficiente para reduzir a dureza da região e eliminar efeitos de encruamento (WEMAN, 2012).

A zona termicamente afetada pode apresentar vários defeitos, entre eles estão: a fissuração por hidrogênio, a decoesão lamelar, trincas de reaquecimento, fissuração por corrosão sob tensão e trincas de liquação ou microfissuração (MACHADO, 1996).

4.3.6 Pré-aquecimento e outros tratamentos térmicos

A maioria dos metais são bons condutores de calor, portanto, após a soldagem, o calor que a região soldada recebeu rapidamente se espalha por toda a massa metálica resultando em um resfriamento rápido. O pré-aquecimento tem a função de diminuir esta taxa de resfriamento. O resfriamento rápido pode gerar microestruturas que são prejudiciais ao aço, pois podem gerar falhas no uso do material, fazendo fragilidade do aço aumentar e sua tenacidade diminuir.

As faixas de temperatura de pré-aquecimento podem ser entre 50°C e 540°C, mas usualmente a faixa de temperatura é entre 150°C e 200°C. Em aços de altos teores de carbono e alta liga, há um grande risco da formação de martensita na zona termicamente afetada. O pré-aquecimento tem o objetivo de diminuir a formação de martensita nestas regiões, preservando uma menor dureza e maior ductilidade na região soldada (FORTES, 2004).

O pré-aquecimento faz com que a temperatura das regiões vizinhas à área soldada seja maior, o que significa que terá um gradiente de temperatura menor. A transferência de calor é diretamente proporcional ao gradiente de temperatura, portanto, quanto menor for o gradiente de temperatura, menor será a taxa de resfriamento.

Em suma, o pré-aquecimento reduz a dureza da zona termicamente afetada, reduz o risco das trincas por hidrogênio e reduz as tensões de contração. A necessidade de pré-aquecimento e sua temperatura dependem do teor de carbono da liga metálica e do teor dos outros elementos de liga, do tamanho e espessura da peça, velocidade de soldagem e diâmetro do consumível (se houver).

Para determinar a temperatura de pré-aquecimento, deve-se conhecer a composição química do material base. Quanto maior for o teor de carbono existente no aço, maior será a temperatura de pré-aquecimento, isto também ocorre para os teores de elementos de liga, porém em uma menor proporção. Um método para se calcular a temperatura de pré-aquecimento é o do carbono equivalente (C_{eq}). Quanto maior for o carbono equivalente, maior será a temperatura de pré-aquecimento. Este método constitui no teor aproximado de elementos de liga e de carbono que produzam a mesma dureza que 1% de carbono, portanto, o C_{eq} pode ser calculado como:

$$C_{eq} = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Ni}{15} + \frac{\%Mo}{4} + \frac{\%Cr}{5} + \frac{Cu}{13} \quad (1)$$

Os valores de carbono equivalente determinado pelo teor de elementos de liga da panela são diferentes do lingote, uma vez que após o lingote estar pronto, pode haver a formação de segregações. Esta fórmula é válida quando os seguintes teores de elementos de liga são respeitados: $\%C < 0,50$; $\%Mn < 1,60$; $\%Ni < 3,50$; $\%Mo < 0,60$; $\%Cr < 1,00$ e $\%Cu < 1,00$.

Outra equação do carbono equivalente que também é muito utilizada foi definida pela IIW (*International Institute of Welding*):

$$C_{eq} = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{5} + \frac{\%Ni + \%Cu}{15} \quad (2)$$

Há muitas maneiras de se calcular a temperatura de pré-aquecimento, as mais usuais são estas equações:

$$C_{eqtotal} = 0,005 \times C_{eq} \times \text{espessura (mm)} \quad (3)$$

$$T(C^\circ) = 350 \times \sqrt{C_{eqtotal} - 0,25} \quad (4)$$

Além do pré-aquecimento, após a solda, pode ser que seja necessário a realização do processo de pós-aquecimento, principalmente para aços com carbono equivalente superior a 45%. Trata-se de manter à mesma temperatura de pré-aquecimento na região soldada após a formação da solda. Para aços de alta liga e grande espessura, o tratamento de pós-aquecimento é desejável, para aços de baixo teor de carbono e baixa liga, apenas o pré-aquecimento pode ser necessário.

Além do pós-aquecimento, a região soldada pode ser submetida a outros tratamentos térmicos como recozimento para alívio de tensões, recozimento pleno, normalização, têmpera e revenimento. Apesar de estes tratamentos serem realizados após a formação da solda, não são chamados de pós-aquecimento, pois os tratamentos são feitos após o resfriamento completo da peça soldada e porque as temperaturas destes tratamentos térmicos são bem superiores às temperaturas de pós-aquecimento (FORTES, 2004).

4.4 Processos de soldagem a arco elétrico

Os processos de soldagem a arco elétrico são os mais utilizados na indústria, pois, podem fornecer altas temperaturas de soldagem e pelo seu custo benefício. Para realizar um processo de soldagem a arco é necessária a utilização de um eletrodo que é conectado a uma fonte de energia elétrica. Quando os elétrons fluem do eletrodo para o metal a ser soldado, ou do metal para o eletrodo, o gás entre os dois materiais se ioniza, permitindo a passagem da corrente elétrica, elevando a temperatura local, possibilitando a soldagem (LÉVESQUE, 2008).

Dentre os processos de soldagem a arco elétrico estão o processo *Shielded Metal Arc Welding* (SMAW), conhecido como soldagem com eletrodo revestido, *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW), que é uma soldagem com gás inerte e com eletrodo de tungstênio (TIG), o processo *Gas Metal Arc Welding* (GMAW), também conhecido por *Metal Inert Gas – Metal Active Gas* (MIG/MAG), onde o eletrodo é também material de deposição, e o processo *Flux-Cored Arc Welding* (FCAW), conhecido como soldagem com arames tubulares (LÉVESQUE, 2008).

4.5 Processo de soldagem GTAW

O processo de soldagem GTAW é uma abreviação de seu nome em inglês que é *Gas Tungsten Arc Welding*. No Brasil, este processo é comumente conhecido como processo de soldagem TIG (*Tungsten Inert Gas*) (VILLANI; MODENESI; BRACARENSE, 2011). Este tipo de soldagem utiliza um eletrodo de tungstênio não consumível que tem como função possibilitar o estabelecimento de um arco elétrico que provocará a fusão dos metais envolvidos, e, pode-se utilizar metal de adição ou não (GUICHARD, 2012). No processo, é utilizada uma fonte de gás inerte que tem como função proteger a poça de fusão contra as contaminações, proteger o eletrodo de tungstênio e possibilitar a existência do arco elétrico pela ionização (KOU, 2003). A soldagem TIG pode ser realizada manualmente, semi automática ou automaticamente, podendo ser realizado em todas as posições de soldagem e em diversas aplicações (LÉVESQUE, 2008).

A soldagem TIG permite um alto controle de energia transferida, e o nível de contaminação é muito baixo, o que possibilita a confecção de cordões de solda praticamente sem respingos e sem necessidade de muita limpeza após sua execução, podendo gerar uma junta soldada de alta qualidade. Praticamente, não ocorrem reações químicas entre o metal e o gás, logo, durante o processo não há geração de fumos, promovendo uma maior visibilidade para o soldador, e isto também melhora a qualidade da solda (LÉVESQUE, 2008).

Os fatores limitantes do processo de soldagem TIG são: alto custo dos equipamentos utilizados e maior tempo de execução se comparado ao processo de soldagem de eletrodo revestido. Por outro lado, a vantagem deste processo é que a soldagem pode ser feita em qualquer posição, geralmente

é feita à mão, mas pode ser mecanizada. O metal de adição pode ser o próprio metal base, para isto, basta cortar pedaços do metal na forma adequada para o processo manual (VILLANI; MODENESI; BRACARENSE, 2011).

Este processo de soldagem é muito adequado para metais de baixa soldabilidade. O fato de não haver necessidade de metal de adição, possibilita soldagem de chapas finas. Os materiais soldados por este processo são, em grande parte, metais não ferrosos e aços inoxidáveis, peças de pequena espessura (1 a 2mm) e passe de raiz na soldagem de tubulações (VILLANI; MODENESI; BRACARENSE, 2011).

Os equipamentos utilizados durante o processo são: tocha de soldagem apropriada, fonte de gás protetor, dispositivo para abertura de arco, cabos e mangueiras e fonte elétrica de corrente constante – podendo fornecer um sinal de corrente contínua, alternada ou pulsada – geralmente, corrente mínima entre 5 a 10A e máximo entre 200 a 500A (VILLANI; MODENESI; BRACARENSE, 2011).

A corrente contínua pode ser de polaridade direta ou inversa. A polaridade direta, ou negativa, os elétrons circulam do eletrodo para a peça, portanto, faz com que o metal a ser soldado receba mais calor, podendo gerar uma maior penetração. Já a polaridade inversa, ou positiva, os elétrons fluem da peça para o eletrodo, fazendo com que o metal a ser soldado receba menos calor, portanto, apresentando uma menor penetração, porém, este tipo de corrente não é muito adequada, pois, o eletrodo recebe muito calor, podendo diminuir drasticamente a sua vida útil. Já a corrente alternada, em um momento os elétrons fluem do metal para o eletrodo, e em outro momento os elétrons fluem do eletrodo para o metal, sendo este processo cíclico, o que faz com que se tenha uma penetração intermediária e não prejudicando tanto a durabilidade do eletrodo (GUICHARD, 2012).

A tocha de soldagem tem função dar suporte ao eletrodo de tungstênio e fornecer o gás de proteção de maneira adequada (GUICHARD, 2012). A tocha pode ser resfriada pelo próprio gás inerte, ou então por um circuito fechado de água pressurizada. A tocha possui uma pinça interna que tem como função segurar o eletrodo de tungstênio e realizar o contato elétrico, e para cada

diâmetro de eletrodo existe um tamanho de pinça. Os bocais direcionam o fluxo de gás inerte, podendo ser de materiais cerâmicos ou metálicos, e também possuem diâmetros variados. O diâmetro do bocal depende da corrente elétrica utilizada durante o processo e da espessura do metal a ser soldado (VILLANI; MODENESI; BRACARENSE, 2011).

O gás inerte utilizado encontra-se em cilindros que possuem reguladores de vazão e pressão. Pode ser utilizado um gás puro, ou uma mistura de gases. A escolha do gás, ou da mistura de gases, depende dos materiais a serem soldados. Os mais utilizados são hélio e argônio. O mínimo de pureza exigida é de 99,99% e a umidade deve ser controlada. A vantagem de se utilizar o hélio é que o gás promove uma maior penetração na soldagem, apresenta uma maior facilidade de abrir o arco elétrico e permite maiores velocidades de soldagem. Já quando se utiliza argônio, o arco elétrico possui maior estabilidade, há um menor consumo de gás, apresenta menores tensões de arco e possui um menor custo (KOU, 2003). Para soldar aço inoxidável, pode-se utilizar hidrogênio, e nitrogênio para soldar cobre e suas ligas (VILLANI; MODENESI; BRACARENSE, 2011).

Os elementos consumíveis do processo são o gás de proteção e o metal de adição. Em geral, o metal de adição se assemelha ao metal base (GUICHARD, 2012). O diâmetro da vareta depende da espessura da peça a se soldar. Em soldagem manual, o metal de adição é fornecido em formato de varetas de comprimento de 1m. Em soldagem mecanizada é fornecido em fio enrolado em bobina com diferentes capacidades, com diâmetros padronizados variando entre 0,5 e 5mm (VILLANI; MODENESI; BRACARENSE, 2011).

O eletrodo de tungstênio utilizado é dito não consumível, uma vez que ele não será utilizado como metal de deposição, mas sofre desgaste, portanto, deve ser trocado sempre que necessário. O tungstênio é utilizado como eletrodo não consumível, pois pode apresentar temperatura de fusão de até 3400°C, que é superior às temperaturas presentes durante os processos de soldagem (GUICHARD, 2012). A condução elétrica do eletrodo depende de sua composição química, do seu diâmetro e do tipo de corrente de soldagem. Eletrodos puros possuem menor custo e geralmente são utilizados para corrente alternada. Eletrodos com adição de óxidos apresentam maior estabilidade do arco elétrico e possuem maior durabilidade (VILLANI; MODENESI;

BRACARENSE, 2011). A Tabela 4.2 mostra a composição química para eletrodos de tungstênio ou para ligas de tungstênio. A escolha do eletrodo depende essencialmente do material a ser soldado e da intensidade de energia necessária para fundir o material (uma vez que a condução elétrica depende do diâmetro do eletrodo) (GUICHARD, 2012).

Tabela 4.2 – Composição química para eletrodos de tungstênio

Classificação AWS	Porcentagem em peso dos elementos e óxidos presentes em eletrodos de W					
	W min. (*)	CeO ₂	La ₂ O ₃	ThO ₂	ZrO ₂	Total de outros Elementos ou Óxidos
EWP	99,5	-	-	-	-	0,5
EWCe-2	97,3	1,8 – 2,2	-	-	-	0,5
EWLa-1	98,3	-	0,9 – 1,2	-	-	0,5
EWTh-1	98,3	-	-	0,8 – 1,2	-	0,5
EWTh-2	97,3	-	-	1,7 – 2,2	-	0,5
EWZr-1	99,1	-	-	-	0,15 – 0,4	0,5
EWG	94,5	Não especificado				

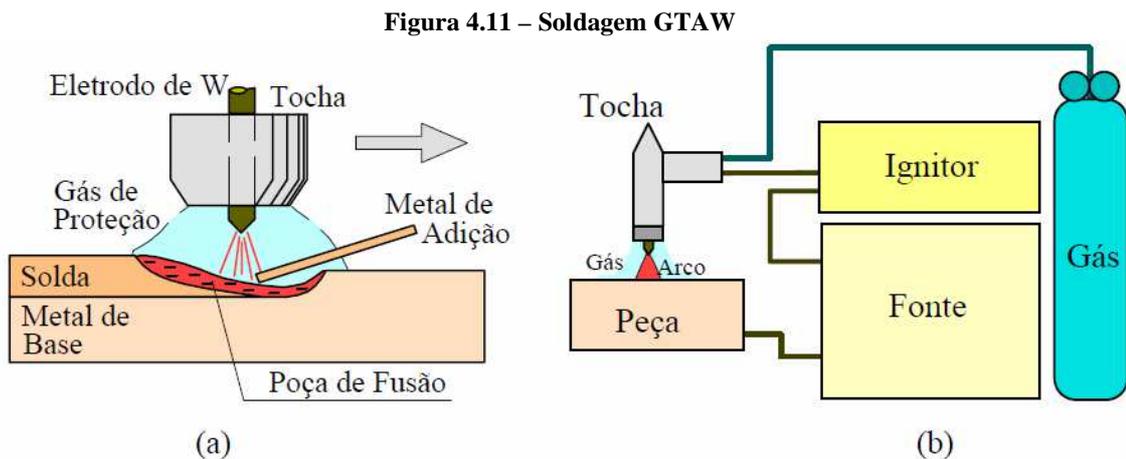
(*) Conteúdo de Tungstênio deve ser determinado pela diferença de todos óxidos especificados e outros óxidos e elementos de um total de 100%.

Fonte: AWS, 1992.

4.5.1 Técnica operacional

O processo de soldagem começa na preparação das peças. Remove-se o óleo, graxa, sujeira, tinta, ferrugem ou qualquer empecilho superficial. Isto pode ser feito a partir de meios mecânicos (lixamento, escovamento), ou químicos (decapagem, lavagem). Estando a peça preparada, é feita a pré-purga, onde, deixa-se o gás vazar por alguns segundos antes da abertura do arco. Uma das maneiras de se iniciar esta abertura é utilizando-se um ignitor de alta frequência. A tocha deve ficar parada por certo tempo até que haja a formação da poça de fusão. Estando a poça com um

tamanho adequado, realiza-se o movimento de translação e se necessário de tecimento e adição de metal. Nos processos automáticos, a tocha deve permanecer perpendicular ao plano do metal a ser soldado, em processos manuais, pode haver uma pequena inclinação a fim de facilitar a visualização do soldador. A adição de metal é realizada na poça de fusão à frente da tocha com um ângulo de 15° com a peça, pode ser intermitente ou contínua. Após a realização da solda, para desligar o arco, utiliza-se um dispositivo que abre o circuito interrompendo a passagem de corrente elétrica. Caso não tenha o dispositivo, o arco pode ser desfeito afastando-se a tocha da peça, porém isto não é recomendado devido às contaminações. Deixa-se um tempo de pós-purga, onde o gás ainda fica aberto por aproximadamente 30s (VILLANI; MODENESI; BRACARENSE, 2011). A Figura 4.11 mostra um esquema da soldagem GTAW.



Legenda: (a) Detalhe da região do arco, (b) montagem usual.

Fonte: MODENESI e VILLANI, 2006.

As variáveis do processo TIG são: o comprimento do arco, a corrente utilizada (valor, sinal e polaridade), a velocidade de soldagem e a vazão do gás inerte. A Tabela 4.3 mostra quais são os valores de correntes utilizadas no processo, em função dos diâmetros do bocal e do eletrodo de tungstênio.

Tabela 4.3 – Faixas de correntes e bocais para a soldagem GTAW

Diâmetro do Eletrodo (mm)	Diâmetro do Bocal (mm)	Corrente de Soldagem (A)			
		CC – (a/b)	CC+ (a/b)	CA (a)	CA (b)
0,5	6,4	5-20	--	5-20	5-15
1,0	6,4	15-80	--	15-80	10-60
1,6	9,5	70-150	10-20	70-150	50-100
2,4	9,5	150-250	15-30	140-235	100-160
3,2	12,5	250-400	25-40	225-325	150-210
4,0	12,5	400-500	40-55	300-400	200-275
4,8	16,0	500-750	55-80	400-500	250-350
6,4	19,0	750-1000	80-125	500-630	325-450

Eletrodos: (a) EWTh-2 (W-2%ThO₂) (b) EWP (Tungstênio puro)

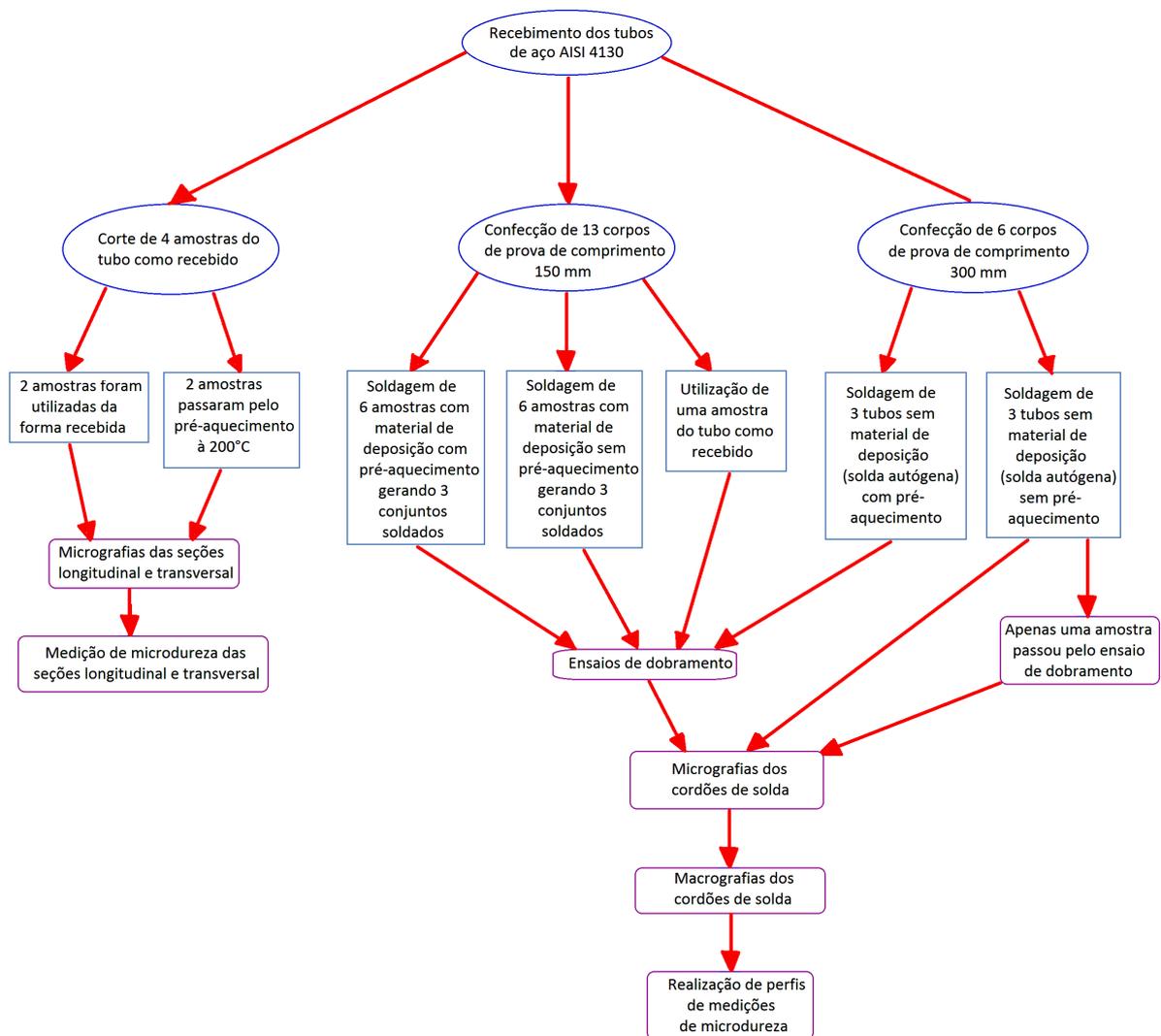
Fonte: MODENESIE; VILLANI, 2006.

Geralmente, percebe-se que para um mesmo valor de corrente e para uma mesma vazão de gás, a tensão do arco aumenta com o aumento do arco. Quanto maior o comprimento do arco, mais raso e largo é o cordão de solda. Quanto maior a corrente, maior a penetração e a largura do cordão. A geometria do cordão de solda depende da corrente elétrica utilizada. A penetração da largura do cordão tende a diminuir com o aumento da velocidade de soldagem. Já uma vazão baixa de gás pode gerar oxidação e porosidade no cordão de solda. Por outro lado, uma vazão alta de gás pode causar turbulência e isto pode gerar um efeito semelhante à vazão baixa. Para evitar estes problemas relacionados à vazão de gases, deve-se realizar um teste; colocar uma vazão alta, a princípio, e ir diminuindo gradativamente até que haja uma pequena oxidação superficial, uma vez que a vazão adequada é aquela ligeiramente superior a esta vazão (VILLANI; MODENESIE; BRACARENSE, 2011). Portanto, os parâmetros do processo devem ser bem controlados a fim de serem adequados para a realização de uma solda requerida.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

A Figura 5.1 contém um fluxograma dos procedimentos realizados nas amostras de aço AISI 4130, mostrando uma visão geral da parte experimental deste trabalho.

Figura 5.1 – Fluxograma com os procedimentos realizados em amostras de tubos de aço AISI 4130



Fonte: Produzido pelos autores.

5.1 Materiais utilizados

Neste trabalho foram utilizados tubos de aço AISI 4130, laminados, sem costura e com diâmetro externo de 29,20mm, diâmetro interno de 25,40mm, comprimento de 1m e espessura da parede de 1,9mm. A Tabela 5.1 mostra a composição química do material especificada pelo seu fornecedor.

Tabela 5.1 – Composição química de tubos de aço AISI 4130

Composição química (%) em massa								
	C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo	Ni
Mínimo	0,28	0,40	0,000	0,000	0,15	0,80	0,15	-
Máximo	0,33	0,60	0,030	0,040	0,35	1,10	0,25	-

Fonte: Produzido pelos autores.

O material de deposição utilizado durante a soldagem é de aço, referência ER70S-3. Este consumível é muito utilizado na soldagem de aços carbono com elementos de liga, podendo produzir soldas sem porosidade e de excelente qualidade, podendo apresentar alta eficiência na deposição, deixando pequena quantidade de escória e alta penetração, e foi por isto que o aço de referência ER70S-3 foi escolhido. O material de deposição foi fornecido em forma de varetas de 1,6mm de espessura e 1m de comprimento. As varetas tinham revestimento de cobre utilizado para evitar sua oxidação. A Tabela 5.2 mostra a composição química deste material.

Tabela 5.2 – Composição química do material de deposição de aço, referência ER70S-3

Composição química (%) em massa									
C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Cu
0,06-0,15	0,90-1,40	0,45-0,75	0,025	0,035	0,15	0,15	0,15	0,03	0,50

Fonte: Produzido pelos autores.

5.2 Métodos

5.2.1 Confeção dos corpos de prova

Foram confeccionados corpos de prova de 150mm e 300mm de comprimento, sem chanfro, produzidos de acordo com a Figura 5.2. A Tabela 5.3 mostra as quantidades de corpos de prova utilizados e os procedimentos de soldagem pelo qual eles foram submetidos.

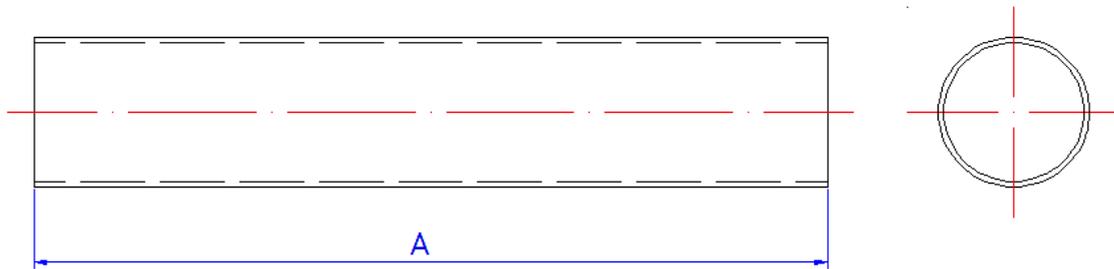
Tabela 5.3 – Quantidades de corpos de prova confeccionados e procedimentos de soldagem realizados em tubos de aço AISI 4130

Quantidade de corpos de prova confeccionados para cada comprimento	Procedimentos pelos quais os corpos de prova foram destinados		
13 corpos de prova de 150mm de comprimento	6 corpos de prova foram soldados com pré-aquecimento à 200°C, gerando 3 conjuntos soldados	6 corpos de prova foram soldados sem pré-aquecimento, gerando 3 conjuntos soldados	1 corpo de prova foi utilizado como recebido
6 corpos de prova de 300mm de comprimento	3 corpos de prova passaram pela soldagem autógena com pré-aquecimento à 200°C	3 corpos de prova passaram pela soldagem autógena sem pré-aquecimento	

Fonte: Produzido pelos autores.

O chanfro é utilizado para permitir uma deposição adequada de material na junta soldada. Porém, neste caso não foi necessário, uma vez que a espessura da parede dos tubos é de apenas 1,9mm.

Figura 5.2 – Desenho dos corpos de prova confeccionados a partir de tubos de aço AISI 4130

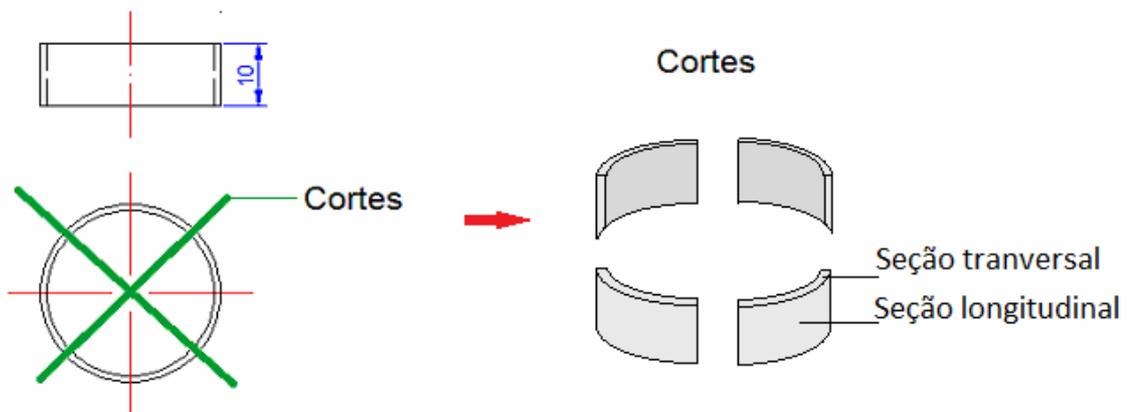


Legenda: a letra A representa o comprimento do corpo de prova.

Fonte: Produzido pelos autores.

Além dos corpos de prova mencionados, também foram confeccionadas quatro amostras de tubo de acordo com a Figura 5.3.

Figura 5.3 – Cortes realizados em tubo de aço AISI 4130



Fonte: Produzido pelos autores.

Dos quatro cortes produzidos de acordo com a Figura 5.3, dois foram utilizados para a realização de micrografias das seções longitudinal e transversal do material. Os outros dois cortes passaram pelo aquecimento à temperatura de 200°C, durante 20min e resfriamento ao ar e também passaram pela análise micrográfica das seções longitudinal e transversal.

5.2.2 Soldagem dos tubos

O tipo de junta realizada em todas as amostras foi de topo. Foi utilizada corrente contínua com polaridade direta (CC-) de 60 A, onde o eletrodo de tungstênio foi conectado ao polo negativo para que houvesse maior penetração na soldagem e menor desgaste do eletrodo. O gás de proteção utilizado foi o argônio com vazão de 15 l/min. A fonte de energia utilizada é da marca IMC MTE DIGITEC modelo 460/600, evidenciado pela Figura 5.4. O afastamento utilizado entre os tubos foi de 1,6mm, que corresponde ao mesmo diâmetro do material de deposição. Esta distância foi selecionada, porque possibilitaria a deposição da quantidade suficiente de material de deposição, sem apresentar excesso de material, e sem produzir regiões com falta de fusão.

O pré-aquecimento ocorreu à temperatura de 200°C e foi realizado a fim de diminuir a velocidade de resfriamento do conjunto após a soldagem. Um resfriamento mais lento permite que os átomos tenham maior tempo para se movimentarem na rede cristalina, diminuindo o surgimento de fases e/ou constituintes formados por mecanismos displacivos.

Figura 5.4 – Equipamento utilizado para fornecer a corrente elétrica na soldagem GTAW

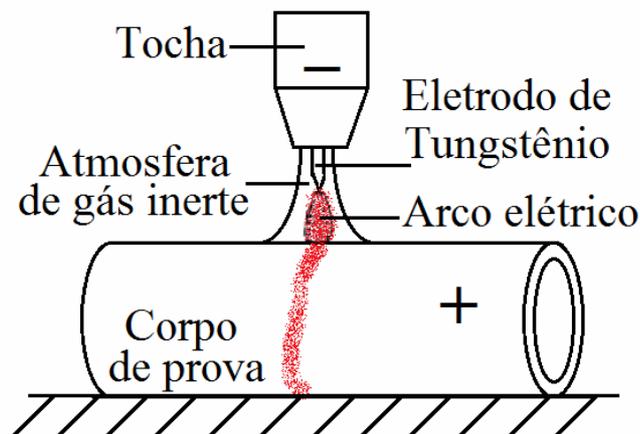


Fonte: Produzido pelos autores.

5.2.3 Solda autógena

A utilização de material de deposição durante a soldagem pode gerar uma junta com defeitos, pois sua qualidade depende da habilidade do operador. Portanto, a fim de se simular a soldagem autógena, utilizou-se o seguinte procedimento: em um corpo de prova, percorria-se circunferencialmente o tubo com a tocha (arco elétrico) com a manutenção da poça de fusão, assim como mostra a Figura 5.5. Este procedimento foi realizado a fim de se eliminar a influência do soldador na confecção de corpos de prova de aço AISI 4130 soldados pelo processo TIG. Os parâmetros de soldagem e os equipamentos necessários foram os mesmos utilizados na soldagem GTAW com material de deposição.

Figura 5.5 – Esquema de soldagem autógena TIG realizada em tubos de aço AISI 4130



Fonte: Produzido pelos autores.

5.2.4 Ensaio de dobramento

O ensaio de dobramento é muito utilizado na caracterização de materiais que contêm soldas. Além disto, os tubos poderão estar bastante susceptíveis a esforços de flexão (perpendiculares) durante o seu uso, assim como é realizado no ensaio de dobramento. Portanto, este tipo de ensaio está bastante adequado para se realizar uma análise qualitativa das soldas neste caso.

Para a realização dos ensaios de dobramento, foram utilizados 3 corpos de prova soldados com pré-aquecimento, 3 corpos de prova soldados sem pré-aquecimento, 1 corpo de prova com solda autógena sem pré-aquecimento, 3 corpos de prova com solda autógena com pré-aquecimento e 1 corpo de prova como recebido. Os corpos de prova foram ensaiados em uma máquina universal da marca VEB Werkstoffprüfmaschinen Leipzig que pode ser vista na Figura 5.6.

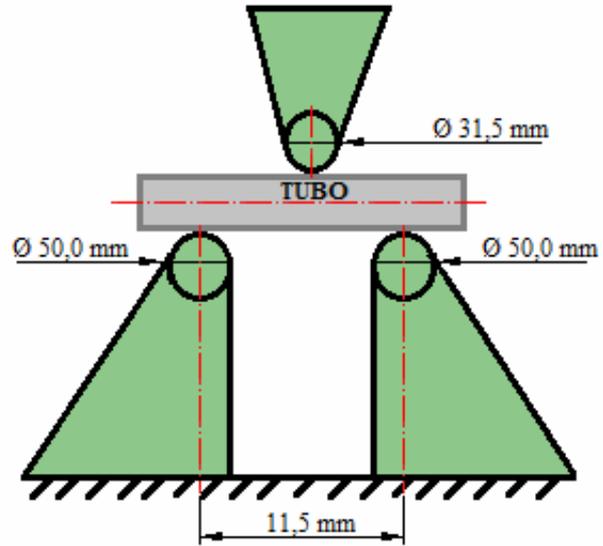
Figura 5.6 – Máquina utilizada para realizar ensaio de dobramento



Fonte: Produzido pelos autores.

Para a realização do ensaio de dobramento, as amostras foram montadas na máquina de acordo com as Figuras 5.7 e 5.8, onde os corpos de prova eram sustentados por dois apoios, e um cutelo foi o responsável pela aplicação de uma força perpendicular ao eixo longitudinal dos tubos. A severidade do ensaio foi determinada pela distância em que o cutelo se movimentou, e que em todos os casos foi de 70mm.

Figura 5.7 – Esquema de ensaio de dobramento realizado em tubos



Fonte: Produzido pelos autores.

Figura 5.8 – Ensaio de dobramento realizado em amostra de aço AISI 4130

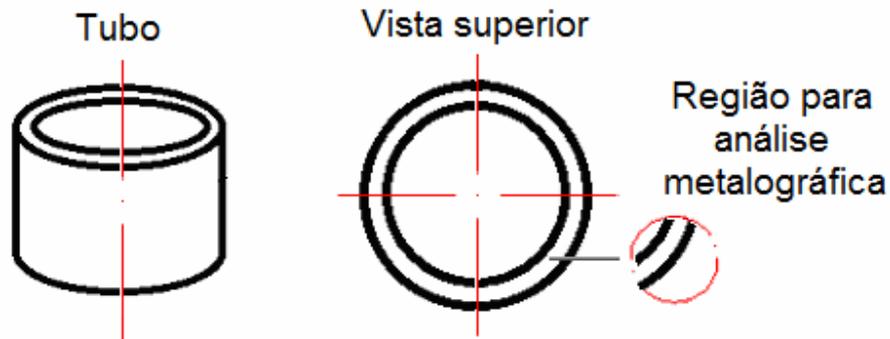


Fonte: Produzido pelos autores

5.2.5 Micrografias

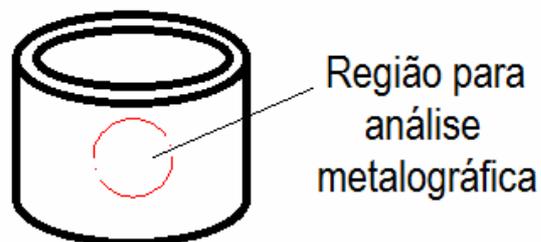
Os quatro cortes do tubo como recebido e do tubo como recebido e aquecido à 200°C foram utilizados para a realização de análises micrográficas das seções transversal e longitudinal, como pode ser observado nas Figuras 5.9 e 5.10, respectivamente. Estes ensaios foram realizados para identificar a microestrutura do material como recebido e possíveis alterações microestruturais devido ao pré-aquecimento.

Figura 5.9 – Região do tubo AISI 4130 para realização de ensaio metalográfico da seção transversal



Fonte: Produzido pelos autores.

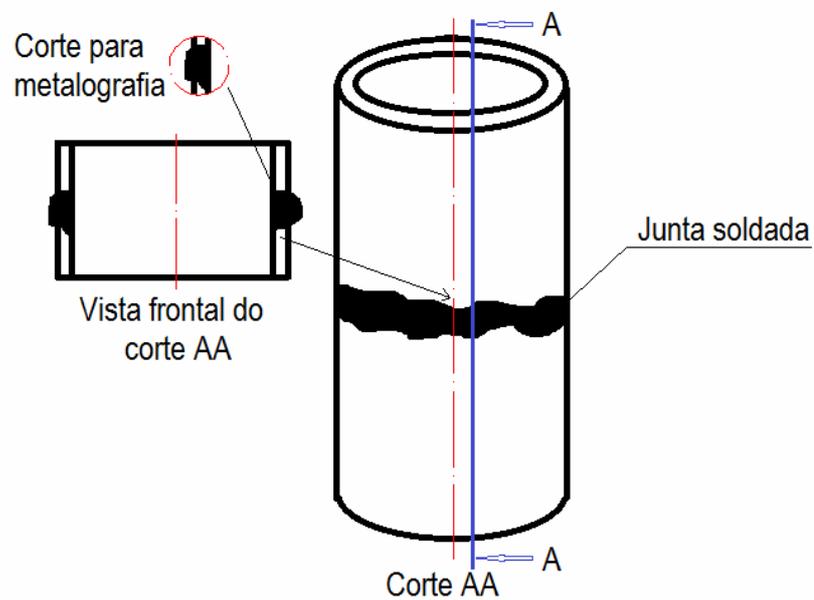
Figura 5.10 – Região do tubo para análise metalográfica da seção longitudinal



Fonte: Produzido pelos autores.

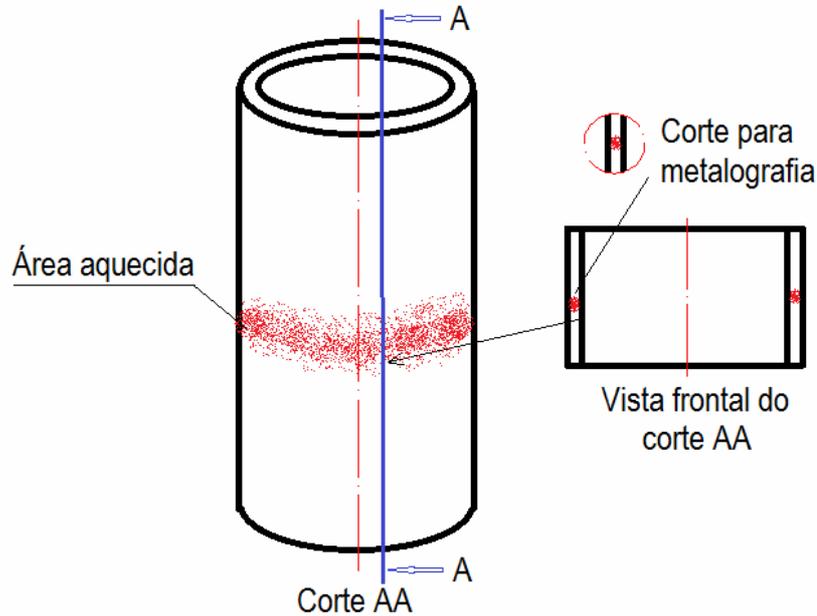
Foram realizadas micrografias em todos os corpos de prova soldados, com ou sem pré-aquecimento, assim como os que foram submetidos à simulação de soldagem autógena. As amostras foram retiradas na região do cordão de solda, como pode ser observado nas Figuras 5.11 e 5.12.

Figura 5.11 – Representação da região utilizada para realização de ensaios metalográficos em tubos soldados pelo processo GTAW



Fonte: Produzido pelos autores.

Figura 5.12 – Representação da seção utilizada para realizar ensaios metalográficos em tubos submetidos à simulação de soldagem autóloga



Fonte: Produzido pelos autores.

As amostras submetidas à metalografia foram embutidas em acrílico autopolimerizante para conferir maior firmeza e facilidade no manuseio. O preparo da superfície iniciou com o lixamento de todas as amostras seguindo a sequência de lixas de carboneto de silício (SiC): 240mesh, 320mesh, 400mesh e 600mesh. Foi utilizada água para resfriamento e lubrificação durante os processos de lixamento, e após terminar em cada lixa, as amostras foram lavadas com água, álcool e foram secadas com um leve ar quente. Entre uma lixa e outra, as amostras foram rotacionadas 90°, a fim de fazer com que a direção de lixamento fosse sempre perpendicular aos riscos deixados pela lixa da operação anterior.

Após a utilização das lixas, as amostras foram polidas em um disco giratório de feltro com a leve aplicação de um abrasivo, que, neste caso, foi pasta de diamante. O primeiro polimento foi realizado em um pano com pasta de diamante de diâmetro de 9 μ m, e o segundo polimento foi realizado em um pano com pasta de diamante com diâmetro de 3 μ m. Álcool foi utilizado para lubrificar e refrigerar as amostras durante os processos de polimento. Após terminar o procedimento em cada pano de polimento, as amostras foram lavadas com água, álcool e secadas.

Após o polimento da superfície, as amostras foram atacadas quimicamente. Foi utilizada uma solução de Nital 3% e a superfície da amostra foi submergida na solução por um tempo aproximado de 1s. Após a superfície do material se tornar fosca devido ao ataque químico, a peça foi lavada com água, álcool e foi seca com secador. As amostras foram observadas com a utilização de um microscópio óptico da marca FORTEL, mostrado na Figura 5.13, contendo sistema de digitalização acoplado ao computador, e então as micrografias foram realizadas. O microscópio utilizado possui lentes que possibilitam aumentos de: 100x, 200x, 400x e 800x, porém, neste trabalho, as micrografias foram realizadas com aumentos de 200x e 400x.

Figura 5.13 – Microscópio óptico utilizado para se realizar micrografias



Fonte: Produzido pelos autores.

5.2.6 Macrografias

Após a realização das análises micrografias das 12 amostras dos tubos soldados e da amostra do tubo como recebido, foram realizadas as macrografias. A escolha da superfície a ser analisada é muito importante para o ensaio macrográfico. Neste caso, a superfície analisada foi transversal ao cordão de solda, pois isto permitiu visualizar a linha de fusão, a extensão e formato da ZTA e a homogeneidade do metal base e da zona fundida. Ao escolher a região, o procedimento posterior foi o preparo da superfície. Como as amostras já haviam sido preparadas para análises micrográficas, a superfície necessitou apenas de passar por uma lixa de 400mesh.

Ao fim do procedimento com a lixa, as amostras estavam prontas para serem atacadas quimicamente. O ataque químico é realizado a fim de se modificar a tonalidade superficial, sendo que cada macroestrutura apresenta uma sensibilidade diferente ao ataque, e isto é o que permite distinguir as diferentes macroestruturas e analisá-las. O reagente utilizado foi Nital 5%, e as peças foram submergidas na solução por um tempo de 15s. Após, foram lavadas com água, álcool e secas com secador. O registro do ensaio foi realizado por meio de fotografias das superfícies ensaiadas com uma máquina fotográfica de 12MPixels da marca Nikon, modelo COOLPIX L22, onde sua lente distou 20cm das superfícies analisadas.

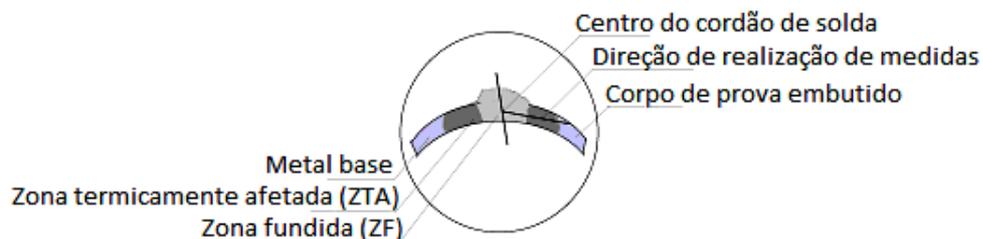
5.2.7 Ensaio de medição de microdureza Vickers

Os dois cortes das seções transversal e longitudinal do tubo como recebido tiveram três medidas de microdureza em regiões diferentes da superfície, assim como os outros dois cortes das seções transversal e longitudinal do tubo pré-aquecido a 200°C. Estas medidas de microdureza foram realizadas a fim de verificar se a resistência mecânica das seções longitudinais e transversais possuíam diferenças, e para verificar se o pré-aquecimento a 200°C é capaz de modificar as propriedades mecânicas do aço AISI 4130.

Os outros 13 corpos de prova que passaram pela análise macrográfica tiveram 25 medidas de microdureza sendo que o espaçamento de uma medida para a outra foi de 0,3mm. A primeira

medida foi realizada no centro da zona fundida. O esquema da realização do perfil de medição de microdureza pode ser visualizado na Figura 5.14.

Figura 5.14 – Esquema da região de corpo de prova embutido para realização de medidas de micro dureza



Fonte: Produzido pelos autores.

O equipamento utilizado para a realização dos ensaios de microdureza é da marca SHIMADZU, modelo 2T e pode ser visto na Figura 5.15. Para realizar o ensaio de medição de microdureza, a amostra foi colocada no equipamento, a seguir, a região a ser penetrada foi escolhida com o auxílio de lentes de aumento de 100x e 400x. Ao determinar a região, um penetrador de diamante de formato piramidal de base quadrada com ângulo de diedro de 136° foi pressionado contra a superfície do material com uma carga de 300gf durante 15s, para todas as amostras. Após a remoção do penetrador, o material apresentou uma depressão causada pela deformação plástica promovida pela tensão recebida. Em duas dimensões, a impressão possui formato de losango. Foram medidas as diagonais do losango para se calcular o valor da microdureza em Vickers (HV). O esquema da impressão deixada no material pode ser visto na Figura 5.16.

Figura 5.15 – Equipamento para realização de medição de microdureza



Fonte: Produzido pelos autores.

Figura 5.16 – Esquema da impressão deixada no material após ensaio de microdureza



Fonte: Produzido pelos autores.

O equipamento é capaz de calcular o valor da microdureza automaticamente após o operador realizar as medições das duas diagonais, que são feitas com o auxílio do próprio aparelho. Para calcular a valor da microdureza, o *software* presente no equipamento utiliza os valores das duas diagonais medidas, e os insere na equação 5. Após, o resultado da equação 5 é inserido na equação 6 e então o valor da microdureza é fornecido.

$$d = \frac{d_h + d_v}{2} \quad (5)$$

$$HV = \frac{F}{A} = \frac{2.F.\text{sen}(136^\circ)}{d^2} \quad (6)$$

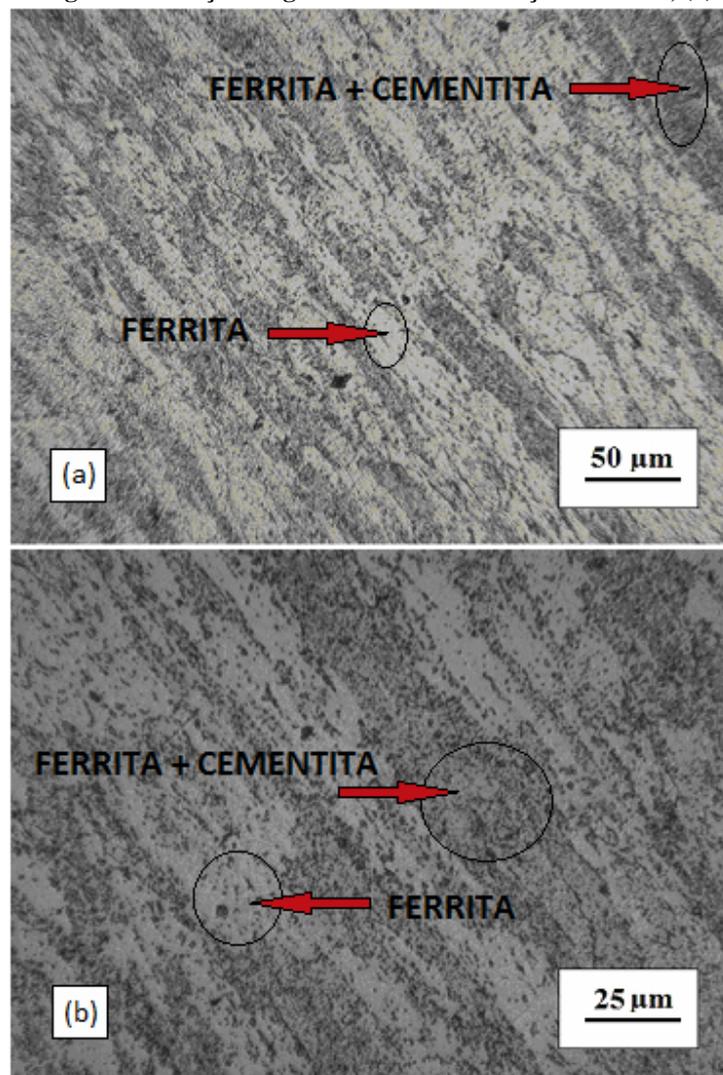
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Tubo como recebido e aquecido à 200°C

6.1.1 Micrografias

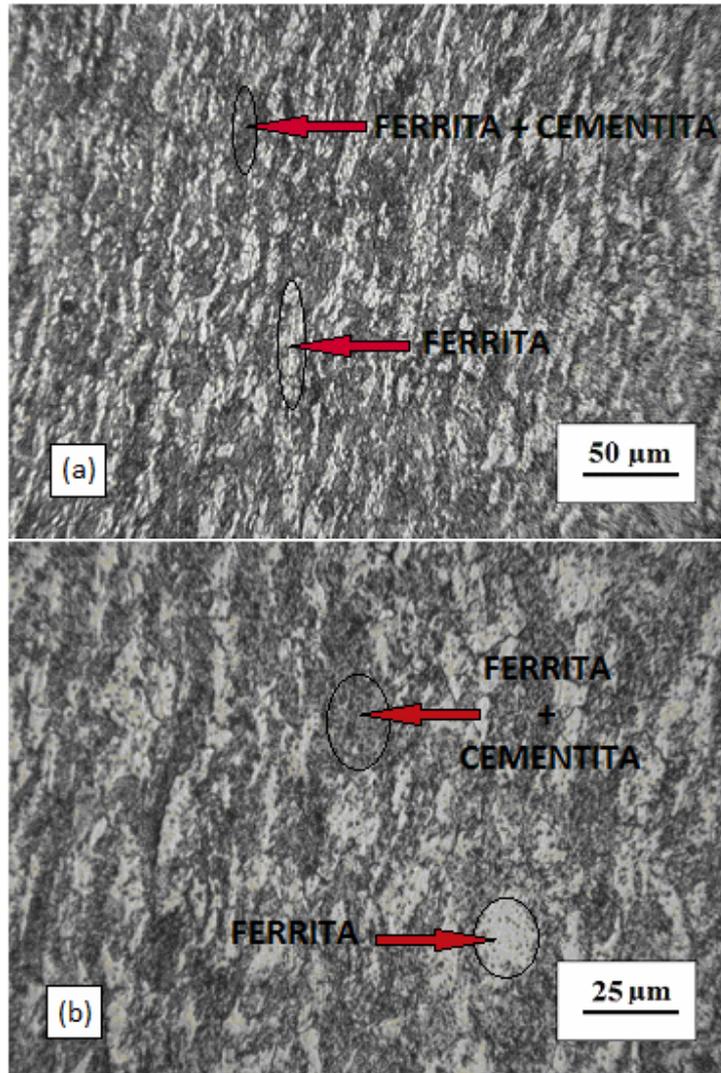
As micrografias das seções longitudinal e transversal do tubo como recebido podem ser observadas nas Figuras 6.1 e 6.2.

Figura 6.1 – Micrografias da seção longitudinal do tubo de aço AISI 4130, (a) 200x e (b) 400x



Fonte: Produzido pelos autores.

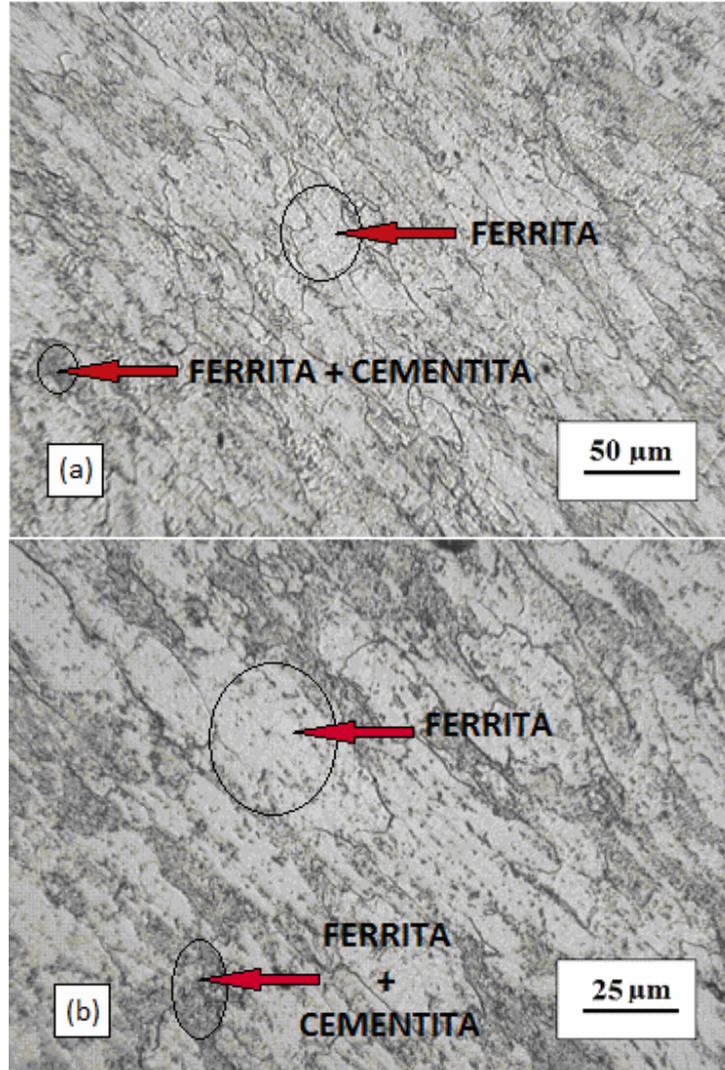
Figura 6.2 - Micrografias da seção transversal de um tubo de aço AISI 4130, (a) 200x e (b) 400x



Fonte: Produzido pelos autores.

As micrografias da seção longitudinal e transversal do tubo que passou pelo procedimento de aquecimento à 200°C, durante 20min e resfriamento ao ar podem ser observadas nas Figuras 6.3 e 6.4.

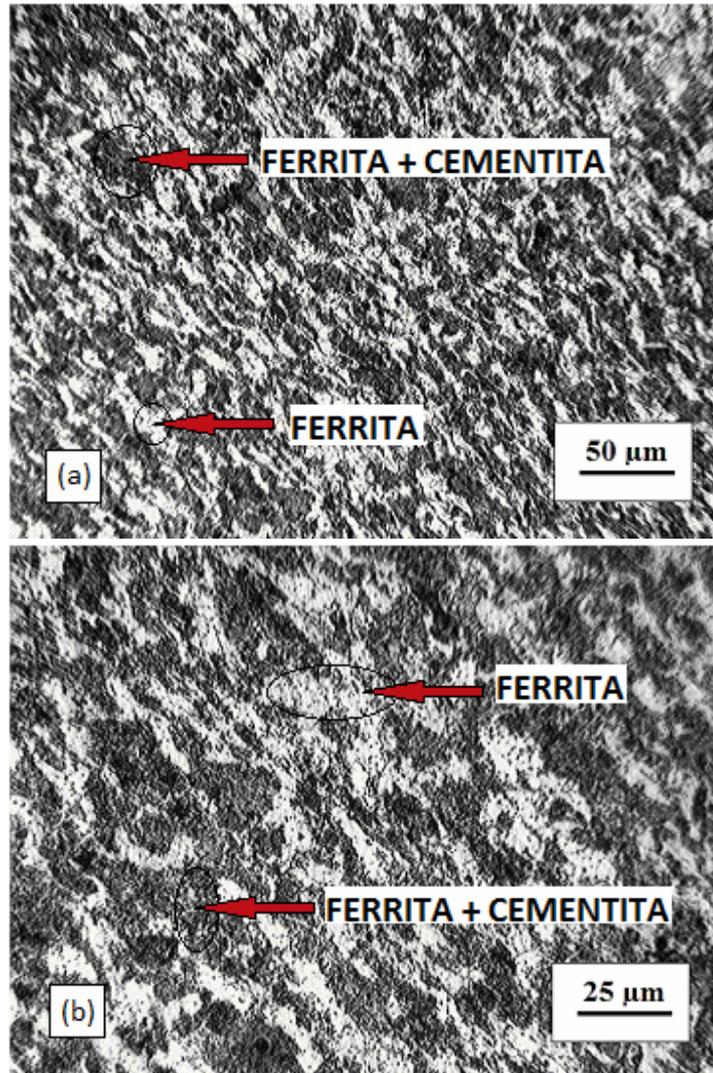
Figura 6.3 – Micrografias da seção longitudinal do tubo de aço AISI 4130 pré-aquecido, (a) 200x e (b) 400x



Nota: aquecimento à 200°C, tempo de encharque de 20min e resfriamento ao ar.

Fonte: Produzido pelos autores.

Figura 6.4 – Micrografias da seção transversal do tubo de aço AISI 4130 pré-aquecido, (a) 200x e (b) 400x



Nota: aquecimento à 200°C, tempo de encharque de 20min e resfriamento ao ar.

Fonte: Produzido pelos autores.

Sabe-se que o aço utilizado é de baixa liga e contém teor de carbono de até 0,33%, portanto, analisando-se as micrografias apresentadas, pode-se dizer que as amostras são formadas, basicamente, por dois constituintes: ferrita e um constituinte formado por ferrita e cementita (perlita). Os diversos pontos escuros podem evidenciar a presença de precipitados.

Comparando-se as microestruturas das seções longitudinais do tubo como recebido e aquecido à 200°C, percebe-se que, as amostras apresentam microestruturas similares, evidenciando que a

temperatura de aquecimento e o tempo de encharque não são suficientes para promover mudanças microestruturais relevantes. Esta evidência está de acordo com os conhecimentos prévios sobre tratamentos térmicos, uma vez que somente há crescimento de grãos e/ou mudanças de microestruturas, para este tipo de material, em temperaturas bem mais elevadas (COLPAERT, 2008). O procedimento de aquecimento de uma amostra até 200°C, durante 20min e com resfriamento ao ar foi realizado a fim de avaliar se a realização do pré-aquecimento antes da soldagem poderia causar mudanças microestruturais e/ou mudanças nas propriedades mecânicas do tubo..

Os grãos das seções longitudinais do tubo como recebido e da amostra aquecida apresentam formatos alongados, que é explicado devido ao fato do tubo ter sido conformado mecanicamente pelo processo de laminação, onde há o achatamento dos grãos na seção transversal e o alongamento dos grãos na direção longitudinal.

Já as micrografias das seções transversais do tubo como recebido e do tubo aquecido à 200°C também ficaram bem semelhantes, evidenciando ainda mais que o pré-aquecimento não resultou em mudança na microestrutura. Os grãos já não possuem formato alongado como os grãos da seção longitudinal, e isto era o esperado uma vez que o esforço mecânico para se conformar o material em seu processamento ocorreu na direção longitudinal.

6.1.2 Medição de microdureza Vickers

A Tabela 6.1 exhibe os valores de microdureza medidos nas amostras de tubo de seções transversais e longitudinais da maneira como foi recebido e com o aquecimento à 200°C, durante 20min e resfriado ao ar.

Tabela 6.1 – Medidas de microdureza realizadas em tubo de aço AISI 4130

Condição	Região	1^a Medida (HV)	2^a Medida (HV)	3^a Medida (HV)	Média (HV)	Desvio Padrão (HV)
Como recebido	Seção Transversal	251	248	235	245	8,50
	Seção Longitudinal	214	216	219	216	2,52
Aquecido*	Seção Transversal	239	247	246	244	4,36
	Seção Longitudinal	224	260	249	244	18,45

*Aquecimento à 200°C, durante 20min, com resfriamento ao ar.

Fonte: Produzido pelos autores.

A diferença entre as médias da microdureza das seções transversais do tubo como recebido e do tubo pré-aquecido foi de apenas 1HV, portanto, pode-se considerar que o aquecimento não resultou em mudanças na dureza do material na seção transversal. Já as seções longitudinais apresentaram uma diferença entre as médias de microdureza de 28HV, porém pode-se concluir que os valores foram similares, uma vez que a diferença entre o primeiro e segundo valor de microdureza medidos na seção longitudinal do tubo aquecido é de 36HV, que é maior do que a diferença entre as médias de microdureza do tubo como recebido e do tubo aquecido. Portanto, além do aquecimento não ter sido o suficiente para causar mudanças na microestrutura, como já foi mencionado, também não foi o suficiente para alterar a dureza do material.

6.2 Tubos de aço AISI 4130 soldados pelo processo GTAW

6.2.1 Ensaio de dobramento

A Tabela 6.2 apresenta a identificação de cada corpo de prova (onde CP significa corpo de prova), mostra a condição de cada corpo de prova, mostra se a junta soldada sofreu fratura e apresenta o valor da força utilizada no ensaio de dobramento.

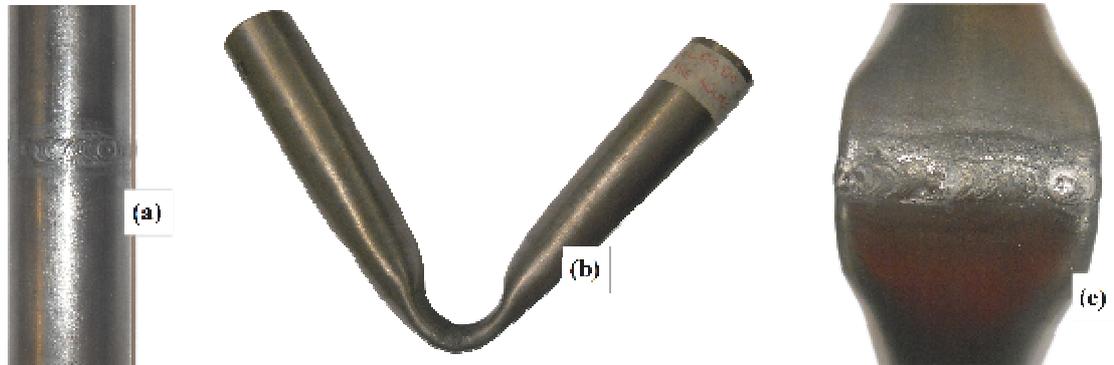
Tabela 6.2 – Resultados do ensaio de dobramento realizado em tubos de aço AISI 4130

Corpo de prova	Condição	Trincou	Força aplicada (KN)
CP 03	Soldado com pré-aquecimento	Não	18,1
CP 04		Não	17,6
CP 05		Não	18,1
CP 06	Soldado sem pré-aquecimento	Não	17,6
CP 07		Sim	17,6
CP 08		Sim	18,6
CP 09	Solda autógena sem pré-aquecimento	Sim	10,7
CP 10	Solda autógena com pré-aquecimento	Não	18,1
CP 11		Não	17,6
CP 12		Não	17,6
CP 13	Maneira como foi recebido	Não	17,2

Fonte: Produzido pelos autores.

As Figuras 6.5 a 6.15 apresentam imagens dos corpos de prova utilizados neste trabalho, bem como as regiões de descontinuidades dos corpos de prova que apresentaram fratura durante o ensaio de dobramento.

Figura 6.5 – Imagens de CP 03 antes e depois do ensaio de dobramento

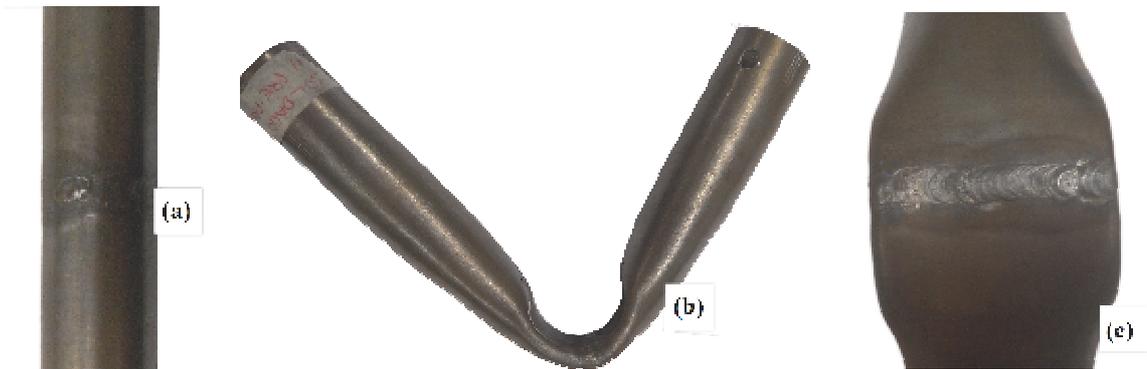


Legenda: (a) Imagem de CP 03 antes do ensaio de dobramento. (b) e (c) Imagens de CP 03 após ensaio de dobramento.

Nota: corpo de prova foi soldado pelo processo GTAW com material de deposição e com pré-aquecimento.

Fonte: Produzido pelos autores.

Figura 6.6 – Imagens de CP 04 antes e depois do ensaio de dobramento

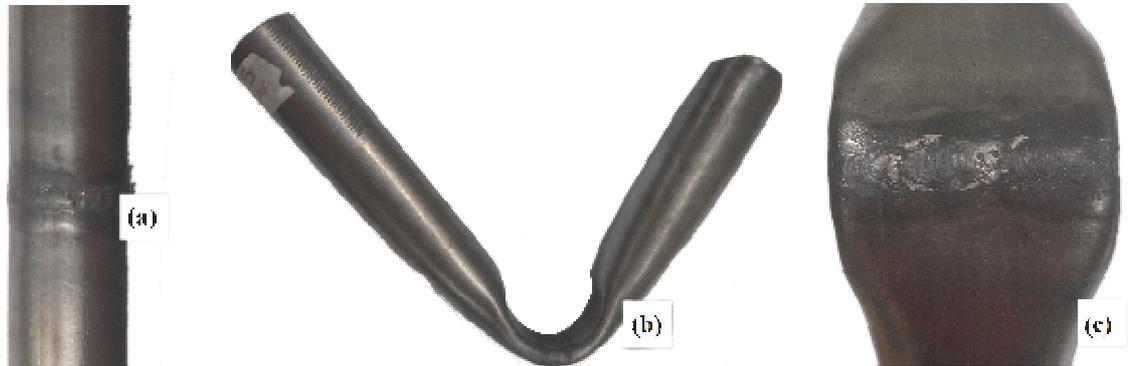


Legenda: (a) Imagem de CP 04 antes do ensaio de dobramento. (b) e (c) Imagens de CP 04 após ensaio de dobramento.

Nota: corpo de prova foi soldado pelo processo GTAW com material de deposição e com pré-aquecimento.

Fonte: Produzido pelos autores.

Figura 6.7 – Imagens de CP 05 antes e depois do ensaio de dobramento

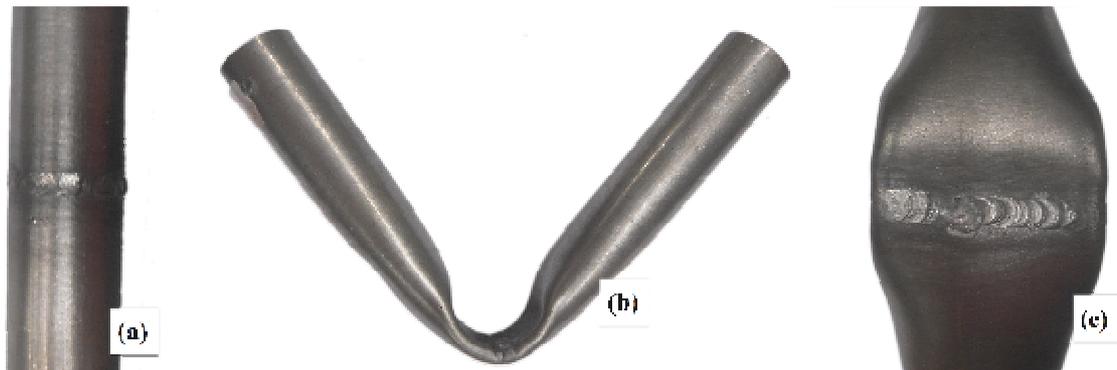


Legenda: (a) Imagem de CP 05 antes do ensaio de dobramento. (b) e (c) Imagens de CP 05 após ensaio de dobramento.

Nota: corpo de prova foi soldado pelo processo GTAW com material de deposição e com pré-aquecimento.

Fonte: Produzido pelos autores.

Figura 6.8 – Imagens de CP 06 antes e depois do ensaio de dobramento

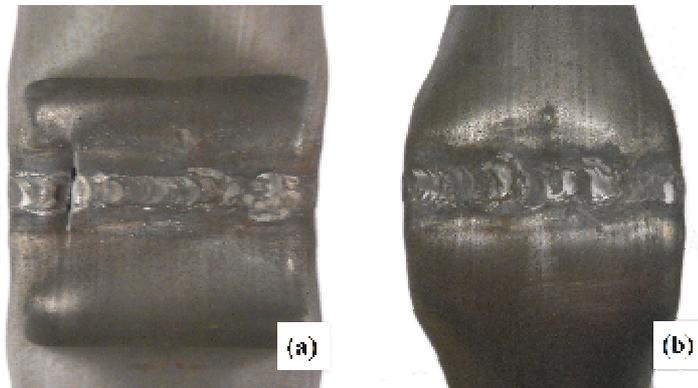


Legenda: (a) Imagem de CP 06 antes do ensaio de dobramento. (b) e (c) Imagens de CP 06 após ensaio de dobramento.

Nota: corpo de prova foi soldado pelo processo GTAW com material de deposição e sem pré-aquecimento.

Fonte: Produzido pelos autores.

Figura 6.9 – Imagens de CP 07 após o ensaio de dobramento



Legenda: (a) Imagem de CP 07 após o ensaio de dobramento evidenciando fratura perpendicular ao cordão de solda. (b) Imagem de CP 07 após ensaio de dobramento.

Nota: corpo de prova foi soldado pelo processo GTAW com material de deposição e sem pré-aquecimento.

Fonte: Produzido pelos autores.

Figura 6.10 – Imagens de CP 08 após o ensaio de dobramento

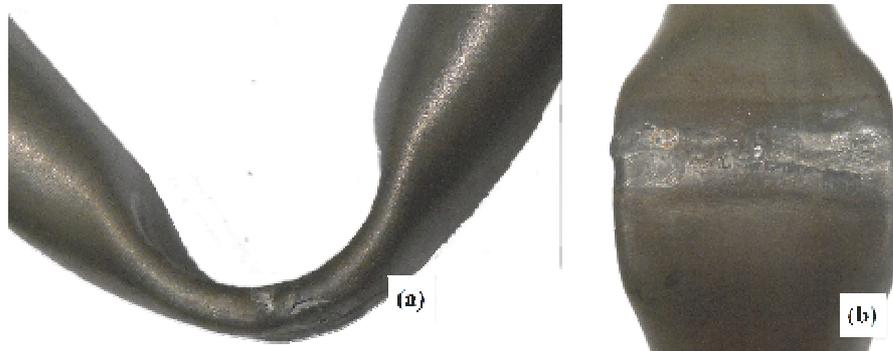


Legenda: (a) e (b) Imagens de CP 08 após o ensaio de dobramento. (c) Imagem de CP 08 após ensaio de dobramento evidenciando fratura perpendicular ao cordão de solda.

Nota: corpo de prova foi soldado pelo processo GTAW com material de deposição e sem pré-aquecimento.

Fonte: Produzido pelos autores.

Figura 6.11 – Imagens de CP 09 após o ensaio de dobramento



Legenda: (a) Imagem de CP 09 após o ensaio de dobramento evidenciando fratura lateral perpendicular à ao cordão de solda. (b) Imagem de CP 09 após ensaio de dobramento.

Nota: corpo de prova passou pelo processo de soldagem autógena GTAW sem pré-aquecimento.

Fonte: Produzido pelos autores.

Figura 6.12 – Imagens de CP 10 após o ensaio de dobramento

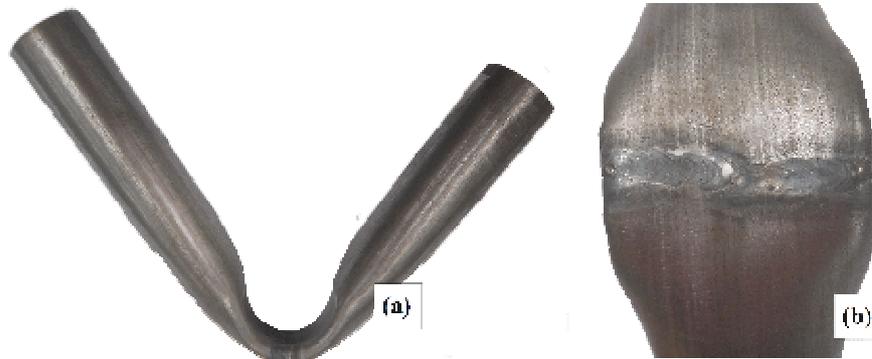


Legenda: (a) e (b) Imagens de CP 10 após o ensaio de dobramento.

Nota: corpo de prova passou pelo processo de soldagem autógena GTAW com pré-aquecimento.

Fonte: Produzido pelos autores.

Figura 6.13 – Imagens de CP 11 após o ensaio de dobramento

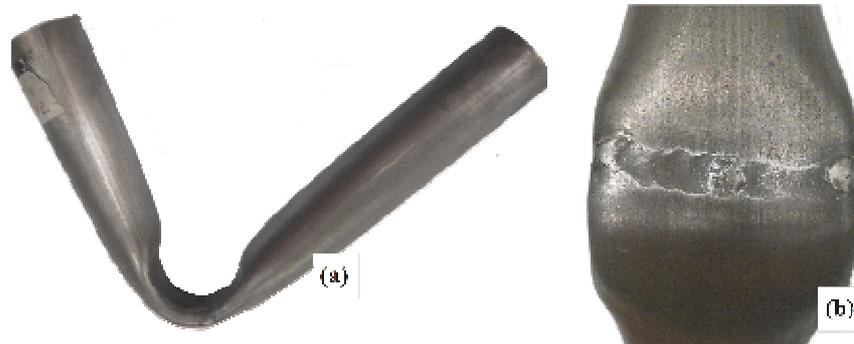


Legenda: (a) e (b) Imagens de CP 11 após o ensaio de dobramento.

Nota: corpo de prova passou pelo processo de soldagem autógena GTAW com pré-aquecimento.

Fonte: Produzido pelos autores.

Figura 6.14 – Imagens de CP 12 após o ensaio de dobramento

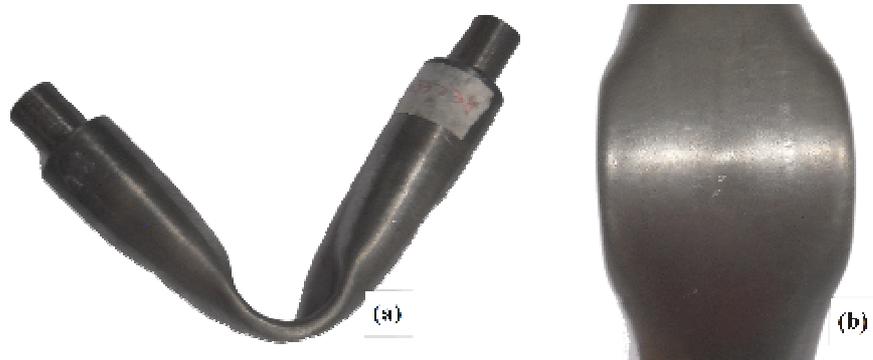


Legenda: (a) e (b) Imagens de CP 12 após o ensaio de dobramento.

Nota: corpo de prova passou pelo processo de soldagem autógena GTAW com pré-aquecimento.

Fonte: Produzido pelos autores.

Figura 6.15 – Imagens de CP 13 após o ensaio de dobramento



Legenda: (a) e (b) Imagens de CP 13 após o ensaio de dobramento.

Nota: corpo de prova na forma como foi recebido.

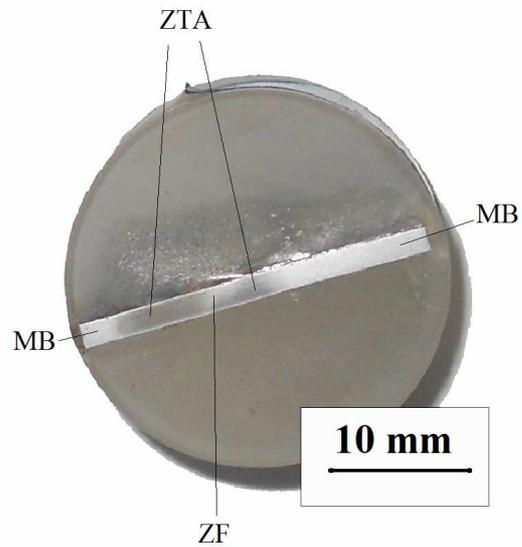
Fonte: Produzido pelos autores.

O CP 01 e o CP 02 são amostras com solda autógena sem pré-aquecimento e não passaram pelo ensaio de dobramento. Um corpo de prova com solda autógena sem pré-aquecimento e dois corpos de prova soldados sem pré-aquecimento sofreram fratura na região da solda durante o ensaio de dobramento. Além disto, as amostras soldadas com material de deposição e soldadas sem material de deposição com pré-aquecimento não sofreram fratura. Isto é uma evidência de que a realização do pré-aquecimento na soldagem GTAW em tubos de aço AISI 4130 é mais adequada do que a não realização do pré-aquecimento, uma vez que a fratura sugere que a solda não está resistente.

6.2.2 Macrografias

As Figuras 6.16 e 6.17 representam macrografias de corpos de prova com solda autógena sem pré-aquecimento e que não passaram pelo ensaio de dobramento. As Figuras 6.18, 6.19 e 6.20 representam macrografias de corpos de prova soldados com pré-aquecimento. As Figuras 6.21, 6.22 e 6.23 representam corpos de prova soldados sem pré-aquecimento. A Figura 6.24 representa macrografia de um corpo soldado sem material de deposição e sem pré-aquecimento. As Figuras 6.25, 6.26 e 6.27 representam corpos de prova soldados sem material de deposição com pré-aquecimento. Já a Figura 6.28 representa o corpo de prova da maneira como foi recebido.

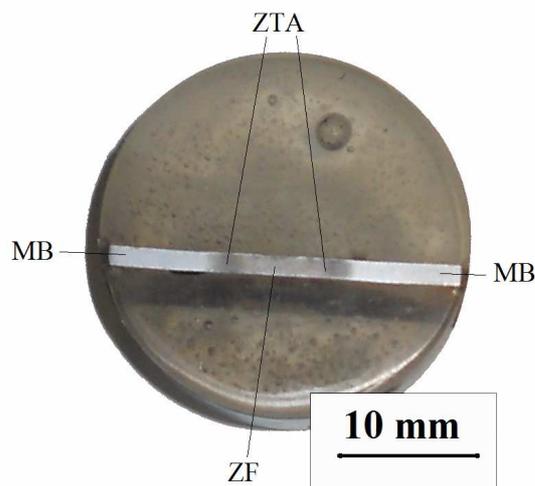
Figura 6.16 – Macrografia de CP 01



Nota: Amostra com solda autóloga sem pré-aquecimento. O corpo de prova não passou pelo ensaio de dobramento.

Fonte: Produzido pelos autores.

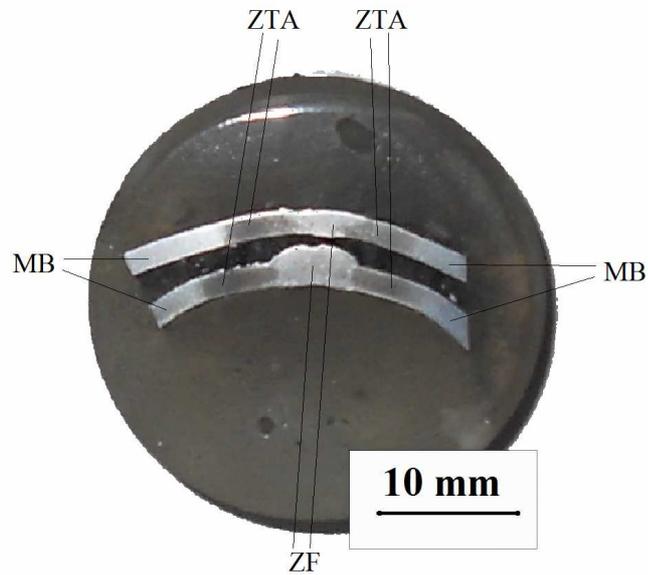
Figura 6.17 – Macrografia de CP 02.



Nota: Amostra com solda autóloga sem pré-aquecimento. O corpo de prova não passou pelo ensaio de dobramento.

Fonte: Produzido pelos autores.

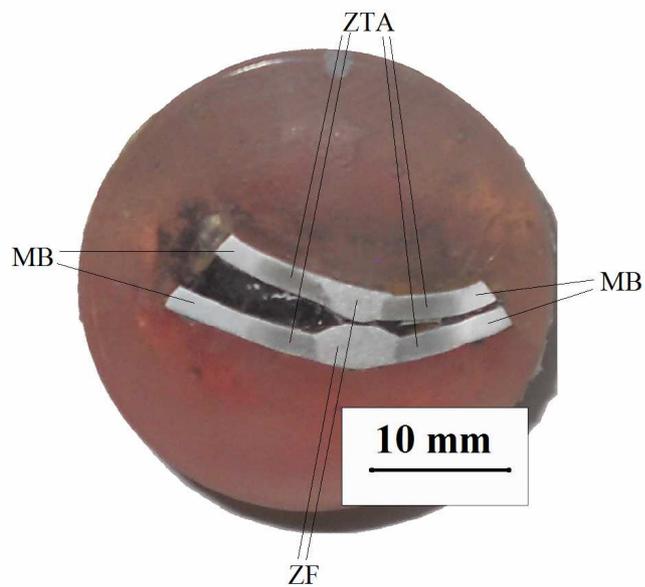
Figura 6.18 – Macrografia de CP 03



Nota: Amostra soldada com material de deposição e com pré-aquecimento. Corpo de prova passou pelo ensaio de dobramento.

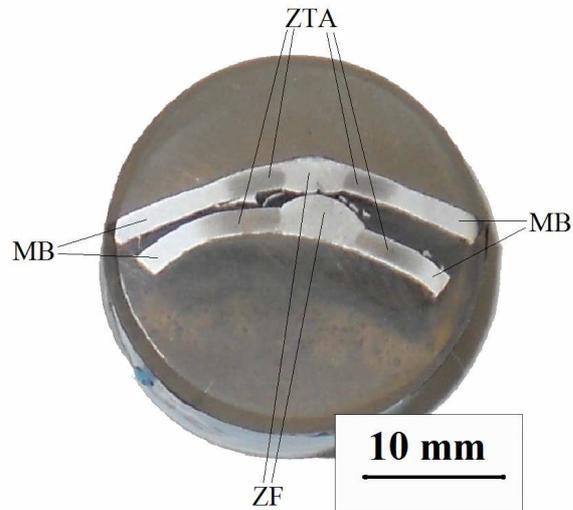
Fonte: Produzido pelos autores.

Figura 6.19 – Macrografia de CP 04



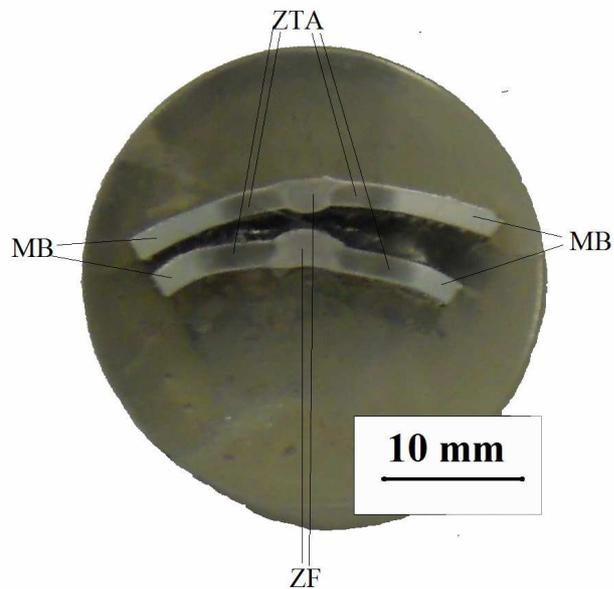
Nota: Amostra soldada com material de deposição e com pré-aquecimento. Corpo de prova passou pelo ensaio de dobramento.

Fonte: Produzido pelos autores.

Figura 6.20 – Macrografia de CP 05

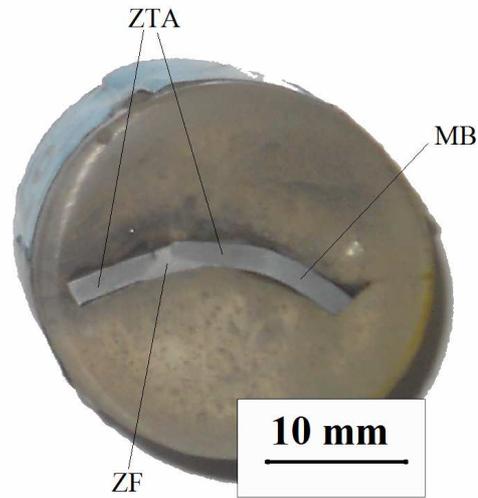
Nota: Amostra soldada com material de deposição e com pré-aquecimento. Corpo de prova passou pelo ensaio de dobramento.

Fonte: Produzido pelos autores.

Figura 6.21 – Macrografia de CP 06

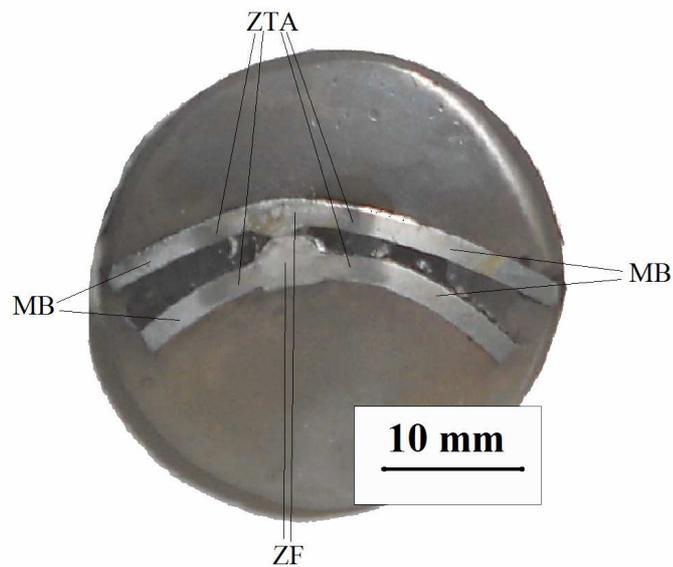
Nota: Amostra soldada com material de deposição e sem pré-aquecimento. Corpo de prova passou pelo ensaio de dobramento.

Fonte: Produzido pelos autores.

Figura 6.22 – Macrografia de CP 07

Nota: Amostra soldada com material de deposição e sem pré-aquecimento. Corpo de prova passou pelo ensaio de dobramento.

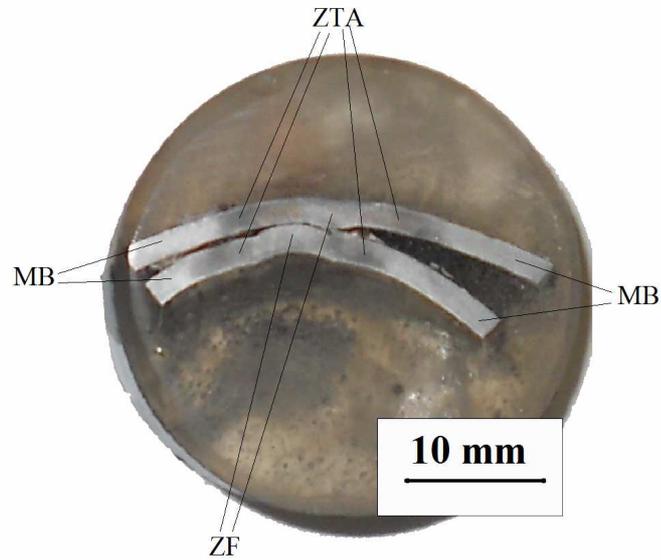
Fonte: Produzido pelos autores.

Figura 6.23 – Macrografia de CP 08

Nota: Amostra soldada com material de deposição e sem pré-aquecimento. Corpo de prova passou pelo ensaio de dobramento.

Fonte: Produzido pelos autores.

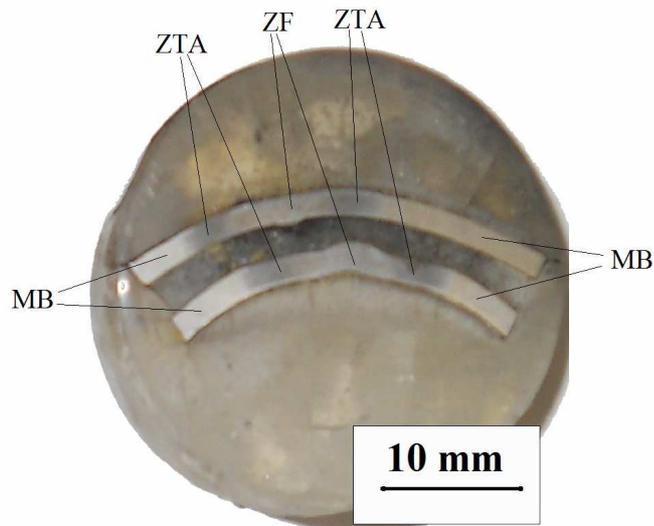
Figura 6.24 – Macrografia de CP 09



Nota: Amostra passou pelo processo de soldagem autógena sem pré-aquecimento. Corpo de prova passou pelo ensaio de dobramento.

Fonte: Produzido pelos autores.

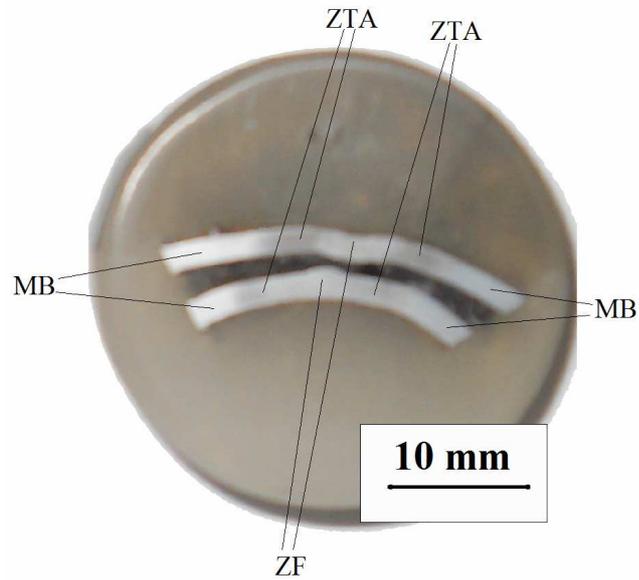
Figura 6.25 – Macrografia de CP 10



Nota: Amostra passou pelo processo de soldagem autógena com pré-aquecimento. Corpo de prova passou pelo ensaio de dobramento.

Fonte: Produzido pelos autores.

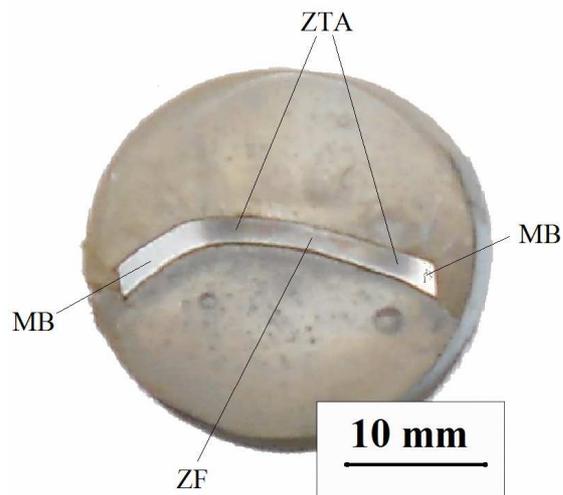
Figura 6.26 – Macrografia de CP 11



Nota: Amostra passou pelo processo de soldagem autógena com pré-aquecimento. Corpo de prova passou pelo ensaio de dobramento.

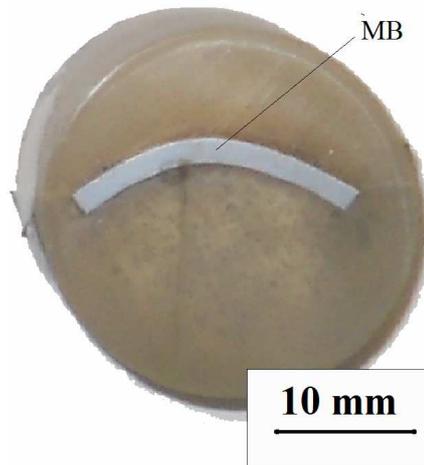
Fonte: Produzido pelos autores.

Figura 6.27 – Macrografia de CP 12



Nota: Amostra passou pelo processo de soldagem autógena com pré-aquecimento. Corpo de prova passou pelo ensaio de dobramento.

Fonte: Produzido pelos autores.

Figura 6.28 – Macrografia de CP 13

Nota: Amostra de tubo como recebido.
Corpo de prova passou pelo ensaio de dobramento.
Fonte: Produzido pelos autores.

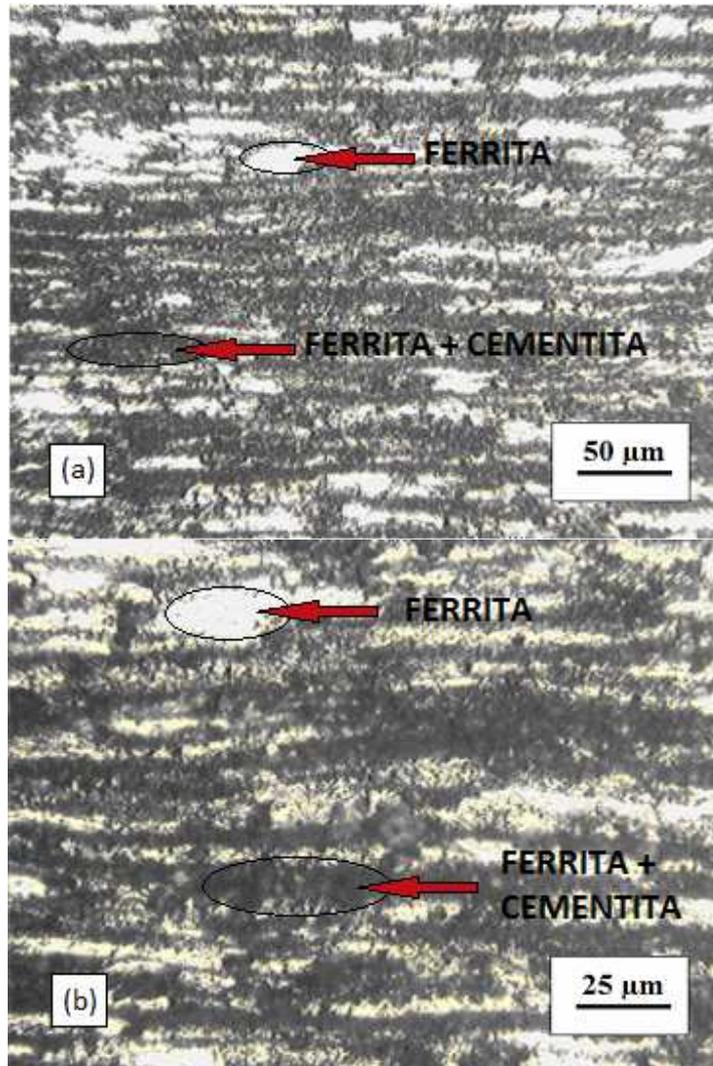
Nos corpos de prova que foram soldados com material de deposição com e sem pré-aquecimento, CP 03, CP 04, CP 05, CP 06 e CP 07, há uma nítida divisão entre ZF e ZTA. Já os corpos de sem material de deposição com e sem pré-aquecimento, CP 01, CP 02, CP 09, CP 10, CP 11 e CP 12, não apresentam uma nítida divisão entre ZF e ZTA. O CP 13 apresenta uma cor uniforme, pois, uma vez que ele está em sua forma como foi recebido, supõe-se que a microestrutura ao longo de todo o tubo seja regular a ponto do ataque químico superficial não mostrar qualquer diferença de tonalidade.

A ZTA apresenta uma tonalidade mais escura que a ZF, pois, a ZTA pode possuir fases que são mais susceptíveis à corrosão química promovida pelo reagente em relação às fases presentes na ZF.

6.2.3 Micrografias

A Figura 6.29 representa o metal base de CP 01, e a Figura 6.30 mostra a zona fundida de CP 01. A intenção era de obter uma micrografia da região entre a zona fundida e a ZTA, porém, com este corpo de prova, isto não foi possível de ser realizado, pois, não há uma divisão entre ZF e ZTA. A micrografia do metal base está bem similar com a micrografia da seção longitudinal do tubo recebido, evidenciando a presença de ferrita e perlita, podendo haver a presença de precipitados. Já a zona fundida foi de difícil determinação, porém, os valores de microdureza realizadas na região puderam tornar a análise mais viável.

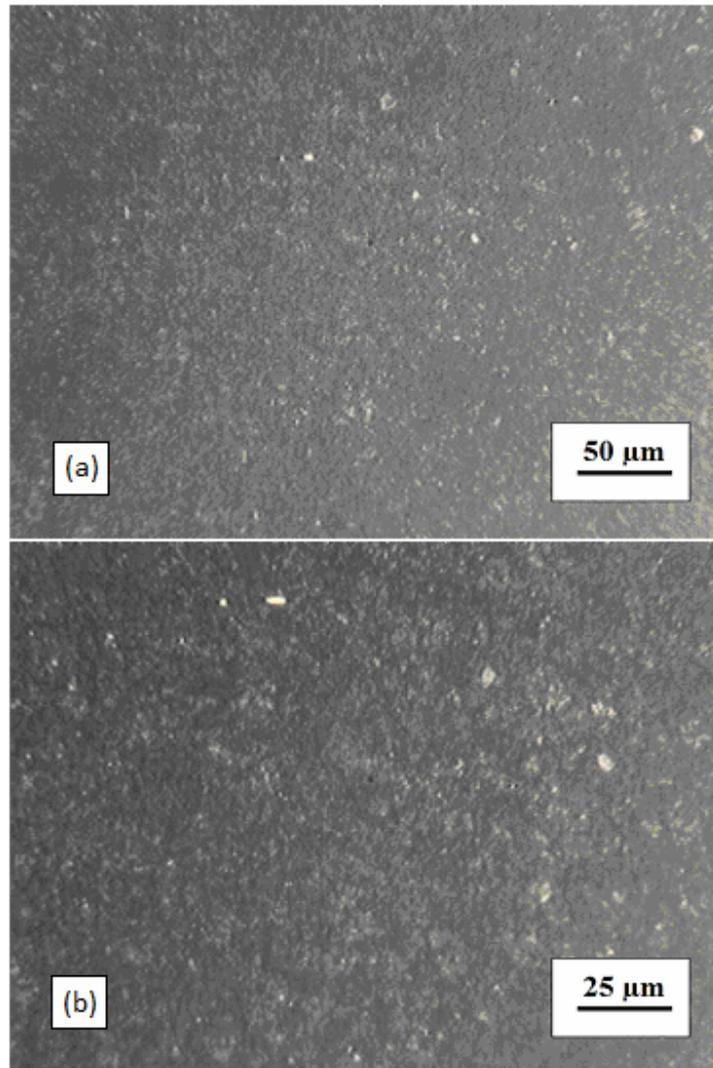
Figura 6.29 – Micrografias de metal base de CP 01 com aumentos de 200x e 400x



Nota: corpo de prova passou pela soldagem autógena sem pré-aquecimento.

Fonte: Produzido pelos autores.

Figura 6.30 – Micrografias da zona fundida de CP 01 com aumentos de 200x e 400x

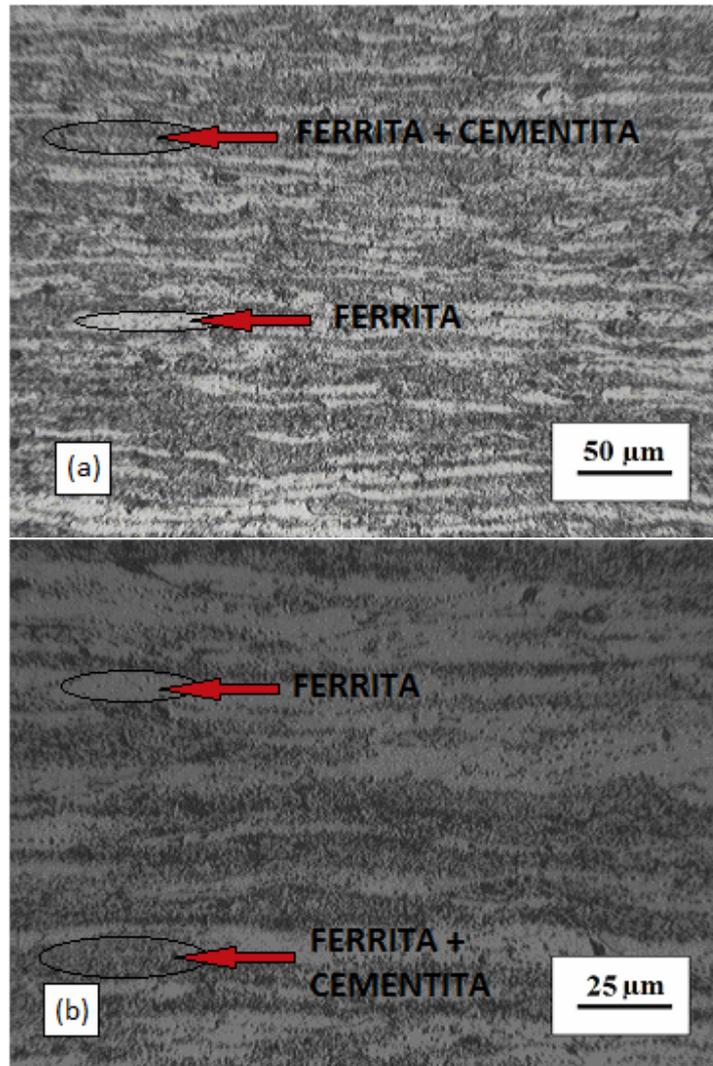


Nota: corpo de prova passou pela soldagem autógena sem pré-aquecimento.

Fonte: Produzido pelos autores.

A Figura 6.31 representa micrografias do metal base de CP 02 (solda autógena sem pré-aquecimento). Assim como o CP 01, CP 02 também não possui uma divisão clara entre ZTA e ZF, porém, neste caso ainda foi possível realizar micrografias da região onde inicia a transição de zona fundida para zona termicamente afetada, que pode ser vista na Figura 6.32.

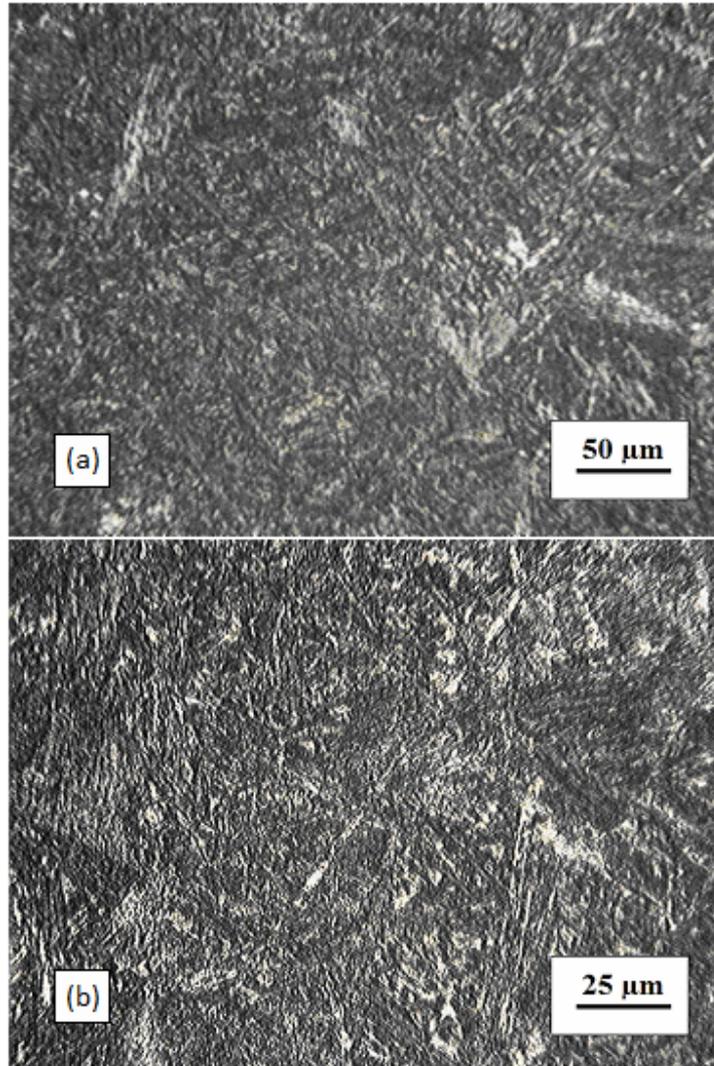
Figura 6.31 – Micrografias de metal base de CP 02, (a) 200x e (b) 400x



Nota: corpo de prova passou pela soldagem autógena sem pré-aquecimento.

Fonte: Produzido pelos autores.

Figura 6.32 – Micrografias da região entre ZF e ZTA de CP 02, (a) 200x e (b) 400x



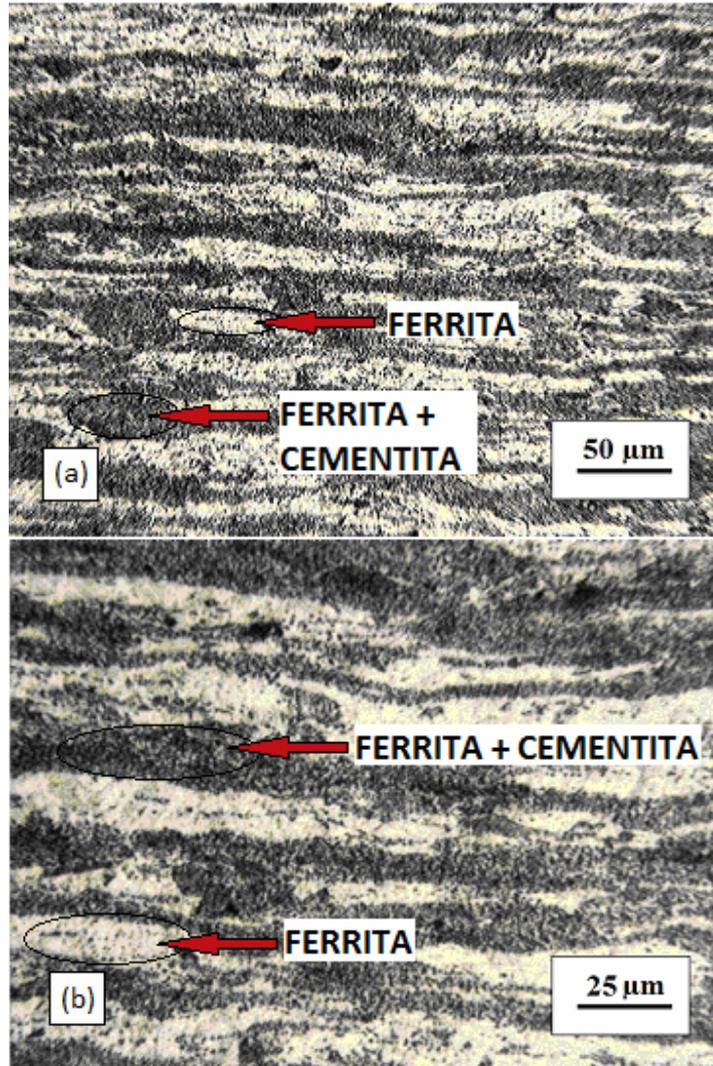
Legenda: Lado esquerdo representa a ZTA e lado direito representa a ZF.

Nota: corpo de prova passou pela soldagem autógena sem pré-aquecimento.

Fonte: Produzido pelos autores.

As Figuras 6.33 a 6.38 representam micrografias do metal base e da região entre a ZF e ZTA dos corpos de prova soldados com pré-aquecimento, CP 03, CP 04 e CP 05.

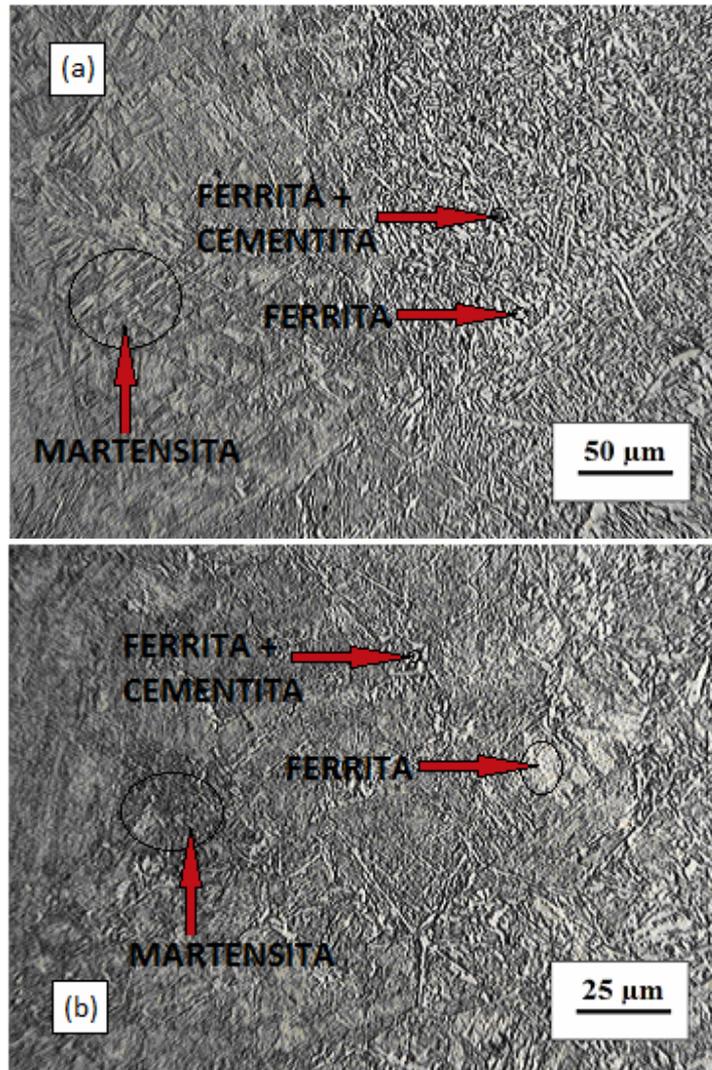
Figura 6.33 – Micrografias do metal base de CP 03, (a) 200x e (b) 400x



Nota: o corpo de prova foi soldado com material de deposição e com pré-aquecimento.

Fonte: Produzido pelos autores.

Figura 6.34 – Micrografias da região entre ZTA e ZF de CP 03, (a) 200x e (b) 400x

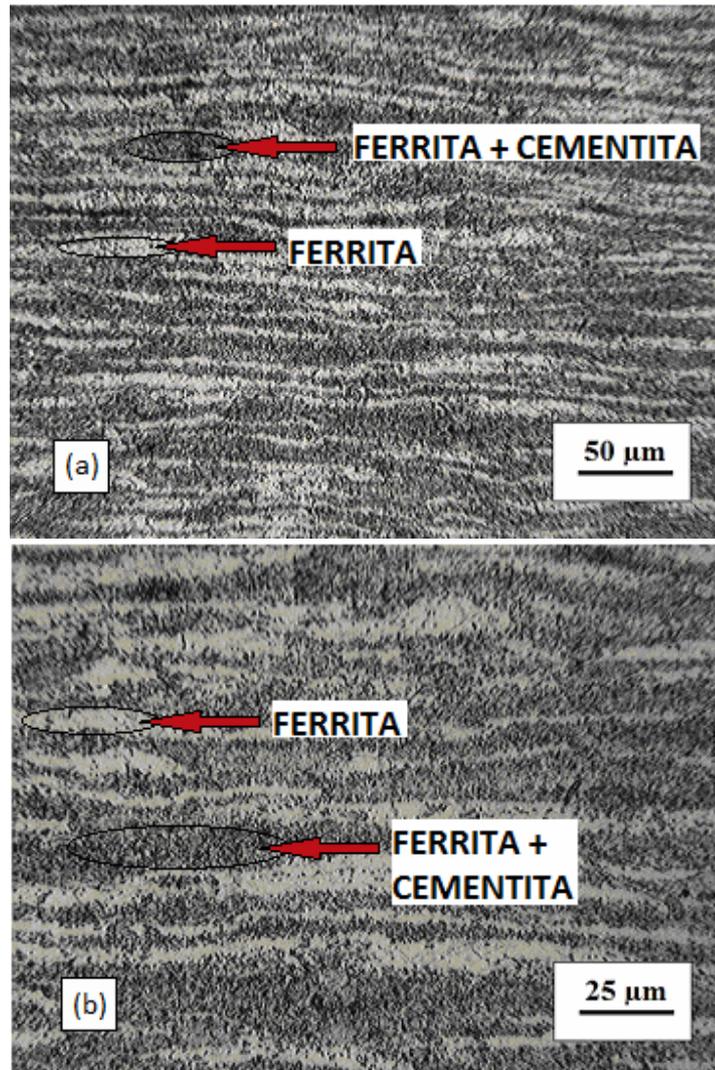


Legenda: Lado esquerdo representa a ZTA e lado direito representa a ZF.

Nota: o corpo de prova foi soldado com material de deposição e com pré-aquecimento.

Fonte: Produzido pelos autores.

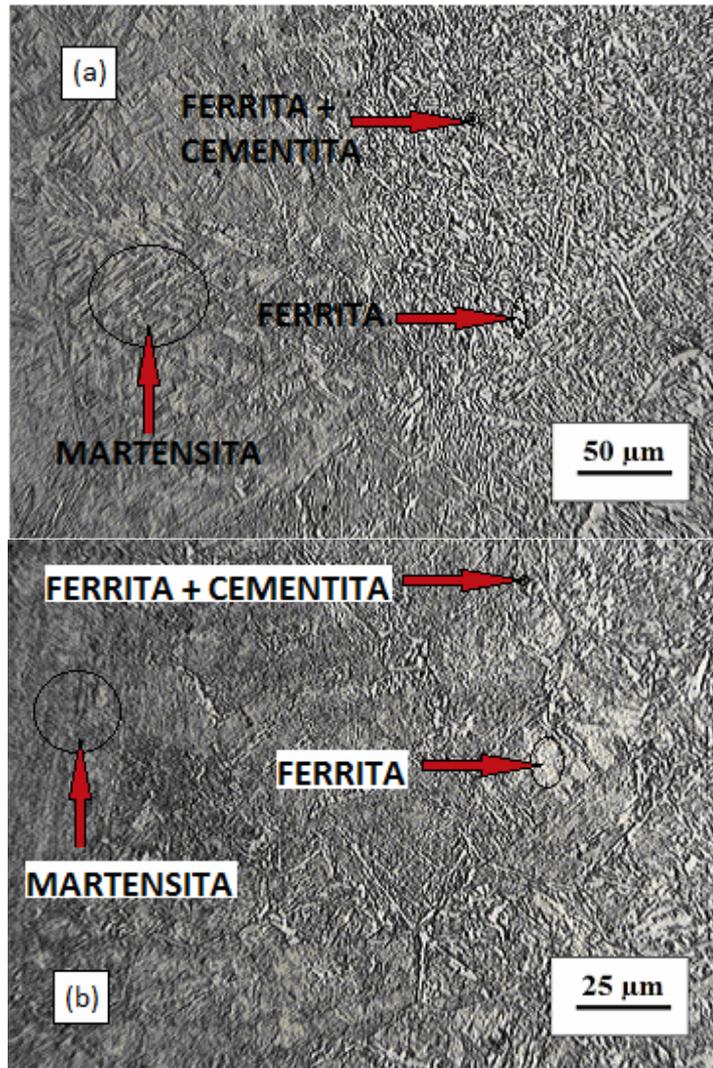
Figura 6.35 – Micrografias do metal base de CP 04, (a) 200x e (b) 400x



Nota: o corpo de prova foi soldado com material de deposição e com pré-aquecimento.

Fonte: Produzido pelos autores.

Figura 6.36 – Micrografias da região entre ZTA e ZF de CP 04, (a) 200x e (b) 400x

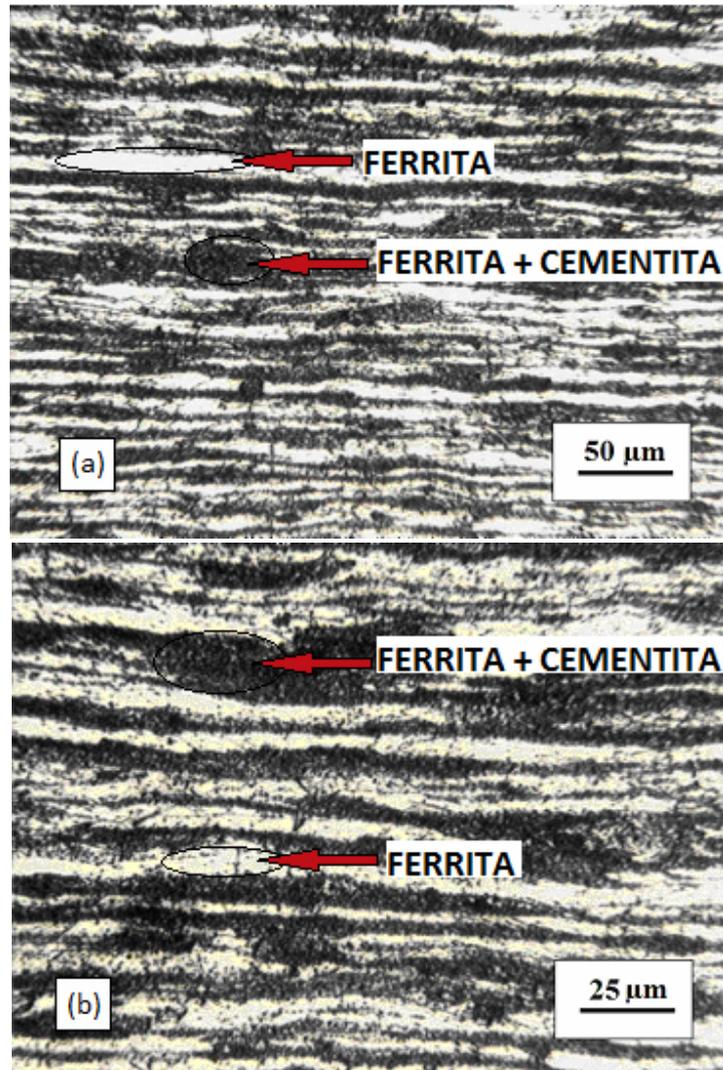


Legenda: Lado esquerdo representa a ZTA e lado direito representa a ZF.

Nota: o corpo de prova foi soldado com material de deposição e com pré-aquecimento.

Fonte: Produzido pelos autores.

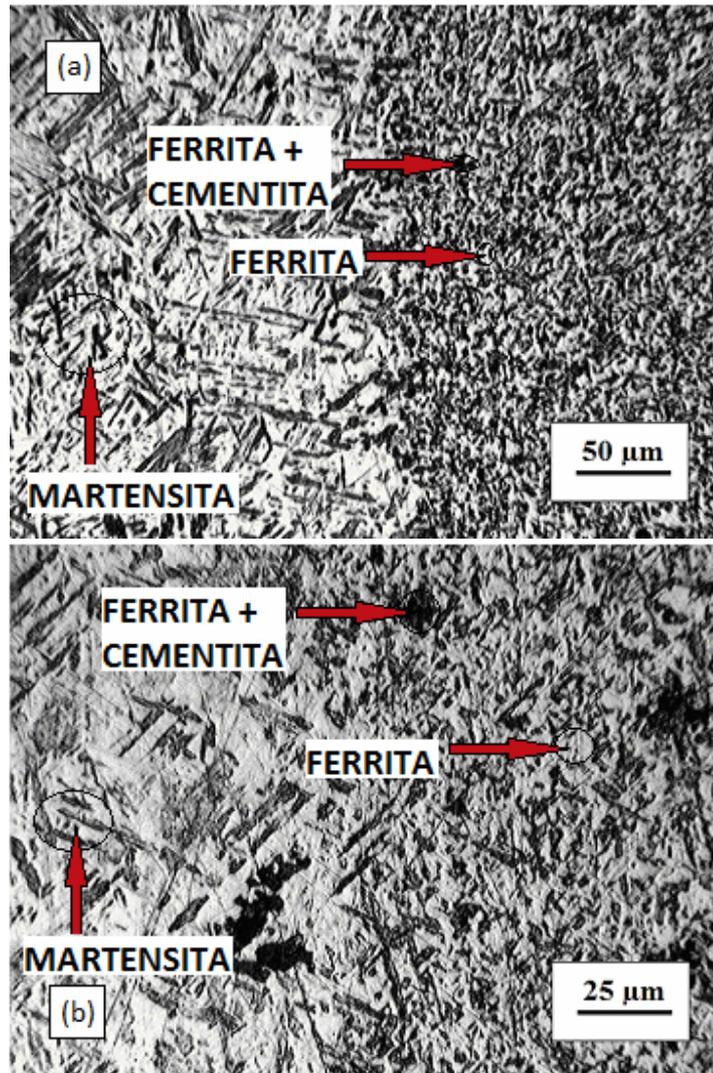
Figura 6.37 – Micrografias do Metal Base de CP 05, (a) 200x e (b) 400x



Nota: o corpo de prova foi soldado com material de deposição e com pré-aquecimento.

Fonte: Produzido pelos autores.

Figura 6.38 – Micrografias da região entre ZTA e ZF de CP 05, (a) 200x e (b) 400x



Legenda: Lado esquerdo representa a ZTA e lado direito representa a ZF.

Nota: o corpo de prova foi soldado com material de deposição e com pré-aquecimento.

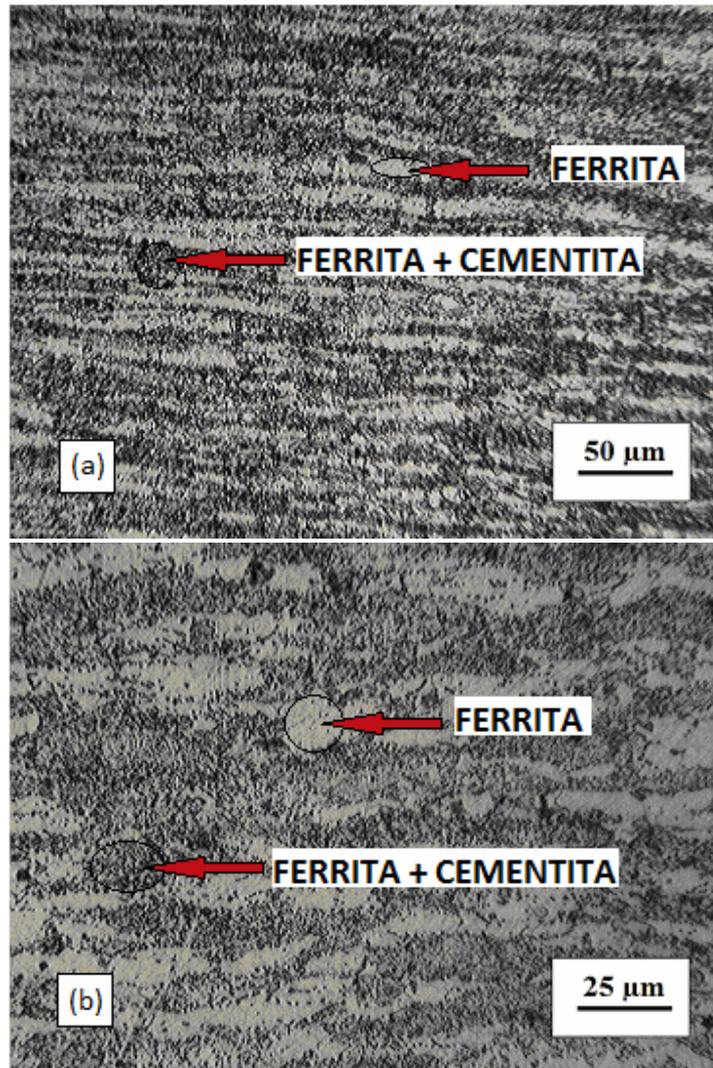
Fonte: Produzido pelos autores.

Analisando-se as micrografias, diferente de CP 01 e CP 02, os corpos de prova CP 03, CP 04 e CP 05 apresentam uma clara divisão entre ZTA e ZF. Para os três corpos de prova soldados com pré-aquecimento, percebe-se que na ZTA, há a presença de martensita e na ZF há a presença de ferrita e perlita. A região onde ocorreu fusão possui um resfriamento mais lento que a ZTA, por

isso houve um tempo maior para formação de ferrita e cementita do que na ZTA. Por outro lado, a microestrutura da ZF não é igual a do metal base, uma vez que o resfriamento ao ar faz com que se diminua a possibilidade de difusão atômica, logo, diminui a possibilidade de um arranjo maior das fases. Estando ao lado do metal base, que está à temperatura ambiente, a ZTA possui uma taxa de resfriamento maior que a ZF, permitindo a formação de uma fase que não demanda difusão, que é o caso da martensita. Os três corpos de prova apresentam microestruturas similares, mostrando repetitividade para esta condição, sendo o processo de soldagem, portanto, padronizado.

As Figuras 6.39 a 6.44 representam micrografias do metal base e da região entre ZTA e ZF dos corpos de prova soldados sem pré-aquecimento, CP 06, CP 07 e CP 08.

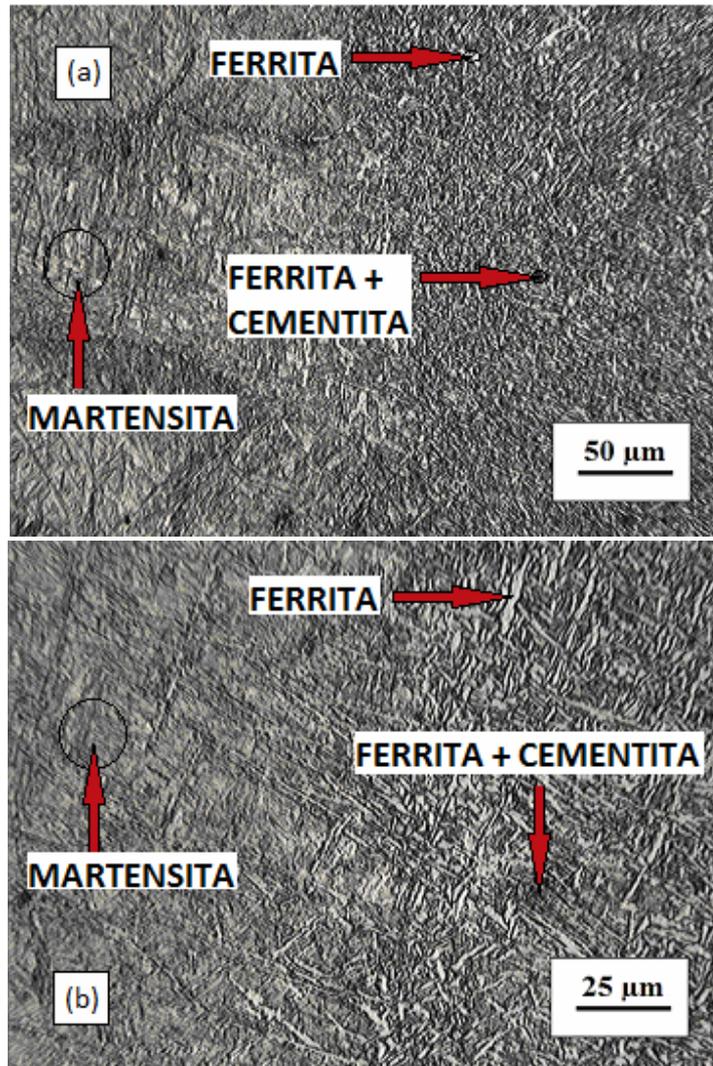
Figura 6.39 – Micrografias do metal base de CP 06, (a) 200x e (b) 400x



Nota: o corpo de prova foi soldado com material de deposição e sem pré-aquecimento.

Fonte: Produzido pelos autores.

Figura 6.40 – Micrografias da região entre ZTA e ZF de CP 06, (a) 200x e (b) 400x

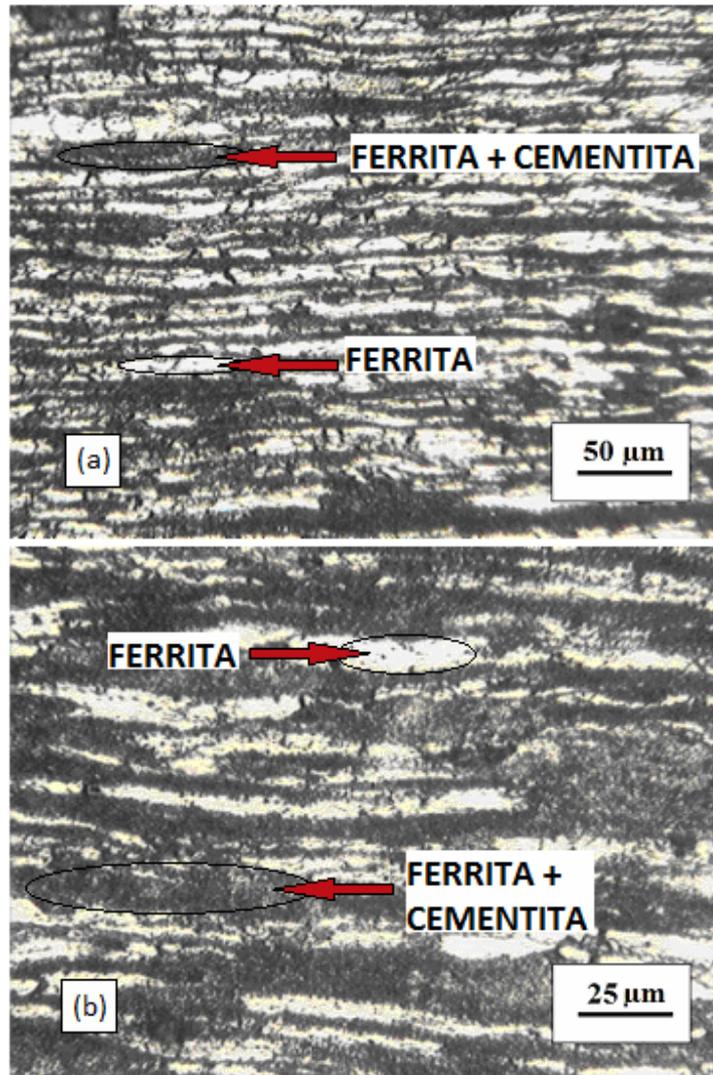


Legenda: Lado esquerdo representa a ZTA e lado direito representa a ZF.

Nota: o corpo de prova foi soldado com material de deposição e sem pré-aquecimento.

Fonte: Produzido pelos autores.

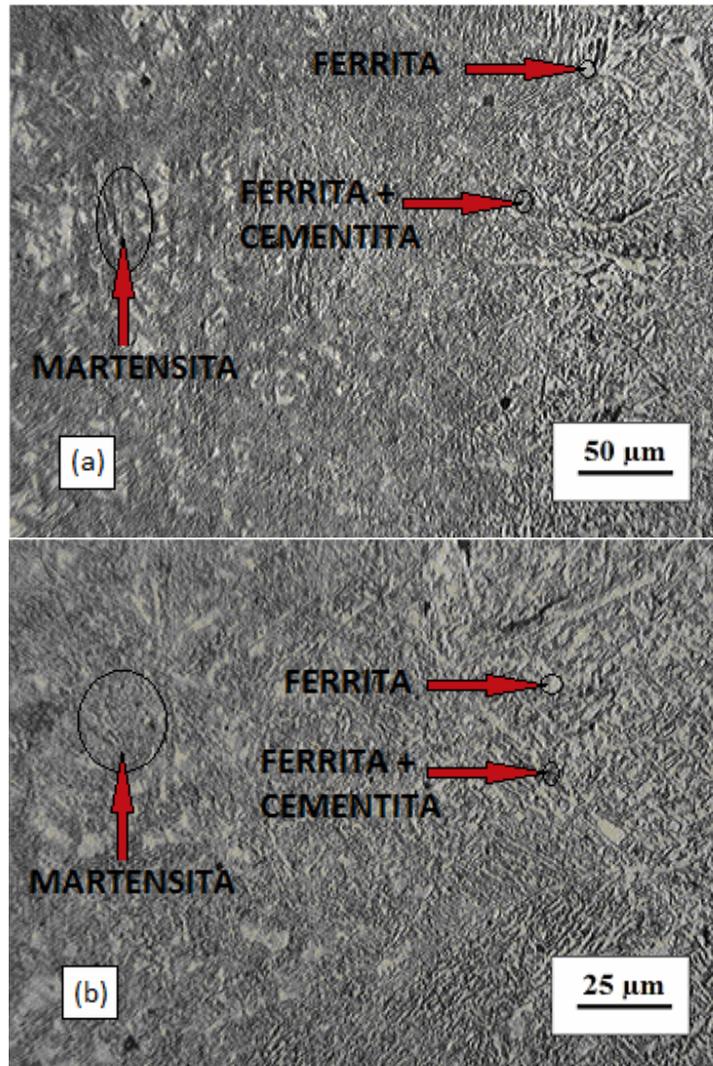
Figura 6.41 – Micrografias do metal base de CP 07, (a) 200x e (b) 400x



Nota: o corpo de prova foi soldado com material de deposição e sem pré-aquecimento.

Fonte: Produzido pelos autores.

Figura 6.42 – Micrografias da região entre ZTA e ZF de CP 07, (a) 200x e (b) 400x

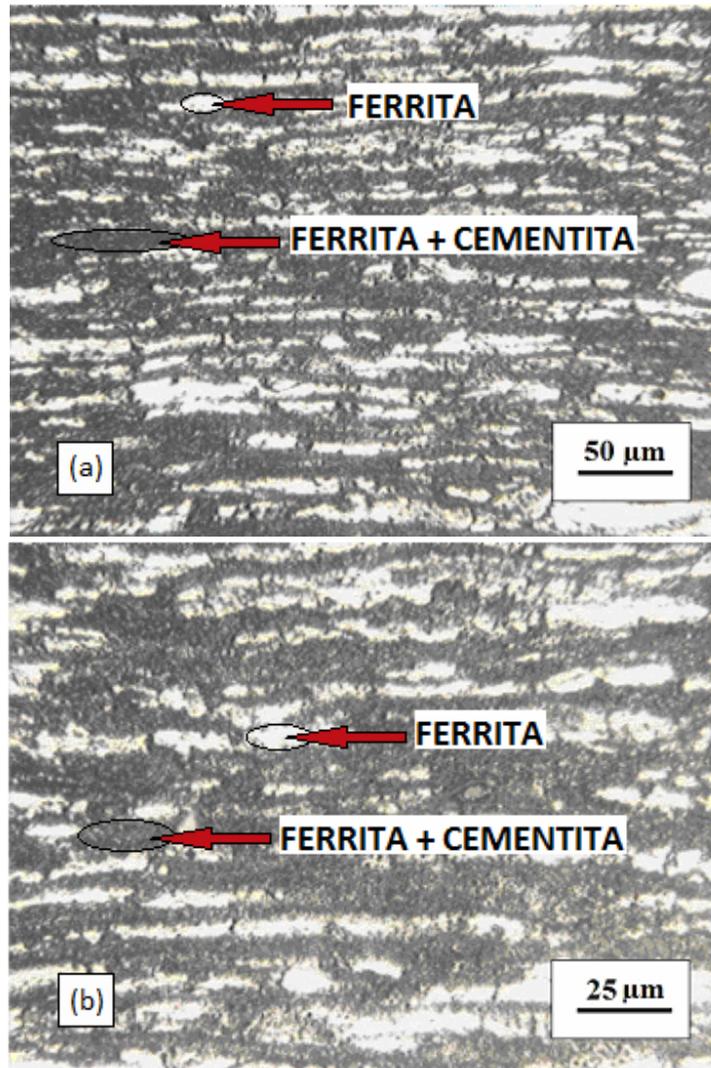


Legenda: Lado esquerdo representa a ZTA e lado direito representa a ZF.

Nota: o corpo de prova foi soldado com material de deposição e sem pré-aquecimento.

Fonte: Produzido pelos autores.

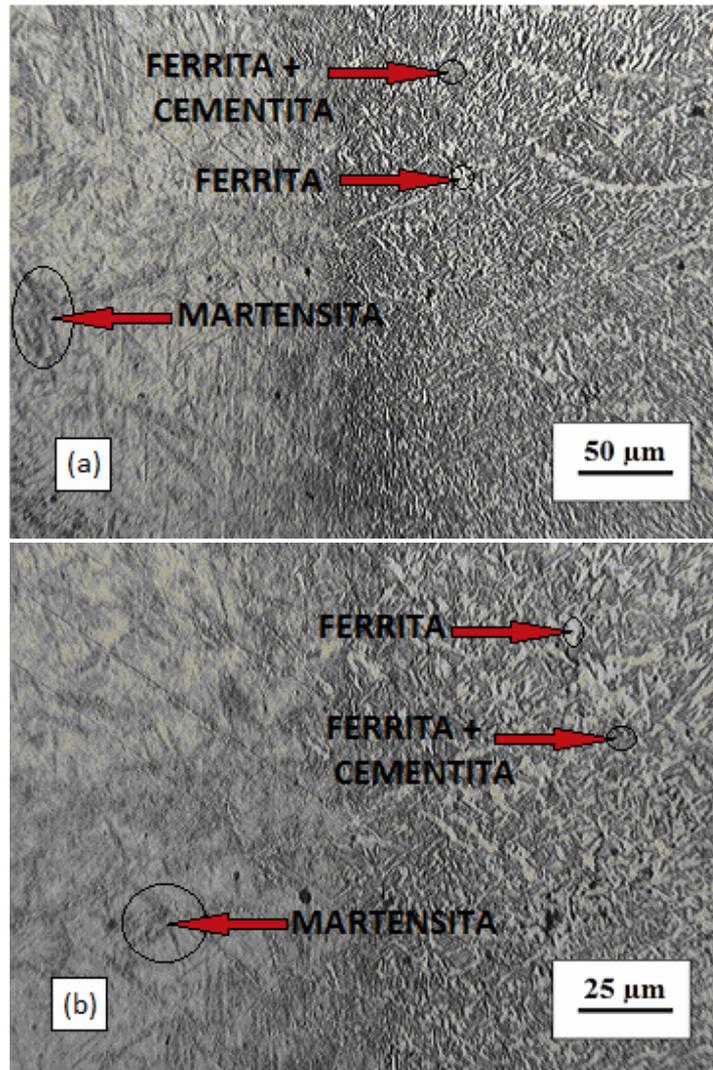
Figura 6.43 – Micrografias do metal base de CP 08, (a) 200x e (b) 400x



Nota: o corpo de prova foi soldado com material de deposição e sem pré-aquecimento.

Fonte: Produzido pelos autores.

Figura 6.44 – Micrografias da região entre ZTA e ZF de CP 08, (a) 200x e (b) 400x



Legenda: Lado esquerdo representa a ZTA e lado direito representa a ZF.

Nota: o corpo de prova foi soldado com material de deposição e sem pré-aquecimento.

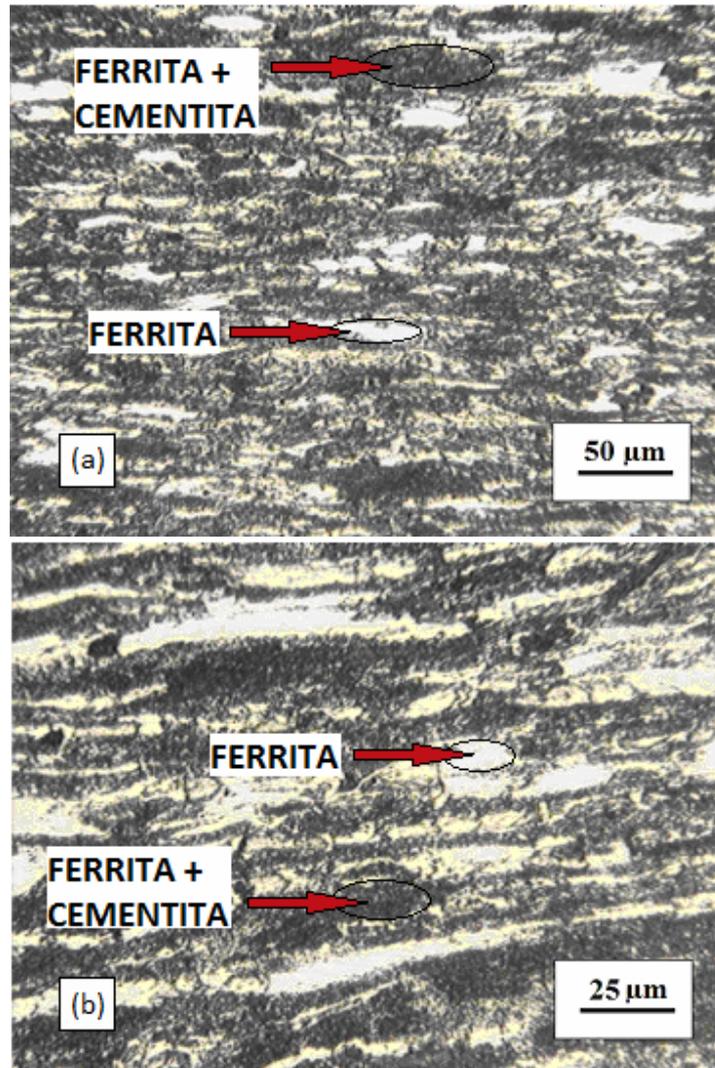
Fonte: Produzido pelos autores.

As micrografias da região entre ZTA e ZF dos tubos soldados sem pré-aquecimento estão bem similares com as micrografias dos tubos soldados com pré-aquecimento, portanto, apenas analisando as micrografias, não é possível determinar se a utilização do pré-aquecimento é mais adequada. A não utilização do pré-aquecimento pode resultar em uma maior formação de quantidade de martensita na ZTA, e/ou na formação de uma martensita mais deformada (maior

desproporção entre os lados), porém, não há como determinar se a ZTA dos tubos soldados sem pré-aquecimento possui maior quantidade de martensita que a ZTA dos tubos soldados sem pré-aquecimento. Pelas medições de microdureza, foi mais viável de se comparar qual ZTA possui maior quantidade de martensita e/ou possui uma martensita mais deformada.

A Figura 6.45 representa o metal base de CP 09, amostra soldada sem material de deposição e sem pré-aquecimento. Já a Figura 6.47 representa a região entre ZTA e ZF de CP 09. Diferente do CP 01 e CP 02, amostras submetidas à mesma condição que o CP 09, pela micrografia, foi possível determinar uma região que separa a ZTA da ZF no CP 09. Pela macrografia, esta região não está bem delimitada como as regiões dos corpos de prova soldados, porém, ainda está mais visível que CP 01 e CP 02.

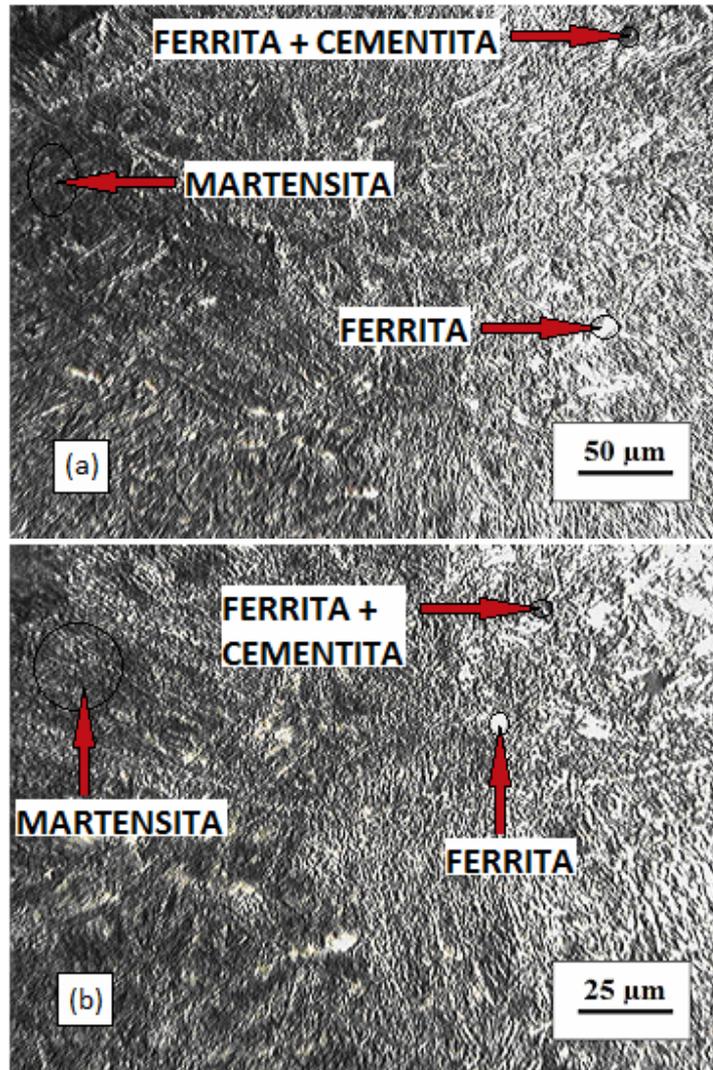
Figura 6.45 – Micrografias do metal base de CP 09, (a) 200x e (b) 400x



Nota: corpo de prova passou pelo processo de soldagem autógena sem pré-aquecimento.

Fonte: Produzido pelos autores.

Figura 6.46 – Micrografias da região entre ZTA e ZF de CP 09, (a) 200x e (b) 400x



Legenda: Lado esquerdo representa a ZTA e lado direito representa a ZF.

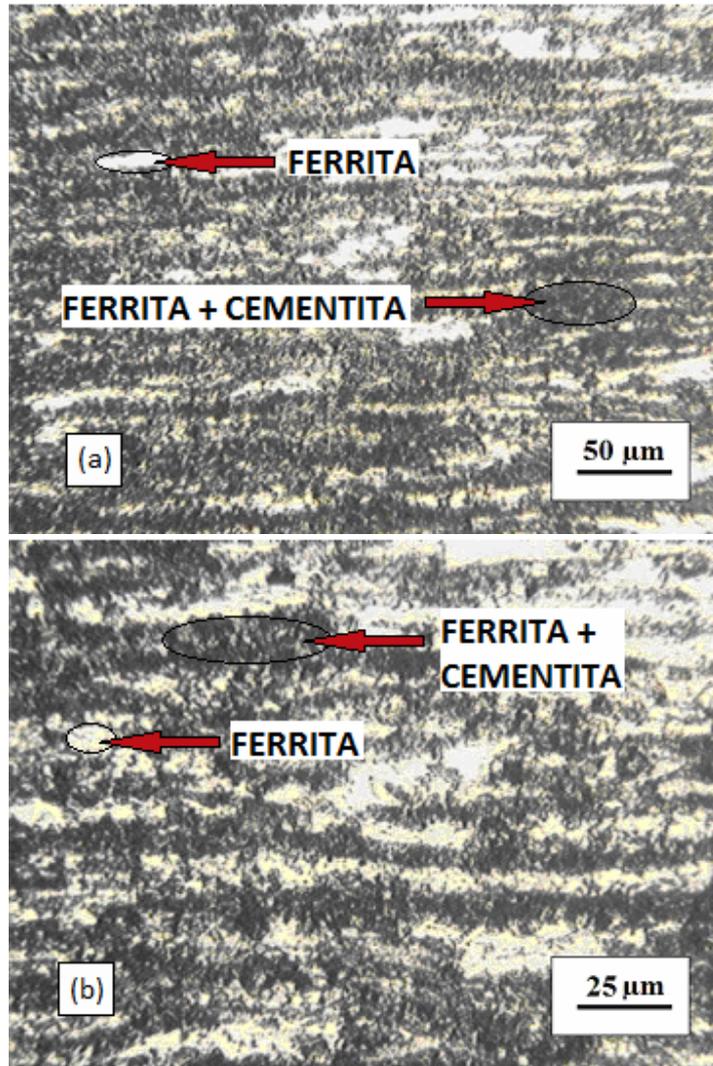
Nota: corpo de prova passou pelo processo de soldagem autógena sem pré-aquecimento.

Fonte: Produzido pelos autores.

As tonalidades da ZTA e ZF estão bem diferentes, evidenciando a presença de constituintes diferentes. Sabendo que na ZTA o resfriamento é rápido, está clara a presença de martensita, e já na ZF, há a presença de ferrita e perlita organizados de maneira diferente do metal de base, uma vez que o resfriamento ao ar também não permitiu uma grande organização das fases na ZF, mas foi o suficiente para o aparecimento de fases formadas por mecanismos difusionais.

As Figuras 6.47 a 6.52 representam micrografias do metal base e da região entre ZTA e ZF de CP 10, CP 11 e CP 12, amostras soldadas sem material de deposição e com pré-aquecimento.

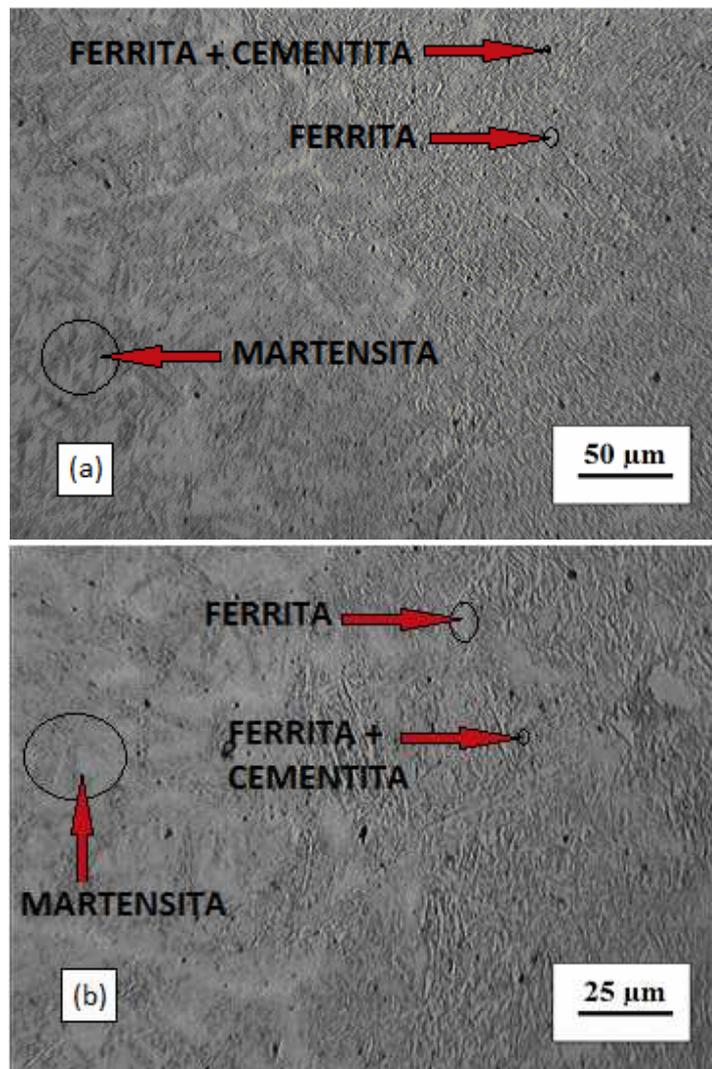
Figura 6.47 – Micrografias do metal base de CP 10, (a) 200x e (b) 400x



Nota: corpo de prova passou pelo processo de soldagem autógena com pré-aquecimento.

Fonte: Produzido pelos autores.

Figura 6.48 – Micrografias da região entre ZTA e ZF de CP 10, (a) 200x e (b) 400x

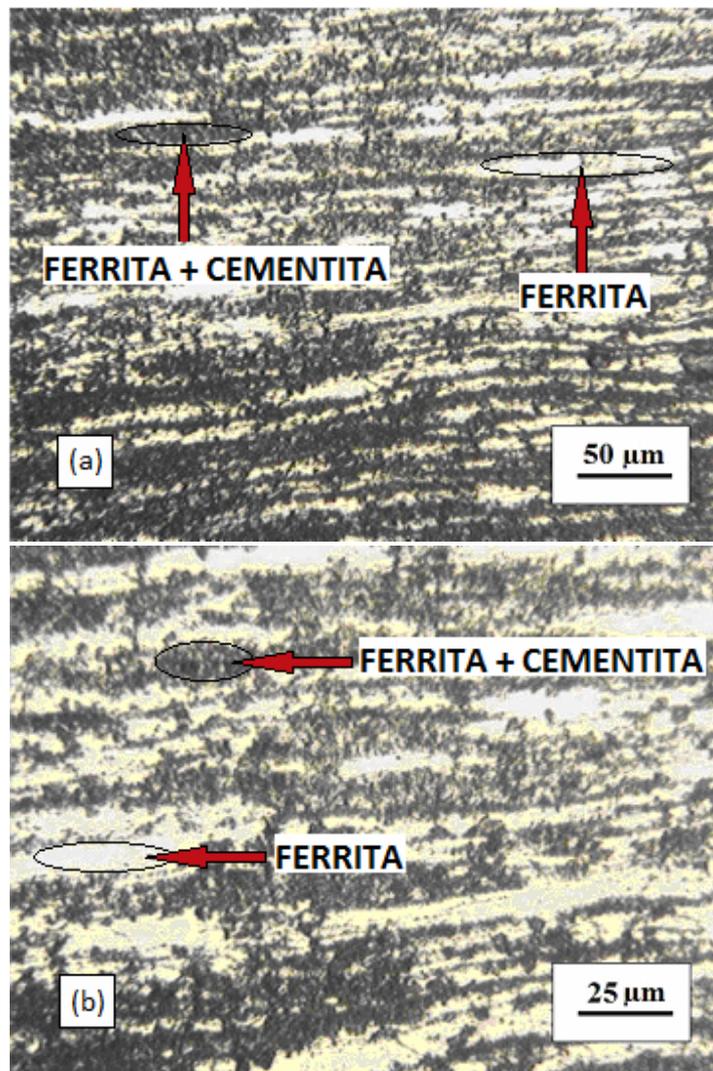


Legenda: Lado esquerdo representa a ZTA e lado direito representa a ZF.

Nota: corpo de prova passou pelo processo de soldagem autógena com pré-aquecimento.

Fonte: Produzido pelos autores.

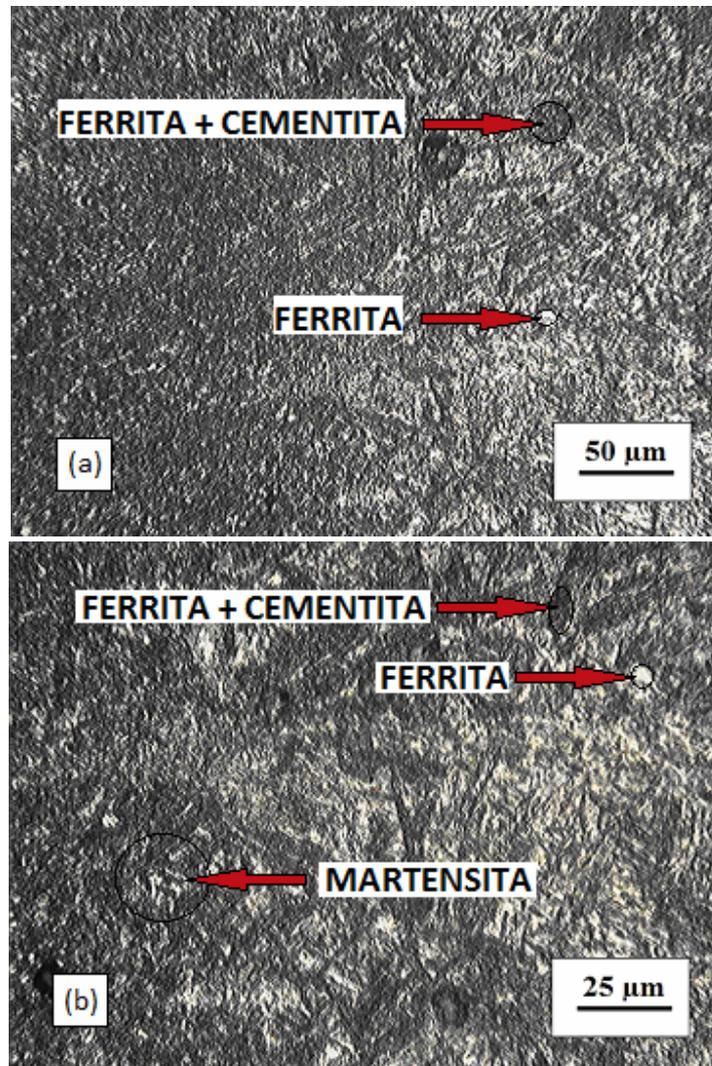
Figura 6.49 – Micrografias do metal base de CP 11, (a) 200x e (b) 400x



Nota: corpo de prova passou pelo processo de soldagem autógena com pré-aquecimento.

Fonte: Produzido pelos autores.

Figura 6.50 – Micrografias da região entre ZTA e ZF de CP 11, (a) 200x e (b) 400x

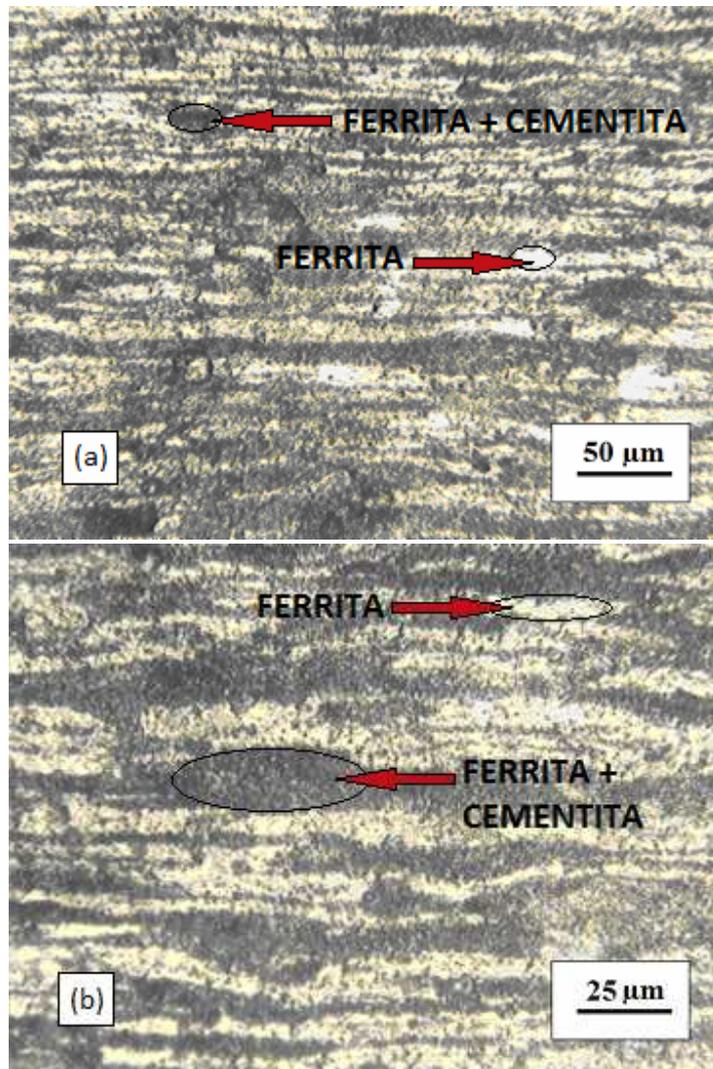


Legenda: Lado esquerdo representa a ZTA e lado direito representa a ZF.

Nota: corpo de prova passou pelo processo de soldagem autógena com pré-aquecimento.

Fonte: Produzido pelos autores.

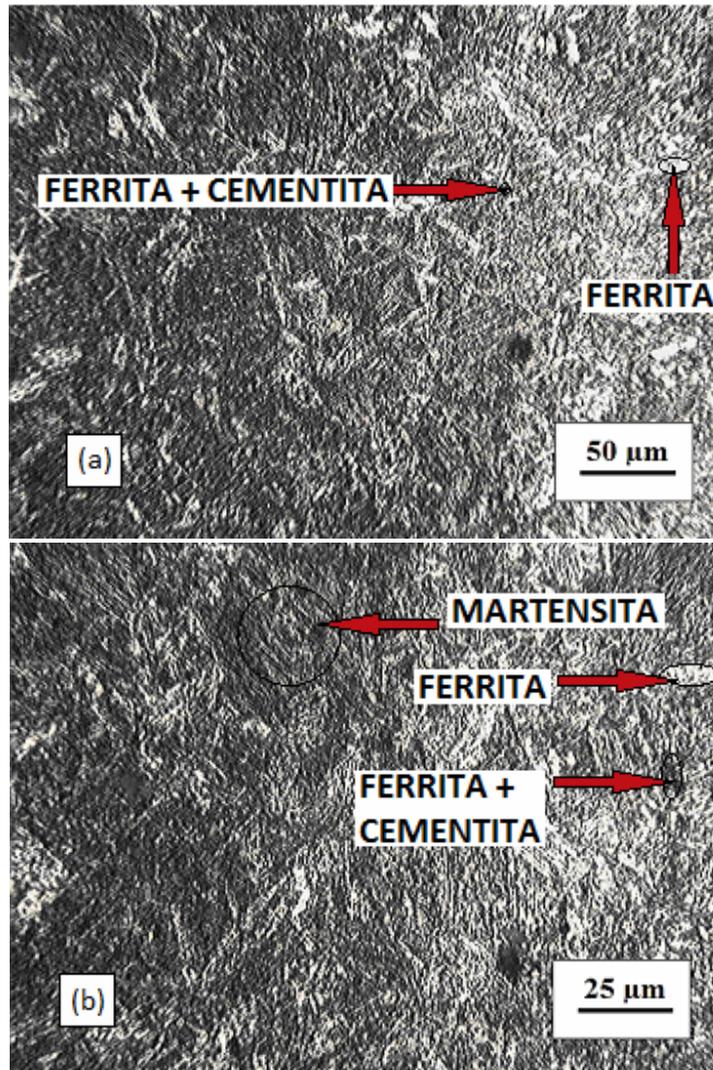
Figura 6.51 – Micrografias do metal base de CP 12, (a) 200x e (b) 400x



Nota: corpo de prova passou pelo processo de soldagem autógena com pré-aquecimento.

Fonte: Produzido pelos autores.

Figura 6.52 – Micrografias da região entre ZTA e ZF de CP 12, (a) 200x e (b) 400x



Legenda: Lado esquerdo representa a ZTA e lado direito representa a ZF.

Nota: corpo de prova passou pelo processo de soldagem autógena com pré-aquecimento.

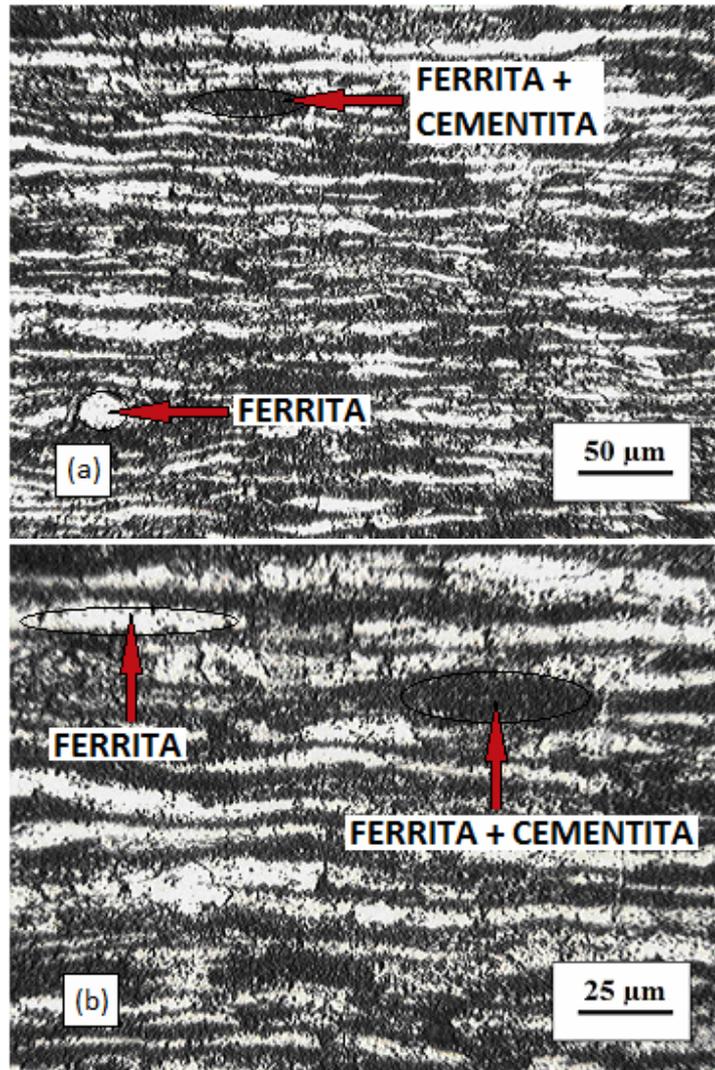
Fonte: Produzido pelos autores.

Pelas micrografias de CP 10, é possível determinar a presença de martensita na ZTA. Há presença de ferrita e perlita na ZF, como nas outras amostras. Já nas micrografias de CP 11 e CP 12, a verificação da presença da martensita está mais difícil, e, além disto, apesar de ser possível a visualização de uma região entre ZTA e ZF, a ZTA ainda possui resquícios de ferrita que vai

diminuindo gradualmente, diferente da região que separa ZTA e ZF dos corpos de prova soldados, onde há uma delimitação mais marcante.

A Figura 6.53 exhibe as micrografias de CP 13. Este corpo de prova foi utilizado para a realização dos ensaios de dobramento, metalográficos e de medição de microdureza, para se realizar uma comparação entre o tubo como recebido e os corpos de prova submetidos a processos de soldagem com e sem pré-aquecimento. A microestrutura deste tubo é similar à microestrutura do metal base de todas as amostras soldadas. Esta é uma evidência que o metal base não é afetado pela temperatura de soldagem. O formato alongado dos grãos era o esperado, uma vez que as micrografias foram retiradas das seções longitudinais das amostras.

Figura 6.53 – Micrografias de CP 13, (a) 200x e (b) 400x



Nota: corpo de prova da forma como foi recebido.

Fonte: Produzido pelos autores.

6.2.4 Medições de microdureza Vickers

A Tabela 6.3 contem os valores de microdureza medidos em todas as amostras.

Tabela 6.3 – Valores de microdureza medidos em amostras de tubos de aço AISI 4130

Valores de microdureza fornecidos em Vickers (HV), condições* dos corpos de prova:

**	(A)		(B)			(C)			(A)	(D)			(E)
0,0	262	287	276	235	251	240	208	266	294	295	295	295	228
0,3	269	380	273	211	243	254	198	335	301	418	327	304	219
0,6	329	340	278	248	263	247	234	327	259	433	337	320	231
0,9	332	401	251	270	275	229	209	282	291	407	331	302	233
1,2	308	351	262	236	234	230	208	302	280	353	316	298	235
1,5	260	373	283	252	237	217	198	315	241	325	329	273	239
1,8	309	372	284	269	209	261	223	316	346	346	312	366	234
2,1	333	339	264	252	362	422	224	509	354	324	315	302	251
2,4	332	377	283	226	384	424	260	566	352	359	355	300	215
2,7	398	420	373	341	393	443	321	569	288	424	406	293	214
3,0	406	376	345	354	411	431	272	619	383	332	447	338	181
3,3	388	334	460	365	398	420	263	611	360	457	482	304	229
3,6	391	286	428	431	387	390	274	499	364	492	475	312	256
3,9	399	277	447	343	361	462	326	487	352	413	465	320	271
4,2	392	277	417	346	327	396	354	428	401	420	429	335	238
4,5	431	250	447	324	299	386	277	422	420	331	393	308	239
4,8	436	284	414	290	269	332	317	465	405	442	405	277	241
5,1	478	297	426	286	269	359	416	336	360	395	387	274	241
5,4	438	260	364	230	270	293	372	380	351	421	360	278	242
5,7	464	243	339	247	246	268	336	321	343	394	340	281	245
6,0	423	253	361	236	268	274	311	315	302	342	342	337	250
6,3	456	246	325	245	262	230	284	283	299	265	317	262	268
6,6	435	261	288	246	253	229	284	274	280	294	301	250	237
6,9	435	239	286	236	247	219	241	214	265	298	288	252	264
7,2	333	209	298	245	246	221	264	246	252	290	291	237	270

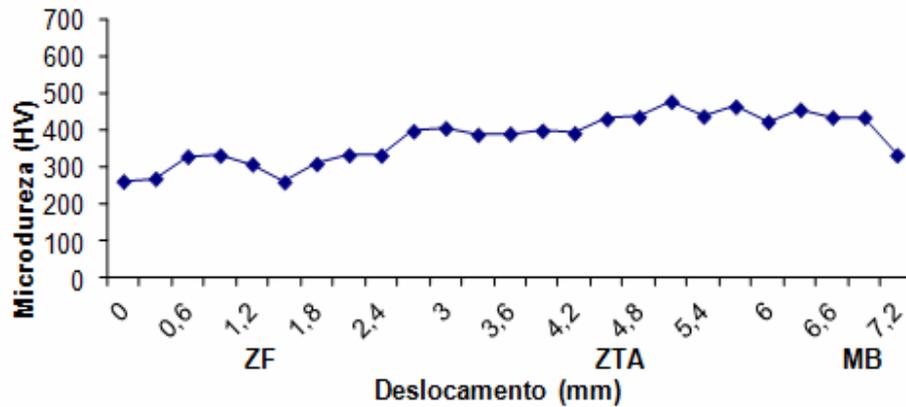
* Condições: (A) solda autógena sem pré-aquecimento, (B) soldado com material de deposição e com pré-aquecimento, (C) soldado com material de deposição e sem pré-aquecimento, (D) Solda autógena com pré-aquecimento e (E) recebido.

** Afastamento (mm).

Fonte: Produzido pelos autores.

As Figuras 6.54 e a Figura 6.55 representam o perfil de medição de microdureza Vickers de CP 01 e CP 02, respectivamente, corpos de prova expostos ao arco elétrico sem pré-aquecimento.

Figura 6.54 – Medidas de microdureza Vickers em função do deslocamento, CP 01

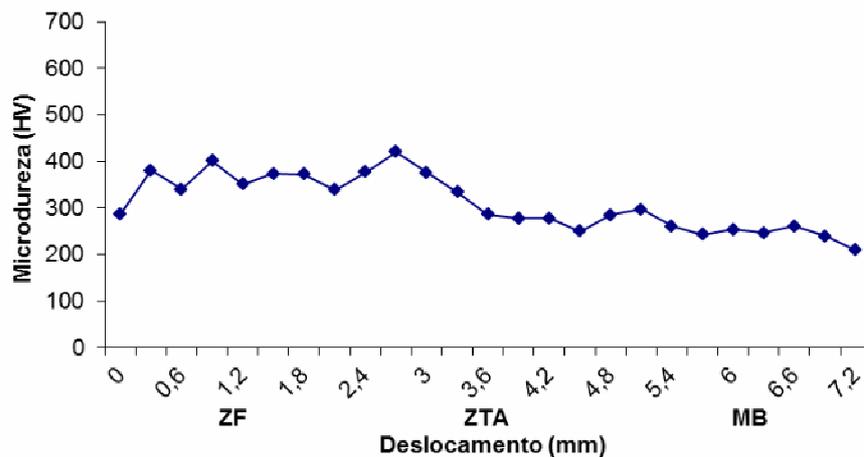


Nota: amostra soldada sem material de deposição e sem pré-aquecimento.

Legenda: ZF (zona fundida), ZTA (zona termicamente afetada), MB (metal base).

Fonte: Produzido pelos autores.

Figura 6.55 – Medidas de microdureza Vickers em função do deslocamento, CP 02



Nota: amostra soldada sem material de deposição e sem pré-aquecimento.

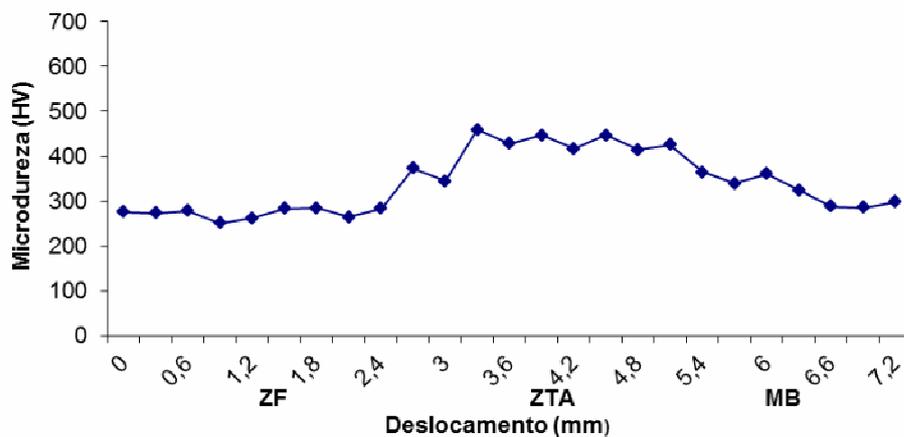
Legenda: ZF (zona fundida), ZTA (zona termicamente afetada), MB (metal base).

Fonte: Produzido pelos autores.

As medições de microdureza para CP 01 e CP 02 não formaram um perfil da maneira esperada para cordões de solda. O que era esperado é que a zona fundida apresentasse uma medida de microdureza similar ao metal base, pois deveria haver a presença dos mesmos constituintes, e na ZTA, houvesse um acréscimo do valor de microdureza, devido à presença da martensita, que é uma fase mais dura. Os perfis de medidas de microdureza evidenciam ainda mais que CP 01 e CP 02 não possuem definições claras de onde começa e termina a ZTA e ZF, assim como a macrografia e micrografia também evidenciaram.

As Figuras 6.56, 6.57 e 6.58 exibem perfis de medidas de microdureza realizados em amostras de tubos soldados com pré-aquecimento, CP 03, CP 04 e CP 05, respectivamente.

Figura 6.56 – Medidas de microdureza Vickers em função do deslocamento, CP 03

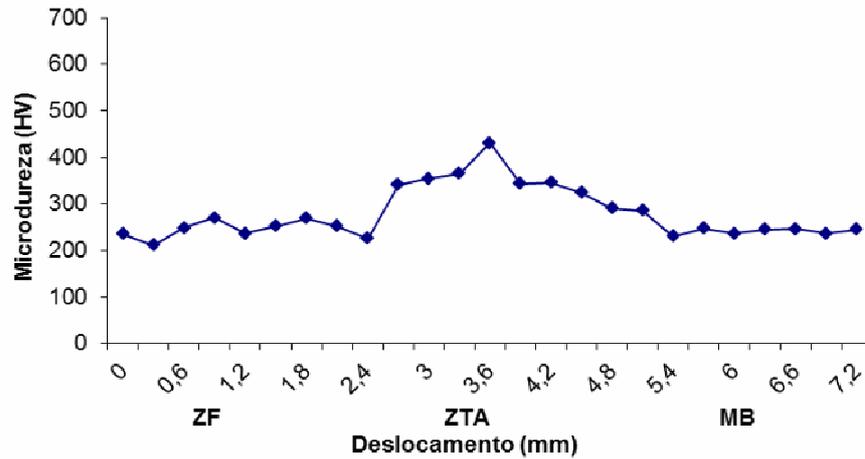


Nota: amostra soldada com material de deposição e com pré-aquecimento.

Legenda: ZF (zona fundida), ZTA (zona termicamente afetada), MB (metal base).

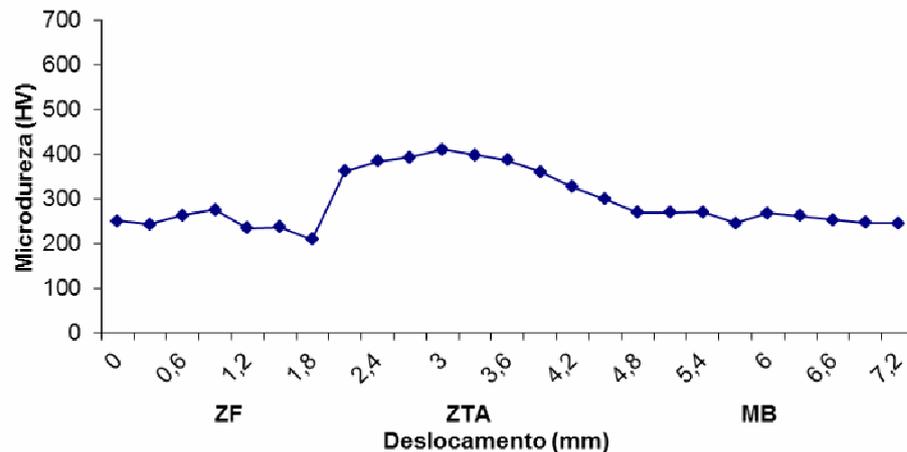
Fonte: Produzido pelos autores.

Figura 6.57 – Medidas de microdureza Vickers em função do deslocamento, CP 04



Nota: amostra soldada com material de deposição e com pré-aquecimento.
 Legenda: ZF (zona fundida), ZTA (zona termicamente afetada), MB (metal base).
 Fonte: Produzido pelos autores.

Figura 6.58 – Medidas de microdureza Vickers em função do deslocamento, CP 05

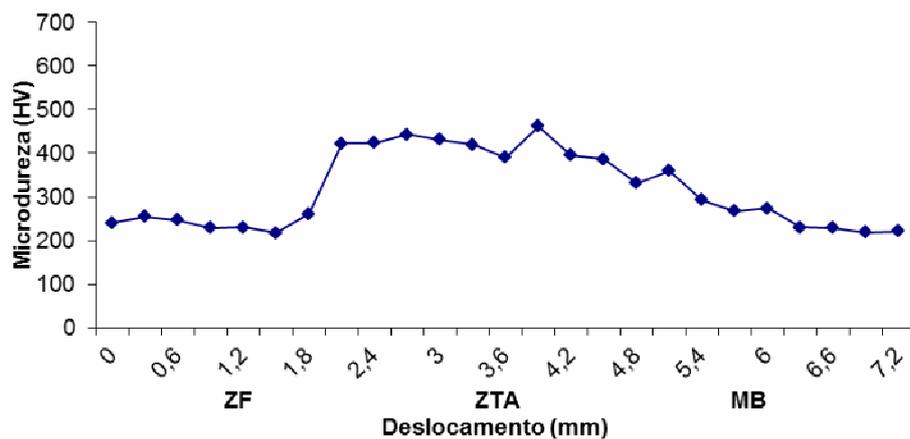


Nota: amostra soldada com material de deposição e com pré-aquecimento.
 Legenda: ZF (zona fundida), ZTA (zona termicamente afetada), MB (metal base).
 Fonte: Produzido pelos autores.

As medidas da zona fundida e do metal base estão próximas e estão entre 200 HV e 300 HV, assim como foram os resultados das medidas de microdureza das seções transversais e longitudinais do tubo como recebido e do tubo pré-aquecido à 200°C. Já a zona termicamente afetada resultou em valores de microdureza superiores entre 300 HV e 500 HV, evidenciando a presença de martensita, assim como foi visualizado pelas micrografias.

As Figuras 6.59, 6.60 e 6.61 exibem resultados de medições de microdureza para amostras soldadas sem pré-aquecimento, CP 06, CP 07 e CP 08, respectivamente.

Figura 6.59 – Medidas de microdureza Vickers em função do deslocamento, CP 06

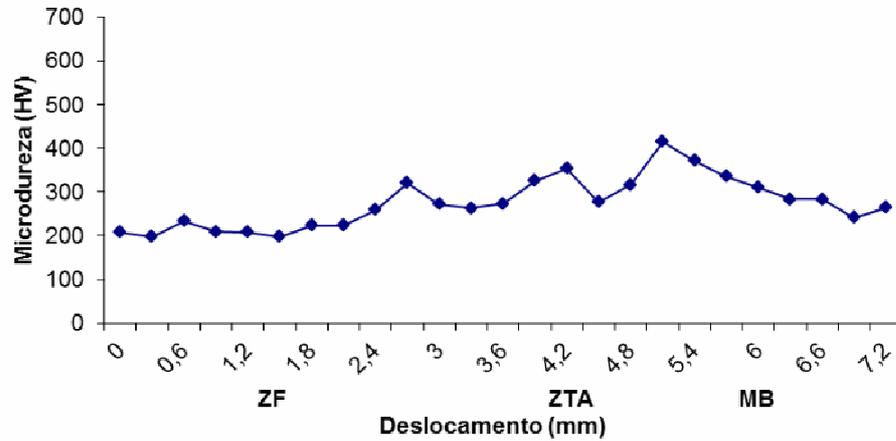


Nota: amostra soldada com material de deposição e sem pré-aquecimento.

Legenda: ZF (zona fundida), ZTA (zona termicamente afetada), MB (metal base).

Fonte: Produzido pelos autores.

Figura 6.60 – Medidas de microdureza Vickers em função do deslocamento, CP 07

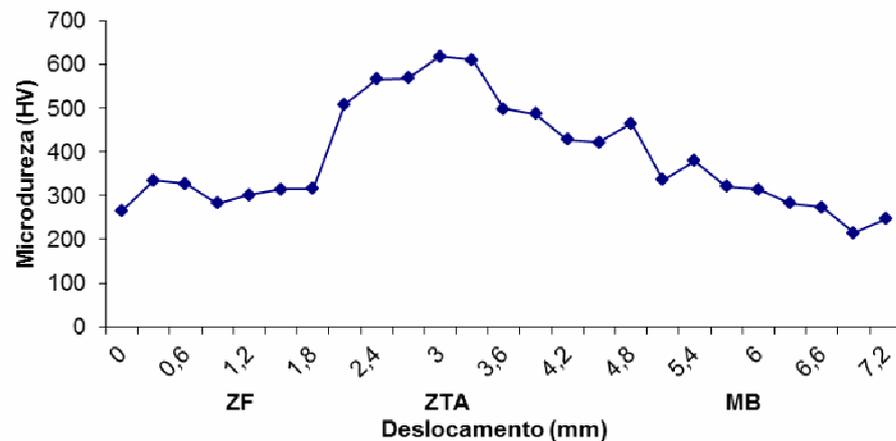


Nota: amostra soldada com material de deposição e com pré-aquecimento.

Legenda: ZF (zona fundida), ZTA (zona termicamente afetada), MB (metal base).

Fonte: Produzido pelos autores.

Figura 6.61 – Medidas de microdureza Vickers em função do deslocamento, CP 08



Nota: amostra soldada com material de deposição e com pré-aquecimento.

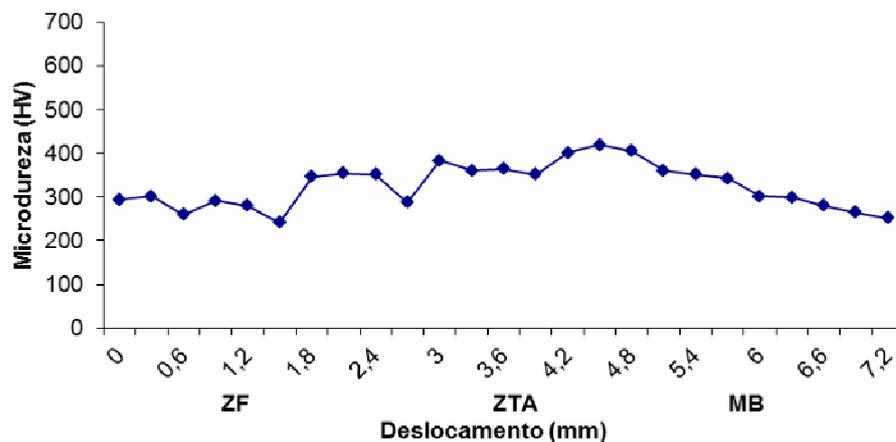
Legenda: ZF (zona fundida), ZTA (zona termicamente afetada), MB (metal base).

Fonte: Produzido pelos autores.

Os valores de microdureza da ZTA de CP 07 ficaram mais irregulares que os das outras amostras soldadas, porém, ainda assim, constitui em valores maiores do que a zona fundida e o metal base. Já as amostras CP 05 e principalmente a amostra CP 08, resultaram em valores de microdureza na ZTA superiores aos valores da ZTA dos corpos de prova soldados com pré-aquecimento. Portanto, existe uma quantidade maior de martensita e/ou há a presença de uma martensita mais deformada. A martensita é uma fase frágil, portanto, é bem provável que a ZTA das amostras soldadas sem pré-aquecimento seja mais frágil. Além disto, CP 07 e CP 08 trincaram durante o ensaio de dobramento, uma descontinuidade no cordão de solda pode comprometer toda a estrutura do tubo, uma vez que a trinca se propaga causando a fratura do material, o que não é desejável em aplicações estruturais. Portanto, em relação à soldagem GTAW, neste caso, o pré-aquecimento mostrou-se favorável.

A Figura 6.62 exibe os valores de microdureza em função do deslocamento obtidos em um corpo de prova soldado sem material de deposição e sem pré-aquecimento, CP 09.

Figura 6.62 – Medidas de microdureza Vickers em função do deslocamento, CP 09



Nota: amostra soldada sem material de deposição e sem pré-aquecimento.

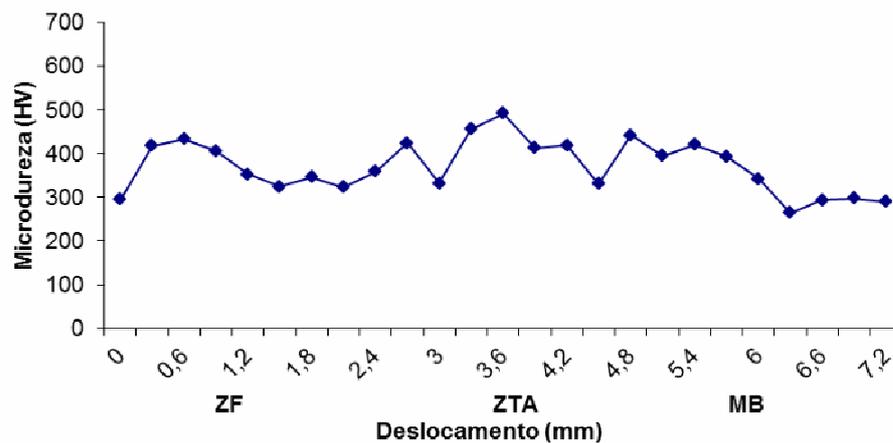
Legenda: ZF (zona fundida), ZTA (zona termicamente afetada), MB (metal base).

Fonte: Produzido pelos autores.

Os valores de microdureza de CP 09 também não estão dentro do perfil esperado para uma junta soldada, evidenciando que a soldagem sem material de deposição pode gerar amostras com diferenças nas propriedades em relação às amostras soldadas com material de deposição. Há uma tendência do aumento da dureza na ZTA, porém não há uma definição exata de onde termina a zona fundida e onde começa a ZTA, assim como foi evidenciado pela macrografia.

A Figura 6.63, 6.64 e 6.65 exibem os valores de microdureza medidos em amostras com solda autógena com pré-aquecimento, CP 10, CP 11 e CP 12.

Figura 6.63 – Medidas de microdureza Vickers em função do deslocamento, CP 10

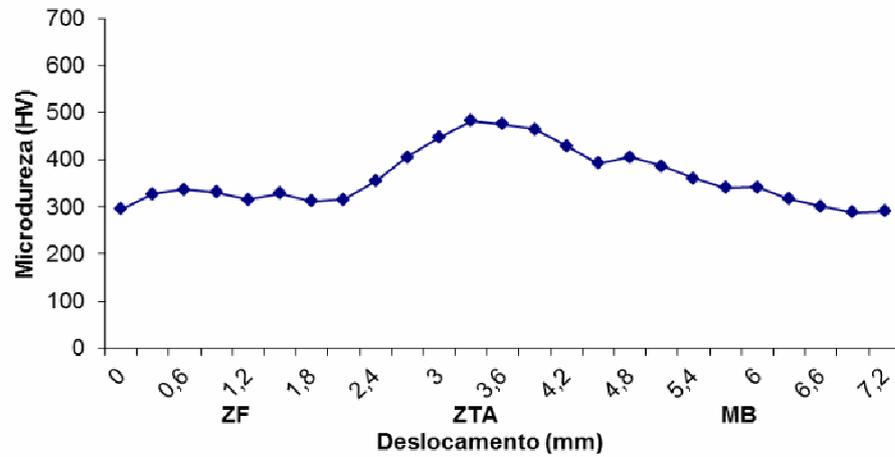


Nota: amostra soldada sem material de deposição e com pré-aquecimento.

Legenda: ZF (zona fundida), ZTA (zona termicamente afetada), MB (metal base).

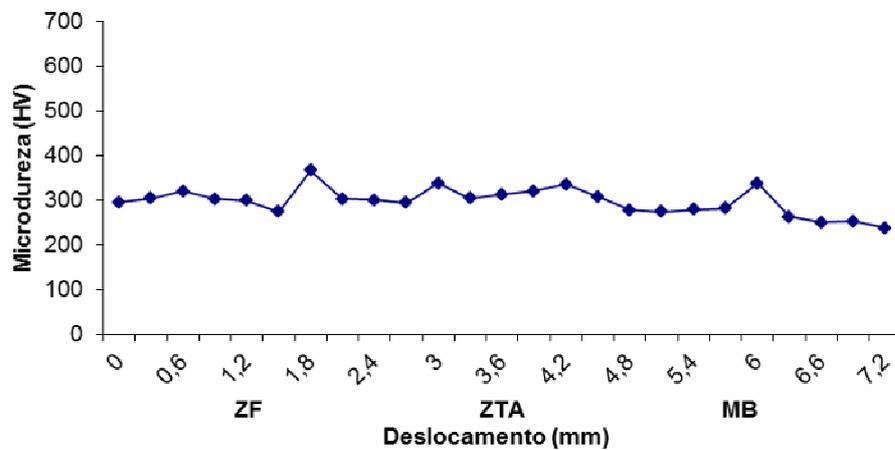
Fonte: Produzido pelos autores.

Figura 6.64 – Medidas de microdureza Vickers em função do deslocamento, CP 11



Nota: amostra soldada com material de deposição e com pré-aquecimento.
 Legenda: ZF (zona fundida), ZTA (zona termicamente afetada), MB (metal base).
 Fonte: Produzido pelos autores.

Figura 6.65 – Medidas de microdureza Vickers em função do deslocamento, CP 12



Nota: amostra soldada com material de deposição e com pré-aquecimento.
 Legenda: ZF (zona fundida), ZTA (zona termicamente afetada), MB (metal base).
 Fonte: Produzido pelos autores.

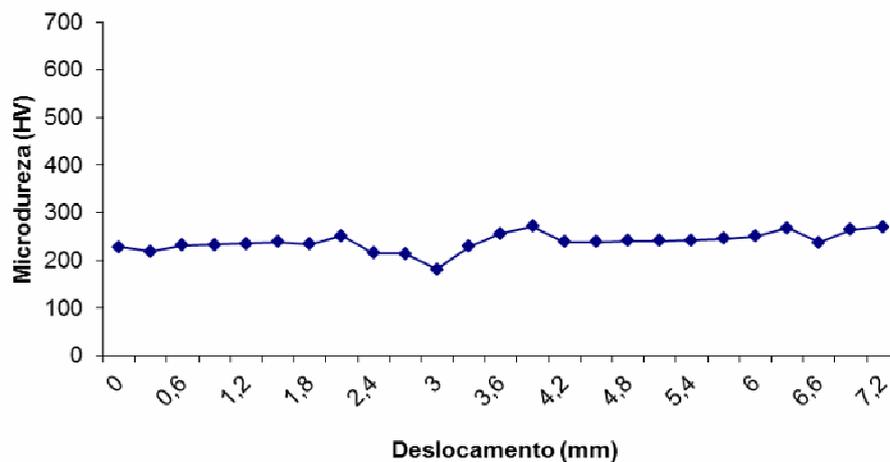
Os valores de microdureza de CP 10 ficaram bem irregulares, não mostrando qualquer tendência, muito menos a definição da delimitação entre zona fundida e ZTA. Os valores de microdureza de CP 12 também se mostraram irregulares, porém, há uma tendência em valores entre 300 HV e

400 HV, que já é mais duro do que o material da forma como foi recebida, porém, não é possível determinar um limite entre zona fundida e ZTA. Já o CP 11 mostrou um perfil de medidas de microdureza similar aos corpos de prova soldados, onde a ZF possui valores similares ao metal base, e a ZTA possui valores mais altos de microdureza. No entanto, há uma subida suave dos valores entre a ZF e ZTA, mostrando que a microestrutura foi se modificando de forma gradual e não marcante, como é a delimitação de ZTA e ZF em corpos de prova soldados.

Pela análise das medidas de microdureza e das micrografias, não é possível determinar se o pré-aquecimento é mais adequado na soldagem sem material de deposição (solda autógena). Entretanto, o CP 09 sofreu fratura durante o ensaio de dobramento, e os corpos de prova submetidos ao pré-aquecimento não sofreram fratura, este fato pode evidenciar que o pré-aquecimento é um processo que influencia, neste caso.

A Figura 6.66 exibe o perfil de microdureza de uma amostra de tubo como recebido, CP 13. Os valores tendem a ser próximos de 200 HV, assim como as medidas de microdureza realizadas nas seções transversais e longitudinais do tubo como recebido e do tubo pré-aquecido.

Figura 6.66 – Medidas de micro dureza Vickers em função do deslocamento, CP 13



Fonte: Produzido pelos autores.

7 CONCLUSÃO

Pela análise visual dos cordões de soldas formados na união dos tubos de aço AISI 4130 pelo processo GTAW, pôde ser verificado que os cordões de solda apresentaram-se homogêneos, não apresentaram falta de fusão e tiveram uma penetração adequada. Portanto, a soldabilidade deste tubo sem chanfro mostrou-se satisfatória.

Em relação à análise das microestruturas, a seção longitudinal do tubo de aço AISI 4130 apresentou grãos em formato alongado, diferente da seção transversal, e isto ocorreu, porque o tubo passou pelo processo de laminação em seu processamento. Todas as amostras apresentaram metal base contendo, basicamente, dois constituintes: ferrita e um constituinte contendo ferrita e cementita (perlita). Já a zona termicamente afetada apresentou grande quantidade de martensita. A zona fundida dos cordões de solda também apresentou dois constituintes: ferrita e um constituinte formado por ferrita e cementita, porém, organizados de maneira diferente do que os constituintes do metal base.

Em relação à influência do pré-aquecimento à 200°C na soldagem de tubos de aço AISI 4130 pelo processo GTAW sem material de deposição, não foi possível definir se o pré-aquecimento é capaz de promover algum benefício à junta soldada, mesmo que um corpo de prova que não passou pelo pré-aquecimento tenha sofrido fratura durante o ensaio de dobramento.

Por outro lado, o pré-aquecimento à 200°C na soldagem de tubos de aço AISI 4130 pelo processo GTAW com material de deposição mostrou-se mais adequado do que a realização da soldagem sem pré-aquecimento. Duas amostras soldadas com material de deposição sem pré-aquecimento sofreram fratura durante o ensaio de dobramento, e, além disto, a zona termicamente afetada das amostras soldadas sem pré-aquecimento apresentou valores de microdureza maiores, evidenciando maior presença de martensita, e com isto, é possível concluir que a soldagem sem pré-aquecimento mostrou-se menos adequada. Nenhuma amostra soldada com material de deposição e com pré-aquecimento sofreu fratura durante o ensaio de dobramento, portanto, a utilização do pré-aquecimento mostrou-se adequada.

REFERÊNCIAS

1. ABBASCHIAN, R.; ABBASCHIAN, L.; REED HILL, R. **Physical metallurgy principles**. 4 ed. Stamford: Cengage Learning, 2009. 750 p.
2. ANTUNES, J. O. **Comparação entre eletrodos de tungstênio puro e dopados no processo de soldagem GTAW com CA onda retangular**. 1999. 110 p. Dissertação (Mestrado) – Curso de pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
3. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 87: Aço carbono e ligados para construção mecânica – designação e composição química**. Rio de Janeiro, 2000.
4. AMERICAN WELDING SOCIETY. **ISO 6848:2004: Specification for tungsten and tungsten alloy electrodes for arc welding and cutting**. 7 ed. Miami, 2009.
5. CALLISTER, W. D. **Fundamentals of materials science and engineering**. 5. ed. New York: John Wiley & Sons, 2001. 920 p.
6. COLPAERT, H. **Metalografia: dos produtos siderúrgicos comuns**. 4. ed. São Paulo: Blucher, 2008. 652 p.
7. FORTES, C. **Metalurgia da Soldagem**. Contagem: ESAB. 2004. 94 p.
8. FRANÇA, J. L.; VASCONCELLOS, A. C. **Manual para normalização de publicações técnico-científicas**. 8. ed. Belo Horizonte: Editora da UFMG, 2009. 260 p.
9. GUICHARD, J. **La soudure à l'arc électrique: des principes aux applications**. 3 ed. Paris: Eyrolles, 2012. 125 p.
10. KOU, S. **Welding metallurgy**. 2. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2003. 461 p.

11. LÉVESQUE, P. **Procédés de soudage à l'c arc**. 1 ed. Paris: De Boeck, 2008. 170 p.
12. LIMA, F. B. **Microestrutura e tenacidade de aços baixa liga tipo 41XX**: uma abordagem quantitativa. 2006. 188 p. Dissertação (Doutorado) – Programas de Pós-Graduação de Engenharia, Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
13. LOPES, W. G. **Efeito da temperatura de pré-aquecimento e características do pulso na microestrutura de aço estrutural de alta resistência e baixa liga soldado com arco elétrico e proteção gasosa**. 2008. 159p. Dissertação (Mestrado) – Mestrado em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da UNESP, Universidade Estadual Paulista, Bauru.
14. MACHADO, I. G. **Soldagem e técnicas conexas: processos**. Porto Alegre: editado pelo autor, 1996. 477 p.
15. MODENESE, P. J.; VILLANI, P. M. **Soldagem I: introdução aos processos de soldagem**. Belo Horizonte: Editora da UFMG, 2006, 51 p.
16. OSIDACZ, N. C.; FOLKL, P. **Análise mecânica e microestrutural em estruturas tubulares aeronáuticas soldadas de aço ABNT 4130**. 2011. 43p. Monografia – Graduação em Engenharia de Materiais, Faculdade de Engenharia da UNESP, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá.
17. STRASSER, V. **A soldagem moderna dos metais ferrosos pelo arco elétrico**. 1. ed. Rio de Janeiro: AO LIVRO TÉCNICO, 1963. 296 p.
18. VILLANI, P. M.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem: fundamentos e tecnologia**. 3. ed. Belo Horizonte: Editora da UFMG, 2011. 364 p.
19. TISZA, M. **Physical metallurgy for engineers**. 3 ed. Londres: ASM International e Freund Publishing House, 2002. 404 p.

20. WAINER, E.; BRANDI, S. D.; MELLO, F. D. H. **Soldagem: processos e metalurgia**. 1. ed. São Paulo: Blucher, 1992. 494 p.

21. WEMAN, K. **Procédés de soudage**. 1 ed. Paris: Dunod, 2012, 344 p.