

Daniel Marques da Silva

Análise das propriedades mecânicas e metalúrgicas na soldagem dissimilar entre os materiais 5Cr-0,5Mo e 317L, através das técnicas de deposição controlada e convencional com e sem tratamento térmico de alívio de tensões.

Monografia apresentada ao Programa de Educação Continuada em Engenharia da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para conclusão de curso de Especialização.

São Paulo

Abril / 2014

Daniel Marques Da Silva

(Engenheiro Industrial Mecânico, UFSJ, 2008).

Análise das propriedades mecânicas e metalúrgicas na soldagem dissimilar entre os materiais 5Cr-0,5Mo e 317L, através das técnicas de deposição convencional e controlada com e sem tratamento térmico de alívio de tensões.

Monografia apresentada ao Programa de Educação Continuada em Engenharia da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para conclusão de curso de Especialização.

Área de Concentração: Engenharia da Soldagem

Orientador: Engenheiro André Luiz de Carvalho

Co-orientador: Dr. Sérgio Duarte Brandi

São Paulo

Abril / 2014

"O homem é do tamanho de seus sonhos."

Fernando Pessoa

DEDICATÓRIA

A minha amada esposa, Flávia Ribeiro, pela paciência e incentivo,

Ao meu amado filho, João Bernardes, por me ensinar

a ver a vida de uma forma diferente,

A minha mãe, Alda Bernardes, pela educação

e formação de caráter.

AGRADECIMENTOS

Ao Engenheiro André Luiz de Carvalho da empresa Petróleo Brasileiro S.A. - PETROBRAS, orientador desse trabalho, pela atenção prestada, dedicação e apoio ao longo do processo de elaboração.

Ao Prof. Dr. Sérgio Brandi, pela dedicação mostrada com todos os alunos do curso de Pós-graduação em Engenharia de Soldagem.

Aos companheiros de sala, pelos momentos de descontração e auxílio nas aulas.

Ao doutorando Dany Michell Andrade Centeno pela confecção e produção das imagens dos corpos de prova de macro, micrografia e ensaios de microdureza.

À TECNORED, especialmente ao CEO Dr. Vinicius Mendes pelo apoio na continuidade do curso.

CURRICULUM VITAE

Formação

Graduado em Engenharia Industrial Mecânica. UFSJ, conclusão em 2008.

Experiência

- 2014 – Engenheiro Mecânico, Tecnomont Montagens Industriais. Execução de atividades de montagem industrial, Responsável Técnico pela obra de duas moagens de cimento e expedição.
- 2012-2013 – Gerente de Execução de Manutenção, TecnoRed Desenvolvimento Tecnológico. Execução de atividades de manutenção e montagem industrial.
- 2011-2012 – Engenheiro de Planejamento, MCM. Montagens eletromecânicas e paradas de manutenção na planta de extração de bauxita em Juruti/PA.
- 2009-2011 – Engenheiro de Manutenção Mecânica, CSN. Montagem eletromecânica e manutenção de planta de cimento.

RESUMO

O estudo visa avaliar as propriedades mecânicas e metalúrgicas de uniões dissimilares heterogêneas através de soldagem multipasse. Os metais de base são de especificação ASME SA-213 Grau P5 e ASME SA-213 TP317L, e o metal de adição classificação AWS ERNiCr3. O objetivo é suprimir o procedimento de Tratamento Térmico de Alívio de Tensões (TTAT) na soldagem de tubos de serpentinas de fornos de processo em refinarias de petróleo.

Para a soldagem dos corpos de provas foram empregadas as técnicas de deposição convencional com e sem tratamento térmico de alívio de tensões e a técnica de deposição controlada preconizada pelo Código ASME Seção IX QW-290, utilizando o processo de soldagem Arco Tungstênio.

Os corpos de prova foram submetidos à temperatura de 450°C, equivalente à temperatura de pele observada nos tubos das serpentinas dos fornos tubulares de unidade de destilação de petróleo durante operação. Os tempos de exposição definidos foram de 1, 10 e 100 horas.

Pretende-se avaliar as propriedades mecânicas e metalúrgicas dos corpos de teste na condição "como soldado" e também após exposição à temperatura de 450° C para os patamares de tempo especificados (1, 10 e 100 horas).

ABSTRACT

The study aims to evaluate the mechanical and metallurgical properties of heterogeneous dissimilar joints through multipass welding. The base metals are ASME SA-213 Grade P5 and ASME SA-213 TP317L, and the filler metal AWS classification ERNiCr3. The objective is to avoid the procedure of Post Weld Heat Treatment (PWHT) in the welding of tube walls of coils of a tubular furnace from crude oil distillation unit.

The specimens were welded using conventional welding technique with PWHT, conventional welding technique without PWHT and temper bead technique recommended by ASME Code Section IX QW-290, using the Gas Tungsten Arc Welding process.

The specimens were exposed to the temperature of 450°C, corresponding to the temperatures experienced by tube walls of coils of a tubular furnace from crude oil distillation unit in operation. The exposure times set were 1, 10 and 100 hours.

It intended to evaluate the mechanical and metallurgical properties of the test coupon as welded and after exposed to the temperature of 450°C to the levels of time specified (1, 10 and 100 hours).

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Ilustração das várias regiões da ZAC para uma junta soldada de topo [21].	32
Figura 2.2: Ilustração esquemática demonstrando as diferentes subzonas da região de grão grosseiro na ZAC de uma solda multipasse. (A) Posição das subzonas em relação ao metal de base e metal de solda e a interação com os passes subsequentes de cobertura. (B) temperaturas que cada região foi submetida durante o reaquecimento. (C) Microestruturas das diferentes regiões [21].	34
Figura 2.3: Ilustração da técnica multipasse com aplicação da meia camada [24].	36
Figura 2.4: Ilustração das diferentes regiões durante deposição da primeira camada: metal de solda (a), as regiões de grãos grosseiros (b), região de grãos refinados (c) e região intercrítica (d) [21].	36
Figura 2.5: Ilustração da técnica de deposição controlada dupla camada.	37
Figura 4.1: ASME seção IX Ano 2010, QW.462.12, pág. 176	49
Figura 4.2: Linha de impressões através da ZF, linha de fusão e ZAC.	50
Figura 4.3: Imagem ilustrando as duas impressões de microdureza adjacentes à linha de fusão.	50
Figura 4.4: Detalhe da impressão na ZAC do MB 5Cr-0,5Mo.	51
Figura 5.1: CP01 - Sem exposição à temperatura de trabalho.	53
Figura 5.2: CP02 - Tempo de exposição 1 hora.	54
Figura 5.3: CP03 - Tempo de exposição 10 horas.	54

Figura 5.4: CP04 - Tempo de exposição 100 horas.	55
Figura 5.5: CP05 - Sem exposição à temperatura de trabalho.	55
Figura 5.6: CP06 - Tempo de exposição 1 hora.	56
Figura 5.7: CP07 - Tempo de exposição 10 horas.	56
Figura 5.8: CP08 - Tempo de exposição 100 horas.	57
Figura 5.9: CP09 - Sem exposição à temperatura de trabalho.	57
Figura 5.10: CP10 - Tempo de exposição 1 hora.	58
Figura 5.11: CP11 - Tempo de exposição 10 horas.	58
Figura 5.12: CP12 - Tempo de exposição 100 horas.	59
Figura 5.13: CP01 - Sem exposição à temperatura de trabalho.	60
Figura 5.14: CP02 - Tempo de exposição 1 hora.	60
Figura 5.15: CP03 - Tempo de exposição 10 horas.	61
Figura 5.16: CP04 - Tempo de exposição 100 horas.	61
Figura 5.17: CP05 - Sem exposição à temperatura de trabalho.	62
Figura 5.18: CP06 - Tempo de exposição 1 hora.	62
Figura 5.19: CP07 - Tempo de exposição 10 horas.	63
Figura 5.20: CP08 - Tempo de exposição 100 horas.	63
Figura 5.21: CP09 - Sem exposição à temperatura de trabalho.	64
Figura 5.22: CP10 - Tempo de exposição 1 hora.	64
Figura 5.23: CP11 - Tempo de exposição 10 horas.	65
Figura 5.24: CP12 - Tempo de exposição 100 horas.	65
Figura 5.25: CP01 - Sem exposição à temperatura de trabalho.	66
Figura 5.26: CP02 - Tempo de exposição 1 hora.	67
Figura 5.27: CP03 - Tempo de exposição 10 horas.	67

Figura 5.28: CP04 - Tempo de exposição 100 horas.	68
Figura 5.29: CP05 - Sem exposição à temperatura de trabalho.	68
Figura 5.30: CP06 - Tempo de exposição 1 hora.	69
Figura 5.31: CP07 - Tempo de exposição 10 horas.....	69
Figura 5.32: CP08 - Tempo de exposição 100 horas.	70
Figura 5.33: CP09 - Sem exposição à temperatura de trabalho.	70
Figura 5.34: CP10 - Tempo de exposição 1 hora.	71
Figura 5.35: CP11 - Tempo de exposição 10 horas.....	71
Figura 5.36: CP12 - Tempo de exposição 100 horas.	72
Figura 5.37: CP01 - Sem exposição à temperatura de trabalho.	73
Figura 5.38: CP02 - Tempo de exposição 1 hora.	73
Figura 5.39: CP03 - Tempo de exposição 10 horas.....	74
Figura 5.40: CP04 - Tempo de exposição 100 horas.	74
Figura 5.41: CP05 - Sem exposição à temperatura de trabalho.	75
Figura 5.42: CP06 - Tempo de exposição 1 hora.	75
Figura 5.43: CP07 - Tempo de exposição 10 horas.....	76
Figura 5.44: CP08 - Tempo de exposição 100 horas.	76
Figura 5.45: CP09 - Sem exposição à temperatura de trabalho.	77
Figura 5.46: CP10 - Tempo de exposição 1 hora.	77
Figura 5.47: CP11 - Tempo de exposição 10 horas.....	78
Figura 5.48: CP12 - Tempo de exposição 100 horas.	78
Figura 5.49: Gráfico mostrando as durezas medidas a 1mm da face dos CP's.....	79

Figura 5.50: Gráfico mostrando as durezas medidas a 1mm da raiz dos CP's.....	80
Figura 5.51: Gráfico mostrando as durezas medidas a 1mm da face dos CP's.....	80
Figura 5.52: Gráfico mostrando as durezas medidas a 1mm da raiz dos CP's.....	81
Figura 5.53: Gráfico mostrando as durezas medidas a 1mm da face dos CP's.....	81
Figura 5.54: Gráfico mostrando as durezas medidas a 1mm da raiz dos CP's.....	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Tensões Admissíveis em (Kg/cm ²) de acordo com a norma ASME B31.3 [10].	10
Tabela 2.2: Tensões Admissíveis das principais normas de projeto para tubulações [4].	11
Tabela 2.3: Dureza na Zona Fundida e Zona Afetada pelo Calor após TTAT ..	19
Tabela 4.1: Identificação dos corpos de prova obtidos.	40
Tabela 4.2: Composição química do metal de base SA-213 Grau T5.	42
Tabela 4.3: Composição química do metal de base SA-213 Grau TP317L.	42
Tabela 4.4: Composição química do consumível de soldagem ERNiCr3.....	43
Tabela 4.5: Parâmetros de soldagem procedimento deposição convencional sem TTAT.	44
Tabela 4.6: Parâmetros de soldagem experimento deposição controlada sem TTAT.	45
Tabela 4.7: Parâmetros de soldagem experimento deposição convencional com TTAT.	45
Tabela 4.8: Parâmetros usados para o TTAT.	46

LISTA SIMBOLOS SIGLAS E ABREVIATURAS

AIA	Aço Inoxidável Austenítico
ASME	The American Society of Mechanical Engineers
ASTM	American Society for Testing and Materials
ASM	American Society of Materials
AWS	American Welding Society
CP	Corpo de Prova
CT	Corpo de Teste
Cr	Cromo
Fe	Ferro
HB	Hardness Brinell
HV	Hardness Vickers
IAT	Índice de Acidez Total
IBP	Instituto Brasileiro do Petróleo
ICGC	Região grão grosseiro reauecida intercriticamente
LE	Limite de Escoamento
LR	Limite de Resistência
LF	Linha de Fusão
L	Low (Carbon)
MB	Metal de Base
MS	Metal de Solda
Mo	Molibdênio
N	Norma

QW	Qualification Welding
RGG	Região de Grão Grosseiro
SCGC	Região Grão Grosseiro Reaquecida Subcriticamente
SCGR	Região Grão Refinado Reaquecida Supercriticamente
T _{máx}	Temperatura na região adjacente à zona de ligação que provoque alteração metalúrgica na região descrita, °C
TTT	Tempo-Temperatura-Transformação
T _{df}	Tensão de Deformação por Fluência
T _{dfm}	Tensão de Deformação por Fluência Média
T _{rf}	Tensão de Ruptura por Fluência
UCGC	Região Grão Grosseiro Reaquecida Inalterada
TTAT	Tratamento Térmico de Alívio de Tensões
ZAC	Zona Afetada pelo Calor
ZF	Zona de Ligação
ZFL	Zonas Frágeis Localizadas

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA.....	ii
AGRADECIMENTOS	iii
CURRICULUM VITAE.....	iv
RESUMO	v
ABSTRACT	vi
LISTA DE FIGURAS.....	vii
LISTA DE TABELAS.....	xi
LISTA SIMBOLOS SIGLAS E ABREVIATURAS	xii
SUMÁRIO.....	xiv
1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1.SOLDAGEM	3
2.2.INDÚSTRIAS DE PROCESSO.....	4
2.3.FORNOS DE PROCESSO INDUSTRIAL	5
2.3.1. PROJETO DE FORNOS DE PROCESSO INDUSTRIAL.....	6
2.3.1.1. Condicionamento de partida de fornos de unidades de destilação de petróleo	7
2.3.1.2. Seleção de materiais para projeto de serpentina de fornos de unidades de destilação de petróleo.....	7
2.3.1.3. Pressões e Temperaturas de Projeto	9
2.3.1.4. Tensões Admissíveis.....	10
2.3.2. MECANISMOS DE CORROSÃO.....	12
2.3.2.1. Sulfetação.	13
2.3.2.2. Corrosão por Ácido Naftênico.....	14
2.3.2.3. Corrosão Sob Tensão	15
2.3.2.3.1. Corrosão Sob Tensão por Ácido Politiônico	16
2.3.3. MATERIAIS UTILIZADOS NA FABRICAÇÃO DE SERPENTINAS DE FORNOS PARA DESTILAÇÃO DE PETRÓLEO	17
2.3.3.1. Aços Cromo-Molibdênio	17
2.3.3.2. Características Dos Aços Cromo-Molibdênio	18

2.3.3.2.1. Temperabilidade.....	20
2.3.3.3. Soldabilidade dos Aços Cr-Mo	21
2.3.3.4. Aços Inoxidáveis Austeníticos com Adição De Molibdênio.....	23
2.3.3.5. Características Dos AIA's com Adição De Molibdênio.....	24
2.3.3.6. Ligas de Níquel	25
2.3.3.6.1. Consumível de Soldagem ERNiCR3.....	26
2.3.4. UNIÕES SOLDADAS	27
2.3.5. TIPOS DE UNIÃO SOLDADA.....	27
2.3.5.1. Uniãos Heterogêneas / Dissimilares.....	28
2.4. SOLDAGEM MULTIPASSE	30
2.4.1. CARACTERÍSTICAS DA ZF E ZAC NA SOLDAGEM MULTIPASSE	30
2.4.2. TÉCNICAS DE DEPOSIÇÃO CONTROLADA	34
2.4.2.1. Técnica da Meia Camada	35
2.4.2.2. Técnica da Dupla Camada.	37
2.5. PROCESSO DE SOLDAGEM TIG	38
3. OBJETIVOS.....	39
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	40
4.1. MATERIAIS	41
4.1.1. METAL DE BASE	42
4.1.2. METAL DE ADIÇÃO	43
4.2. PARÂMETROS DE SOLDAGEM	43
4.3. PARÂMETROS TTAT	46
4.4. ANÁLISE MICROESTRUTURAL.....	46
4.4.1. PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS.....	47
4.4.2. PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA PARA MICROSCOPIA ÓTICA	47
4.4.3. METALOGRAFIA QUANTITATIVA.....	48
4.5. ENSAIOS DE AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO	48
4.5.1. ENSAIO DE MICRODUREZA VICKERS	48
4.6. SIMULAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE TRABALHO	51
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	53
5.1. CARACTERIZAÇÃO MACROGRÁFICA DAS JUNTAS SOLDADAS.	53
5.1.1. PROC01 – DEPOSIÇÃO CONVENCIONAL SEM TRATAMENTO TÉRMICO DE ALIVIO DE TENSÕES.	53

5.1.2. PROC02 – TÉCNICA DE DEPOSIÇÃO CONTROLADA DUPLA CAMADA SEM TTAT.....	55
5.1.3. PROC03 – TÉCNICA DE DEPOSIÇÃO CONVENCIONAL COM TTAT. ...	57
5.2. CARACTERIZAÇÃO DA MICROESTRUTURA DA ZAC E ZF	59
5.2.1. MICROSCOPIA ÓTICA DA ZF E ZAC DO MB 5Cr-0,5Mo.	59
5.2.1.1. PROC01 – Deposição convencional sem Tratamento Térmico de Alívio de Tensões.	59
5.2.1.2. PROC02 – Técnica de Deposição controlada Dupla Camada sem TTAT	62
5.2.1.3. PROC03 – Técnica de Deposição convencional com TTAT.....	64
5.2.2. MICROSCOPIA ÓTICA DA ZAC DO METAL DE BASE 5Cr-0,5Mo	66
5.2.2.1. PROC01 – Deposição convencional sem TTAT.....	66
5.2.2.2. PROC02 – Técnica de Deposição controlada Dupla Camada sem TTAT	68
5.2.2.3. PROC03 – Técnica de Deposição convencional com TTAT.....	70
5.2.3. MICROSCOPIA ÓTICA DA ZF	73
5.2.3.1. PROC01 – Deposição convencional sem TTAT.....	73
5.2.3.2. PROC02 – Técnica de Deposição controlada Dupla Camada sem TTAT	75
5.2.3.3. PROC03 – Técnica de Deposição convencional com TTAT.....	77
5.3. ENSAIOS DE AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO	79
5.3.1. PERFIL DE MICRODUREZA VICKERS DOS CORPOS DE PROVA DO LADO DO MB 5Cr 0,5Mo.	79
6. CONCLUSÕES.....	84
7. TRABALHOS FUTUROS	85
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS	86

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

Aços baixa liga cromo molibdênio são largamente usados em unidades de destilação de petróleo para tubulações de processo. Isto devido sua reconhecida resistência mecânica em temperaturas intermediárias e resistência à corrosão em meios sulfurosos. No entanto, tais aços são altamente temperáveis o que demanda certos cuidados durante a soldagem.

Sobretudo, somado à especificidade da soldagem destes aços, nos deparamos com um panorama ainda mais desafiador relacionado aos altos Índices de Acidez Total, associados às famílias de ácidos orgânicos presentes no elenco de petróleos que são processados nas refinarias do Brasil. Estas características do petróleo nacional, vinculadas às condições específicas de processo, tais como; ocorrência de fluxo bifásico, altas velocidades do fluído processado, temperaturas superiores a 400°C, deflagram um tipo de mecanismo de dano denominado "Corrosão por Ácido Naftênico". Baseado neste horizonte deriva a necessidade do emprego de matérias que sejam resistentes ao cenário delineado.

A soldagem dissimilar entre os materiais do ASME SA-213 Grau P5 e ASME SA-213 TP317L promove ZAC's e ZF não somente com características metalúrgicas diferentes, mas também com comportamentos mecânicos distintos. Uma análise acerca das variáveis de soldagem e problemas de soldabilidade particulares a cada material deve ser feita para juntas soldadas com estas

características. Estes fatores devem ser avaliados tanto individualmente quanto a respeito de sua interação, visando garantir o desempenho satisfatório desta união em serviço.

O estudo visa avaliar o resultado da supressão do TTAT na união dos aços baixa liga contendo 5Cr/0,5Mo, procedimento considerado obrigatório pelo código de projeto (ASME B 31.3), através da soldagem dissimilar e heterogênea, empregando os metais de base ASME SA-213 Grau P5 e ASME SA-213 TP317L e metal de adição a base de níquel de classificação ERNiCr3. Serão simuladas sob condições operacionais três diferentes juntas soldadas, sendo a primeira soldada através da técnica de deposição convencional sem TTAT; a segunda soldada através da técnica de deposição controlada dupla camada sem TTAT e última soldada através da técnica de deposição convencional com TTAT, este último conforme parâmetros estabelecidos pela norma de projeto. Os corpos de teste serão expostos à temperatura de 450°C em períodos de tempo de 1, 10 e 100 horas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. SOLDAGEM

Uma definição de soldagem é o processo de união de duas partes metálicas, podendo essas partes serem pressionadas entre si ou não, utilizando uma fonte de calor. A solda é o resultado dessa operação [1,2].

A soldagem é amplamente usada na união de materiais metálicos como, por exemplo, componentes de estruturas metálicas prediais e industriais, fabricação de equipamentos, vasos de pressão, tubulações, componentes nucleares, etc. As grandes vantagens da soldagem sobre os outros processos de união se resume basicamente na simplicidade de aplicação e baixo custo [3].

No âmbito da manutenção e montagem industrial tem grande aplicação em serviços de reparo em equipamentos e estruturas bem como montagem de novas fábricas, equipamentos e expansões. Como a soldagem está ligada, por exemplo, a parte estrutural de uma indústria, ou em sistemas pressurizados a altas pressões, ou contendo líquidos poluentes e nocivos à saúde, ela afeta diretamente a segurança e a economia de uma construção ou manutenção. Portanto, além do projeto adequado da junta, é necessário seguir a sequência de operações, com qualificação dos procedimentos de soldagem e qualificação de soldadores, e técnicas de inspeção, de modo a garantir que a união irá desempenhar as características funcionais e os requisitos de projeto [3].

2.2.INDÚSTRIAS DE PROCESSO

Indústrias de processo são aquelas em que a matéria prima sofre transformações físicas ou químicas com a finalidade de se ter um produto que atenda uma finalidade humana. Presentes em tal indústria estão os equipamentos de processo necessário para movimentar, armazenar, transformar os materiais ao longo da cadeia produtiva [4].

Refinarias de petróleo é um bom exemplo de indústria de processo. Petróleo bruto é destilado para se obter derivados como gasolina, nafta, querosene diesel e outros. Alguns produtos da destilação são vendidos diretamente ao consumidor enquanto outros necessitam de processamento adicional para se transformar em produtos negociáveis [5].

O processo de destilação de petróleo é caracterizado pelo princípio da separação física dos constituintes do cru. Óleo cru proveniente dos campos de exploração é recebido em tanques de armazenamento. Em seguida é bombeado para um trocador de calor e preaquecido usando, por exemplo, fluxo dos produtos quentes do processo. Nessa temperatura é retirado o sal e sedimentos contidos no petróleo através de dessalgadoras elétricas. O fluxo passa então em um forno tubular sujeito a chama o qual fornece a carga térmica final através de fogo direto na serpentina de tubos [5-7].

Em seguida, o petróleo é transferido para a torre de destilação atmosférica onde é fracionado de acordo com as diferentes faixas do ponto de ebulição dos componentes. A destilação pode ser a vácuo ou atmosférica [5-7].

2.3.FORNOS DE PROCESSO INDUSTRIAL

Forno tubular sujeito a chama é definido como:

“Equipamento constituído por uma caixa metálica, sustentada por uma estrutura de vigas e colunas metálicas, internamente revestida de material refratário, no interior da qual é efetuada a queima de um combustível com a finalidade de aquecer, vaporizar, promover reação química ou craquear um fluido líquido e/ou gasoso contido em serpentinas tubulares cheias ou não de catalisador” (ABNT NBR 10778, 1989, p.01) [7].

Os projetos de fornos para processos industriais contemplam uma região denominada radiação; que é a região mais quente do forno e onde ficam dispostos os queimadores de combustível na parte central inferior bem como parte o feixe tubular. Na região imediatamente acima da radiação encontra-se a região de convecção; seção composta pelos segmentos finais do feixe tubular da serpentina e por onde é escoado o petróleo (projeto de fornos verticais). Cabe ressaltar que existem duas configurações típicas de fornos para processos industriais que estão relacionadas à orientação do tubo no interior do

equipamento, podendo estes ser projetados na posição horizontal ou vertical. [7].

2.3.1. PROJETO DE FORNOS DE PROCESSO INDUSTRIAL

Forno tubular sujeito a chama instalados em plantas de refino são geralmente projetados conforme norma API 560 [8] que traz requisitos e recomendações com relação ao projeto, materiais, fabricação, inspeção, testes, montagem do equipamento.

Segundo a norma Petrobrás N1637 [9] referente à montagem de forno, as inspeções de campo e fabricação de serpentinas devem ser realizadas de acordo com a norma ASME B31.3 [10] para uso diferente de sistemas de vapor, caso o projetista não tenha especificado outra. Tal norma é dedicada ao projeto de Sistemas de Tubulações de Processos, classifica os sistemas quanto ao emprego e ao fluido conduzido.

Devido às características de operação de tal equipamento, torna-se necessário um maior grau de confiabilidade dos equipamentos de processo. Por isso, a seleção de materiais bem como a fabricação de tais equipamentos de processo são itens essenciais no sucesso operacional das plantas [4].

2.3.1.1. CONDICIONAMENTO DE PARTIDA DE FORNOS DE UNIDADES DE DESTILAÇÃO DE PETRÓLEO

Para partir ou retornar com um forno de processo em operação, o seguinte procedimento de condicionamento de partida deve ser realizado:

- 1º) Efetuar a purga da serpentina do forno através da injeção de vapor, ajustando a temperatura do topo da Radiação em 250° C;
- 2º) Acionar maçaricos localizados na parte inferior da radiação e admitir carga iniciando o fluxo de petróleo para o interior da serpentina, mantendo a temperatura a 250°C por 1 hora;
- 3º) Ajustar o número de maçaricos e elevar a temperatura ao patamar de 350°C por mais 1 hora;
- 4º) Ajustar novamente o número de maçaricos e elevar a temperatura ao patamar de 450°C, medidos no topo da Radiação, finalizando o reciclo.

2.3.1.2. SELEÇÃO DE MATERIAIS PARA PROJETO DE SERPENTINA DE FORNOS DE UNIDADES DE DESTILAÇÃO DE PETRÓLEO

A seleção do material adequado a cada uma das partes de um equipamento de processo é uma dos problemas mais difíceis na engenharia desses equipamentos. O grande desafio é a especificação de um material que atenda

com segurança as condições de uma determinada aplicação, atendendo aos requisitos mecânicos, resistência aos vários mecanismos de corrosão impostos pelo fluido, com vida útil esperada e principalmente com o menor custo possível [4].

Uma falha com eventual vazamento acarretaria efeitos catastróficos às instalações e colaboradores, meio ambiente, à comunidade instalada no entorno bem como perdas financeiras significativas para a empresa [4,10].

Cálculos mecânicos para o projeto de tubulações no âmbito da Petrobras segue a N-1673 [12], suportada pela norma ASME B31.3 [10] (sob condições não previstas na norma de padronização de materiais N-76 [13]). No entanto, outros requisitos também devem ser observados.

A seleção de materiais para equipamentos que processam hidrocarbonetos, como por exemplo, as serpentinas de fornos tubulares em unidades de refino de petróleo, são norteadas por parâmetros como a corrosividade do meio, temperatura de operação e contaminação do fluido através do produto de corrosão [4,12].

Alguns dos compostos sulfurosos presentes no petróleo são o enxofre elementar, H_2S , sulfetos, polissulfetos, ácidos naftênicos e outros. Os agentes mais agressivos são o H_2S e os ácidos naftênicos. O primeiro ataca os aços formando sulfetos de ferro sendo que os demais compostos tendem a se

decompor em temperaturas acima de 260°C liberando H_2S . O ataque pelos ácidos naftênicos ocorre na faixa de temperatura entre 220°C e 400 °C, sendo agravado pelas altas velocidades de escoamento não deixando produtos de corrosão na região atacada o que aumenta a velocidade de degradação do tubo. Para óleos sem ácidos naftênicos, o ataque pelo H_2S se inicia na faixa de 260°C e cresce com a temperatura, atingindo o máximo cerca de 450°C. Os aços baixa liga Cr/Mo resistem satisfatoriamente a este ataque, sendo indicado para essa aplicação o aço 5 Cr -1/2 Mo, que apresenta desempenho satisfatório na maioria dos casos [4,14].

2.3.1.3. PRESSÕES E TEMPERATURAS DE PROJETO

Dentre as variáveis para elaboração de projeto de sistemas de tubulação podemos destacar a pressão e temperatura de trabalho. O aumento na temperatura promove uma redução nas propriedades mecânicas de todos os metais e ligas metálicas, podendo apresentar variações de grande amplitude. A resistência à corrosão também sofre grande influência com o aumento da temperatura [4,14].

Portanto, devido à influência da temperatura na variação das propriedades mecânicas dos materiais torna-se imperativo para a seleção do material, a correlação entre tensão admissível e temperatura de trabalho, eliminando-se a possibilidade de colapso plástico [4].

Durante operação, variações ocasionais na pressão e temperaturas ocorrerão em função da variabilidade do processo. Portanto, a pressão e temperatura de projeto de cada componente da tubulação devem ser maiores que a pressão e temperatura na condição mais severa [10].

2.3.1.4. TENSÕES ADMISSÍVEIS.

Segundo Silva Telles [4], a Tensão Admissível é o parâmetro que determina os limites de aplicação de um dado material no que se refere à resistência mecânica. Tensão admissível varia com a temperatura, conforme demonstrado na tabela 2.1.

Tabela 2.1: Tensões Admissíveis em (Kg/cm²) de acordo com a norma ASME B31.3 [10].

Tipo de material	Especificação de material e grau (de acordo com ASTM)	Temperatura do metal (°C)																								
		38	83	149	204	260	316	343	371	399	427	454	482	510	538	566	593	621	649	677	704	732	760	788	816	
Aços de baixa liga	A - 333 Gr 3 e Gr 7	1.526	1.378	1.378	1.316	1.251	1.181	1.146	1.090	977	901	833	457	316	176	112	70									
	A - 335 Gr P - 1	1.287	1.287	1.230	1.118	1.146	1.104	1.803	1.062	970	949	628	893	576	337											
	A - 335 Gr P - 5	1.406	1.273	1.223	1.208	1.202	1.181	1.167	1.146	928	900	851	766	562	408	296	204	141	91							
	A - 335 Gr P - 7	1.406	1.273	1.223	1.208	1.202	1.181	1.167	1.146	928	900	851	766	562	408	296	204	141	84							
	A - 335 Gr P - 9	1.406	1.273	1.223	1.208	1.202	1.181	1.167	1.146	928	900	851	801	745	520	351	232	155	105							
	A - 335 Gr P - 11	1.406	1.315	1.285	1.230	1.209	1.174	1.136	1.087	1.068	1.055	1.019	900	773	548	387	281	178	84							
	A - 335 Gr P - 12	1.406	1.315	1.265	1.230	1.209	1.174	1.139	1.087	1.068	1.055	1.019	900	773	527	351	197	112	70							
	A - 335 Gr P - 22	1.406	1.301	1.265	1.258	1.258	1.258	1.258	1.258	1.089	1.019	900	773	548	408	295	211	141								
	A - 691 CM 65	1.526	1.526	1.526	1.455	1.406	1.357	1.336	1.308	1.146	1.111	1.070	963	576	337											
	A - 691 CM 70	1.638	1.638	1.538	1.582	1.526	1.469	1.441	1.413	1.230	1.230	1.202	963	576	337											
	A - 691 (1 ½ Cr)	1.406	1.406	1.406	1.385	1.329	1.287	1.285	1.237	1.210	1.181	1.146	1.086	773	485	323	197	148	84							
	A - 691 (2 ½ Cr)	1.406	1.301	1.285	1.258	1.258	1.258	1.258	1.258	1.089	1.019	900	773	548	408	295	211	141								
	A - 691 (5 Cr)	1.406	1.273	1.223	1.209	1.202	1.181	1.167	1.146	928	900	851	766	562	408	296	204	141	91							

Uma norma de projeto estabelece tensões admissíveis para todas as classes de equipamentos de processo englobando projeto, fabricação, montagem e qualidade. Portanto, o uso de uma determinada tensão admissível está

obrigatoriamente vinculado a todos esses fatores e demais exigências da norma de projeto [4].

A partir da norma de projeto e todos os fatores inerentes ao projeto é possível selecionar os materiais empregados e fazer o dimensionamento mecânico de um equipamento específico. A tabela 2.2 mostra os critérios de tensões admissíveis, adotados pelas normas de projeto mais frequentemente empregadas para equipamentos de processo para refino de petróleo [4].

Tabela 2.2: Tensões Admissíveis das principais normas de projeto para tubulações [4].

Seções das normas		Tensões admissíveis básicas: (O MENOR DOS SEGUINTE VALORES)				
B.31.1	Centrais de vapor	$LR/4$	$LE/1,66$	Tdf	$0,67 Tdfm$	$0,8 Trf$
B.31.2	Tubulações de ar e gases	$LR/2,66$				
B.31.3	Refinarias, instalações petrolíferas, petroquímicas e indústrias químicas.	$LR/3$	$LE/1,66$	Tdf	$0,67 Tdfm$	$0,8 Trf$
B.31.4	Oleodutos		$LE/1,39$			
B.31.5	Refrigeração	$LR/4$	$LE/1,66$			
B.31.7	Centrais nucleares	$LR/3$	LE	Tdf	$0,67 Tdfm$	$0,8 Trf$
B.31.8	Transporte e distribuição de gases		$LE/1,1$			
Onde: LR = Valor mínimo do limite de resistência (<i>ruptura</i>) na temperatura considerada ou na temperatura ambiente, o que for menor. LE = Valor mínimo do limite de escoamento na temperatura considerada ou na temperatura ambiente, o que for menor. Tdf = Tensão mínima que causa uma deformação por fluência de 1%, ao fim de 100.000 horas, na temperatura considerada. $Tdfm$ = Tensão média que causa uma deformação por fluência de 1%, ao fim de 100.000 horas, na temperatura considerada. Trf = Tensão mínima que causa a ruptura do material, em consequência de deformação por fluência, ao fim de 100.000 horas, na temperatura considerada.						

Para sistemas em que as temperaturas de serviços estão abaixo da faixa de fluência do material, a norma de projeto baseia o valor de tensão admissível no limite de resistência (LR) ou limite de escoamento (LE). Esses números são

divididos por um fator de segurança de acordo com o grau de criticidade do sistema [4,10].

Para aplicações em altas temperaturas situadas na faixa de fluência são adicionados outros três parâmetros (T_{df} , T_{dfm} e T_{rf}) com conceitos e metodologias diferentes. No entanto, o valor considerado será sempre o menor resultado obtido para qualquer situação proposta [4,10].

2.3.2. MECANISMOS DE CORROSÃO

Durante o processo de refino de petróleo a corrosão é inevitável. Problemas de corrosão aumentam consideravelmente os custos de manutenção e operação. Sulfeto de hidrogênio (H_2S) está presente na maioria das refinarias proveniente da destilação do óleo cru ou formado a partir da decomposição de compostos orgânicos sulfurosos durante o processamento em altas temperaturas [14,15].

Nas unidades de destilação de petróleo, dentre os mecanismos de corrosão presentes estão a sulfetação, resultante da reação do aço carbono e outras ligas com compostos sulfurosos em temperaturas entre 260 e 540 graus Celsius; corrosão por ácido naftênico ocasionada durante processamento do óleo cru proveniente de algumas regiões do planeta; e corrosão sob tensão a qual é provocada na presença de tensões residuais, ambiente corrosivo e material susceptível, ocorrendo simultaneamente. [4,14,16,17].

2.3.2.1. SULFETAÇÃO.

Sulfetação é a reação do ferro com o gás sulfídrico formando sulfeto de ferro. A reação é lenta na temperatura ambiente, porém aumenta consideravelmente com o aumento da temperatura [17].

Em unidades de destilação de petróleo ocorre corrosão por sulfetação sem a presença de hidrogênio. Quando o óleo cru processado é doce ocorrem poucos problemas de corrosão. No entanto, quando o óleo cru é ácido há a necessidade de proteção adicional contra sulfetação à alta temperatura. Nessas condições aço de baixa liga com mínimo de 5% cromo é indicado para fornos tubulares. Também aços inoxidáveis martensíticos e ferríticos com teor de Cr de 12% são indicados para controlar a corrosão por sulfetação na ausência de H [14,17].

A taxa de corrosão é aumentada com o aumento do teor de enxofre no líquido processado e com a elevação da temperatura. A corrosão é menos severa quando há um fluxo aquoso do hidrocarboneto sobre toda a superfície do metal e eleva-se com a presença de vapor em um fluxo bifásico, pois a camada protetiva de sulfeto é destruída pelas gotas de líquido [17].

A presença de hidrogênio converte compostos sulfurosos em H_2S . Em consequência, a corrosão por sulfetação passa a ser função da concentração de H_2S . Portanto, apresentando maior severidade que aquela sem hidrogênio. A resistência à corrosão de aços baixa liga pode ser aumentada com teores de

cromo acima de 5% sendo nula abaixo desse valor. Tubos da serpentina do forno tubular de preaquecimento são geralmente feitos de aço baixa liga aluminizado, aço inoxidável 12% Cr aluminizado ou aço inoxidável tipo 321 [14]. A resistência a sulfetação é geralmente obtida aumentando o teor de cromo na liga [16].

2.3.2.2. CORROSÃO POR ÁCIDO NAFTÊNICO

A corrosão naftênica ocorre em temperaturas entre 220 e 400 °C devido aos ácidos orgânicos chamados ácidos naftênicos, que estão presentes em óleos crus de várias partes do mundo incluindo o Brasil [6]. Eventualmente, tais ácidos naftênicos podem acelerar a corrosão por sulfetação à alta temperatura devido às condições desfavoráveis de fluxo [14]. A corrosão naftênica é mais severa em fluxo bifásico, áreas de alta velocidade e turbulência e em torres de destilação onde vapores são condensados, sendo esta a unidade mais atacada [16,17].

A corrosão naftênica é influenciada por vários fatores tais como o Índice de Acidez Total do petróleo (composição química do cru), temperatura, turbulência e velocidade do fluido, estado físico (fase líquido/vapor), composição da liga de construção e pressão [6,16,18]. A taxa de corrosão aumenta com a temperatura e nenhuma camada protetiva é formada, sendo ineficientes os aços baixa liga e inoxidáveis com até 12% de cromo [14].

A morfologia do dano pode se apresentar de duas formas distintas. No primeiro caso ela pode estar associada ao escoamento do produto onde o material atacado apresenta sulcos no sentido do fluxo. Outra forma, o mecanismo corrosivo se dá por condensação dos vapores com ácidos naftênicos apresentando-se na forma de pites isolados ou agrupados e, em alguns casos, apresentando aparência de casca de laranja [16].

Como medidas de prevenção para plantas que não foram projetadas para trabalhar com ácidos naftênicos, pode ser considerado uma mistura de óleos crus, injeção de inibidores de corrosão, neutralização dos ácidos e adaptações metalúrgicas [14,16,18]. A resistência à corrosão pode ser aumentada com o uso de ligas possuindo maiores teores de Molibdênio. Para condições severas o aço inoxidável tipo 317 tem desempenho satisfatório [16].

2.3.2.3. CORROSÃO SOB TENSÃO

A corrosão sob tensão apresenta formação de microtrincas ramificadas, perpendiculares à direção das tensões, intergranulares ou transgranulares. Avançam pelo metal sem deixar produtos de corrosão, deformação plástica ou perda de espessura. Uma vez iniciadas, as microtrincas se propagam até causarem a ruptura do componente sem aviso prévio [4,14,19].

“A corrosão sob tensão é caracterizada por trincas iniciadas na superfície de material susceptível, especialmente os aços inoxidáveis série 300 e algumas ligas a base de níquel, que estão sob a ação combinada de tensões residuais,

temperatura e ambiente propenso. A presença de oxigênio dissolvido aumenta a propensão para trincas” (API 571, 2003, p. 2-130) [16].

Um meio de proteção muito usado é tratamento térmico de alívio de tensões após operações de fabricação, no entanto, outros artifícios podem ser utilizados para atenuar este mecanismo de degradação. [4,17].

2.3.2.3.1. CORROSÃO SOB TENSÃO POR ÁCIDO POLITIÔNICO

Trincas por corrosão sob tensão ocorrem durante paradas de manutenção, partida de planta ou operação quando ar e umidade estão presentes. Trinca intergranular é devido ao ácido politiônico formado pela camada de sulfeto na superfície do metal misturado ao ar e umidade [15,16].

Geralmente ocorre em aço inoxidável austenítico e liga de Ni-Cr-Fe que já estejam sensibilizadas por exposição térmica [14]. Ocorrem particularmente próximo a soldas e áreas com altas tensões residuais. As trincas propagam-se rapidamente através de toda a espessura da parede de tubulações e acessórios [16]. Este tipo de falha é limitado a alguns equipamentos entre estes tubos de serpentinas de fornos tubulares [15].

2.3.3. MATERIAIS UTILIZADOS NA FABRICAÇÃO DE SERPENTINAS DE FORNOS PARA DESTILAÇÃO DE PETRÓLEO

Para atender aos severos requisitos de processo os quais os materiais usados em serpentinas de fornos são expostos, materiais como aço inoxidável, ligas de níquel e aços baixa liga Cr-Mo são selecionados pois apresentam a melhor relação custo benefício.

2.3.3.1. AÇOS CROMO-MOLIBDÊNIO

Os aços-liga molibdênio e cromo-molibdênio são aços com teor de 0,5% a 1,0% de Mo e 0,5% até 9% de Cr como elementos de liga. São todos materiais magnéticos de estrutura ferrítica. São extensamente usados para aplicações em altas temperaturas em plantas de geração de vapor e refinarias de petróleo [4,20].

Aços contendo até 2 1/2% de Cr são usados em altas temperaturas, onde os esforços mecânicos forem elevados e a corrosividade do meio moderada. Estes aços são largamente utilizados na fabricação tubulações de vapor [20].

Aços cromo-molibdênio contendo de 5% a 9% de Cr são usados em temperaturas elevadas com esforços mecânicos moderados e alta corrosividade do meio. O principal uso é em tubulações, tubos de permutadores de calor, tubos de serpentina de fornos de processo e equipamentos de pequeno e

médio porte em serviços com hidrocarbonetos em temperaturas acima de 250°C [20].

Tais aços oferecem ótimas propriedades como resistência à oxidação, fluência e resistência à corrosão por compostos sulfurosos. Por isso são considerados materiais baratos quando comparado com aços de alta liga usados em petroquímicas e geração de vapor.

2.3.3.2. CARACTERÍSTICAS DOS AÇOS CROMO-MOLIBDÊNIO

O molibdênio aumenta a resistência do material a atmosferas ácidas não oxidantes, à corrosão localizada e a resistência a altas temperaturas. A combinação do Mo com o C resulta na formação de precipitados de carbonetos complexos, que dificulta o escorregamento nos planos de clivagem. Isto faz com que o material experimente menores deformações. Adição de cromo tem como principal vantagem melhorar a resistência à oxidação, inclusive em temperaturas elevadas. [4,20].

A adição dos elementos de liga Cr e Mo nos aços retarda a decomposição da austenita durante o resfriamento, aumentando o tempo para a formação da martensita, que passa existir em maior quantidade. [4,20].

A presença de carbonetos estáveis finamente distribuídos melhora a resistência à fluência. Aços contendo 5% e 9% de Cr apresentam tensões de ruptura e

resistência à fluência menores que aqueles com teores de Cr menores. Isso acontece porque em altas temperaturas a resistência diminui com o aumento do cromo. [20].

Dependendo da aplicação são impostos requisitos adicionais na soldagem desses aços. Para o ambiente propício à corrosão nas refinarias a máxima dureza na ZAC deve ser limitada para evitar trincas por corrosão sob tensão [21,22]. Segundo as normas ASME B31.3 [10] e PETROBRAS N1637 [9], na fabricação e soldagem das serpentinas deverão ser realizadas medições de dureza na ZF e ZAC quando houver tratamento térmico.

Segundo a norma PETROBRAS N115 [11], no caso de soldas dissimilares ambas as ZAC's devem ser examinadas. Valores de dureza máximos para o material Cr-Mo após TTAT estão na tabela 2.1 abaixo extraída da norma PETROBRAS N-0133L [32]:

Tabela 2.3: Dureza na Zona Fundida e Zona Afetada pelo Calor após TTAT

Denominação básica	Composição básica	Dureza
C-Mo Cr-Mo	C-0,5Mo	225 HB (237 HV)
	0,50Cr-0,50Mo	
	1,0Cr-0,5Mo	
	1,25Cr-0,5Mo	
Cr-Mo Cr-Mo-V	2,25Cr-1,0Mo	241 HB (250 HV).
	5,0Cr-0,50Mo	
	7,0Cr-0,5Mo	
	9,0Cr-1,0Mo	
	9,0Cr-1,0Mo-V	

2.3.3.2.1. TEMPERABILIDADE

Temperabilidade é definido com “a habilidade relativa de um material ferroso formar a martensita quando é resfriado de uma temperatura acima da temperatura de transformação” [28].

Ao aumentar o teor de carbono e elementos de liga as curvas TTT andam para a direita aumentando a temperabilidade de aços. Isto permite que em baixas taxas de resfriamento ainda ocorra formação da martensita. O carbono é o elemento de liga que produz o maior efeito na temperabilidade de aços [28].

Na soldagem, o preaquecimento é também usado para diminuir a taxa de resfriamento e atenuar a formação da martensita. Por esta razão o código ASME Seção IX [24] considera a temperatura de preaquecimento uma variável essencial para a qualificação de procedimento de soldagem para a maioria dos processos de soldagem quando requisitos relacionados à tenacidade estão envolvidos.

Devido aos efeitos significantes do revenido sobre a resistência dos materiais, particularmente os aços, as condições do tratamento térmico após soldagem (TTAT), tempo e temperatura, é considerado variável essencial na qualificação de procedimento de soldagem (QPS) segundo a norma ASME Seção IX [28]. Essa condição inclui também o tratamento térmico de alívio de tensões.

2.3.3.3. SOLDABILIDADE DOS AÇOS Cr-Mo

A principal característica dos aços Cr-Mo com relação à soldagem é que são altamente temperáveis ao ar. Eles sofrem transformações metalúrgicas em altas e baixas temperaturas. São aços de microestrutura ferrítica, porém extremamente temperáveis quando submetidos a operações de soldagem, principalmente para adições na faixa de 5% a 9% de cromo. Para estes aços, as velocidades de resfriamento provenientes das operações de soldagem, invariavelmente ocasionarão a formação de Martensita na Zona Afetada pelo Calor, em virtude da alta temperabilidade característica destes materiais [21].

Isso requer que os procedimentos de soldagem sejam desenvolvidos com a finalidade de evitar a fissuração pelo hidrogênio, prevenindo efeitos indesejáveis gerados pelo ciclo térmico de soldagem como trincas no MS e na ZAC, podendo ocorrer em um período de tempo após a operação de soldagem (24, 48 ou 72 horas). Devem ser considerados o controle do preaquecimento, temperatura de interpasse, pós-aquecimento, composição do metal de adição, tratamento térmico após a soldagem e controle da dureza da ZAC e MS [21].

Estes aços sempre formarão martensita no resfriamento, porém a ação de pré-aquecer propicia a obtenção de uma microestrutura mais tenaz. A taxa de resfriamento menor como resultado do preaquecimento reduz as distorções e as tensões residuais na solda. Também retira toda a umidade da superfície dos metais de base antes da soldagem. Esses benefícios juntamente com a redução

da formação da martensita reduzem substancialmente o risco de trincas a frio em aços temperáveis [22].

As normas de projeto recomendam ou determinam em alguns casos as temperaturas a serem empregadas para pré-aquecimento e temperatura de interpasse conforme espessura e o teor dos elementos de liga. Interrupções no processo de soldagem em que a peça retorne sem proteção de qualquer anteparo para o retardamento da velocidade de resfriamento até temperatura ambiente ou sem o devido pós-aquecimento, quando previsto no procedimento de soldagem, devem ser evitadas. Todas as possíveis precauções devem ser tomadas para mitigar a ocorrência de trincas induzidas por hidrogênio [22].

A temperatura de preaquecimento necessária para prevenir trincas induzidas por H_2 é função da tendência de formação de microestrutura martensítica. O carbono é principal elemento para aumento da resistência dos materiais. Outros elementos de liga também promovem a formação da martensita, contudo, menos expressivos que o carbono [4].

Como regra geral, os valores de dureza e a extensão da ZAC são proporcionais à temperatura de pré-aquecimento e aos valores de energia de soldagem aplicados. Estes dois parâmetros apresentam influência direta sobre a taxa de resfriamento da junta soldada, a qual é responsável pela taxa de transformação da microestrutura da ZAC no estado sólido.

2.3.3.4. AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS COM ADIÇÃO DE MOLIBDÊNIO

Aços inoxidáveis austeníticos incluem as ligas de series 200 e 300. Por causa das boas propriedades mecânicas, reconhecida resistência à corrosão vários meios e fácil fabricação são largamente utilizados em comparação aos demais aços inoxidáveis de estrutura metalúrgica ferrítica e martensítica. Vários elementos formadores da austenita são adicionados aos aços inoxidáveis austeníticos, como exemplo, o níquel em grandes quantidades podendo chegar a 8% em peso, C e N. Carbono é adicionado para aumentar a resistência à fluência em altas temperaturas. Nitrogênio é adicionado para melhorar a resistência principalmente em temperatura ambiente e temperaturas criogênicas.

Molibdênio é adicionado em vários aços inoxidáveis e tem diferentes funções, dependendo do grau. Para aços inoxidáveis austeníticos o Mo melhora a resistência em elevadas temperaturas através de endurecimento por solução sólida. Existem efeitos negativos dessa adição, pois as ligas com teores de Mo são mais difíceis para serem trabalhadas a quente, conseqüentemente, soldadas. Mo juntamente com Cr promovem a formação de carbonetos assim como outros elementos de liga como nióbio, titânio, tungstênio e tântalo. A adição de Mo também melhora a resistência à corrosão naftênica nos aços inoxidáveis tipo 316 e 317 [16,23].

Uma variedade de precipitados (carbonetos, nitretos, fases intermetálicas fragilizantes) podem estar presentes nos AIA, dependendo da composição

química, em decorrência dos processos de fabricação. As fases sigma, chi e Laves podem se formar nos aços contendo adições de Mo, somado aos carbonetos de cromo ($M_{23}C_6$). Tipicamente essas fases se formam após um longo período de exposição a temperaturas elevadas ou procedimentos de soldagem multipasse, resultando na fragilização do aço, tornando-se crítico quando da manutenção deste à temperatura ambiente [23].

2.3.3.5. CARACTERÍSTICAS DOS AIA's COM ADIÇÃO DE MOLIBDÊNIO

Os AIA são considerados o grau mais fácil de ser soldado. É o grupo de aços inoxidável mais usado e tem boa resistência a corrosão na maioria dos ambientes desde que não seja água salgada. Podem ser usado desde temperaturas criogênicas até temperaturas de 760°C [23].

De forma geral, os aços inoxidáveis austeníticos têm grande ductilidade e elevado coeficiente de dilatação térmica, se comparado com os aços inoxidáveis de estrutura ferrítica [21].

O procedimento de soldagem para tais aços requer cerca de 30% a menos de energia do que para os aços carbono para mesma espessura. Isto devido sua baixa condutividade térmica, cerca de 33% menor que as dos aços carbono [24].

2.3.3.6. LIGAS DE NÍQUEL

Ligas a base de níquel são uma das mais importantes classes de materiais de engenharia, pois tem aplicações variadas em diversos ambientes. São geralmente selecionadas para aplicações na qual é necessário combinar média ou alta resistência mecânica e excelente resistência à corrosão em altas temperaturas e relevante gama de meios corrosivos [25,32].

De forma geral, os problemas apresentados pelas ligas de níquel em decorrência da soldagem é que são susceptíveis à trinca de solidificação, liquação e ao fenômeno de redução da ductilidade, também apresenta forte tendência à falta de fusão pela baixa fluidez da poça de fusão. Dependendo da liga a ser soldada e sendo o aporte térmico alto pode ocorrer a precipitação de carbeto e intermetálicos [32].

O forte desenvolvimento e uso das ligas de níquel podem ser atribuídos à capacidade de solubilizar altas concentrações de elementos de liga em comparação com outros metais. Isto faz com que os consumíveis de soldagem de ligas a base de níquel sejam capazes de solubilizar alguns elementos de liga mantendo suas propriedades mecânicas e físicas, desde temperaturas criogênicas até temperaturas próximas de 1200°C [25].

As ligas de níquel oferecem grande resistência à corrosão a alta temperatura. A adição de cromo ao níquel oferece excelente resistência à corrosão resultando na formação de uma camada de óxido protetiva na superfície. Isso permite seu

uso em uma larga faixa de aplicação industrial que requer proteção para as mais diferentes formas de degradação incluindo corrosão aquosa, oxidação a alta temperatura e reação ao enxofre [25].

As ligas Ni-Fe-Cr endurecidas por solução sólida são principalmente usadas para processamento térmico em médias e altas temperaturas e também processamento de hidrocarbonetos em sistemas sujeitos à fluência e corrosão a altas temperaturas [25].

Problemas básicos de soldagem de ligas de níquel podem ser evitados com limpeza dos biseis e varetas, proteção contra vento e umidade, uso de ferramental de apoio específico para as ligas de níquel e higiene funcional com EPI's. Detalhes como preparação da junta, limpeza superficial, quantidade de material depositado por passe, ligeira convexidade dos passes e velocidade de soldagem adequada evitam a formação de trinca de solidificação [32].

2.3.3.6.1. CONSUMÍVEL DE SOLDAGEM ERNiCR3

Tais ligas são amplamente usadas em aplicações que requerem a combinação de resistência a tração moderada e excelente resistência à corrosão em temperaturas altas até 800° C, e em alguns casos podendo chegar a 1200° C. São primariamente endurecidas pela adição de elementos de liga substitucionais como Cr, Fe e Mo e são efetivos para tal aplicação se não for ultrapassado o limite de solubilidade da fase austenita do níquel [6].

De acordo com a norma ASME Seção II, Parte C, especificação SFA 5.14, o metal de adição classificação ERNiCr-3 (UNS N06082) é usado para soldagem homogênea de ligas de níquel-cromo-ferro e também para uniões dissimilares entre aços carbono, aços baixa liga e aços inoxidáveis utilizando o processo GTAW [3].

2.3.4. UNIÕES SOLDADAS

Para atender as mais diversas necessidades de engenharia, existem várias configurações possíveis uniões soldadas.

2.3.5. TIPOS DE UNIÃO SOLDADA

Solda homogênea é aquela realizada com o metal de adição com composição igual ao metal de base. Solda heterogênea corresponde à solda realizada com um metal de adição com composição diferente da composição do metal de base. Solda dissimilar é aquela em que os dois metais de base com composição química diferente são unidos. A Solda autógena é realizada sem a utilização de qualquer metal de adição [2].

2.3.5.1. UNIÕES HETEROGÊNEAS / DISSIMILARES

Existem várias situações em que soldagem dissimilar de materiais oferecem vantagens na engenharia. Como exemplo, pode ser citada a utilização de metais de adição à base de níquel na união dos aços Cr-Mo quando se deseja suprimir o TTAT.

Também são utilizados consumíveis à base de níquel quando da união entre Cr-Mo e AIA's, visando promover uma transição mais adequada entre os metais de base envolvidos. Esta aplicação requer o TTAT, que visa promover o alívio de tensões entre a ZAC do Cr-Mo e o amanteigamento utilizando metal de adição à base de níquel realizado previamente no chanfro do Cr-Mo.

O depósito de níquel não é susceptível à sensitização na temperatura de TTAT do Cr-Mo, contrário dos AIA's [20].

A diferença entre o coeficiente de expansão térmica entre o MB ferrítico com MS austenítico é uma das principais fontes de tensões residuais na soldagem dissimilar [27].

A utilização de metais de adição da família dos AIA's não são recomendados para a união de componentes e equipamentos fabricados em Cr-Mo sujeitos a carregamentos térmicos cíclicos, porque o metal de solda estaria susceptível à

fadiga térmica. Isto ocorre em virtude da grande diferença entre os coeficientes de expansão térmica [16].

Ao contrário, quando metal de adição de ligas de níquel é usado promove-se uma redução gradual do coeficiente de expansão térmica ao longo da junta distribuindo uniformemente as tensões resultantes da exposição às altas temperaturas [25].

A fluência é outro mecanismo de dano que pode ocorrer em uniões heterogêneas, proveniente da exposição destes componentes fabricados em Cr-Mo a altas temperaturas por determinado período de tempo. Este fenômeno é consequência da migração de Carbono de uma região do MB adjacente à linha de fusão. O resultado desta migração é o empobrecimento de Carbono desta estreita região [14].

O MS obtido na soldagem dissimilar apresenta composição química intermediária entre as duas ligas, promovendo relevante influência sobre a microestrutura da zona fundida, resistência à corrosão resultante e propriedades mecânicas. A grande diferença entre a composição química da liga de níquel e o MB resulta diferentes microestruturas e propriedades. Logo, a diluição deve ser controlada para prevenir a formação de fases intermetálicas que poderão fragilizar MS [25].

2.4. SOLDAGEM MULTIPASSE

2.4.1. CARACTERÍSTICAS DA ZF E ZAC NA SOLDAGEM MULTIPASSE

Juntas soldadas em um único passe são compostas de três regiões distintas: Zona Fundida (ZF) ou Metal de Solda (MS), Zona Afetada pelo Calor (ZAC) e Metal de Base (MB) [1].

A ZF é resultado da fusão do consumível de soldagem e do metal de base durante a operação de soldagem. A composição química da ZF está relacionada ao percentual de participação de metal de base no metal de solda, do metal de adição selecionado, dos parâmetros e processo de soldagem [2].

A ZAC compreende uma faixa do metal de base que não sofre fusão. No entanto, sofre transformações no estado sólido alterando suas propriedades mecânicas ou microestruturais, causadas pela exposição às altas temperaturas durante o ciclo térmico de soldagem. Está localizada imediatamente adjacente à linha de fusão.

O calor proveniente da soldagem tem efeitos distintos na ZAC sendo que, quanto mais elevada a taxa de resfriamento, maior será o potencial para formação de microestruturas frágeis (martensita), propiciando o aparecimento de trincas induzidas por hidrogênio, quando da utilização de determinados processos de soldagem [21].

Processos de soldagem diferem na maneira em que expõem a ZAC a esses eventos. Os parâmetros de soldagem, ou seja, a energia de soldagem, e espessura do metal de base afetam o ciclo térmico e consequentemente a largura da ZAC [21].

Metais de base de composições químicas muito diferentes apresentam comportamentos físicos distintos, baseados em sua condutividade térmica, contribuindo decisivamente na caracterização da ZAC formada.

A ZAC pode ser dividida em regiões de acordo com a faixa de temperaturas experimentadas durante o ciclo térmico de soldagem. Cada região tem tamanho de grão e características distintas, conforme demonstrado na figura 2.1 para uma solda de topo [21]:

- Região Supercrítica (região de crescimento de grão) – temperatura de pico na parte superior no campo da fase austenita. Ocorre significativo crescimento de grão, resultando na perda de propriedades mecânicas, evidente formação de martensita e redução da tenacidade. É uma área de resfriamento mais rápido e susceptível a trincas de hidrogênio.
- Região Crítica (região de refino de grão) – temperatura de pico acima da linha A_3 do diagrama de fases, com transformação total em austenita (processo de recristalização), tendo como resultado ductilidade elevada;

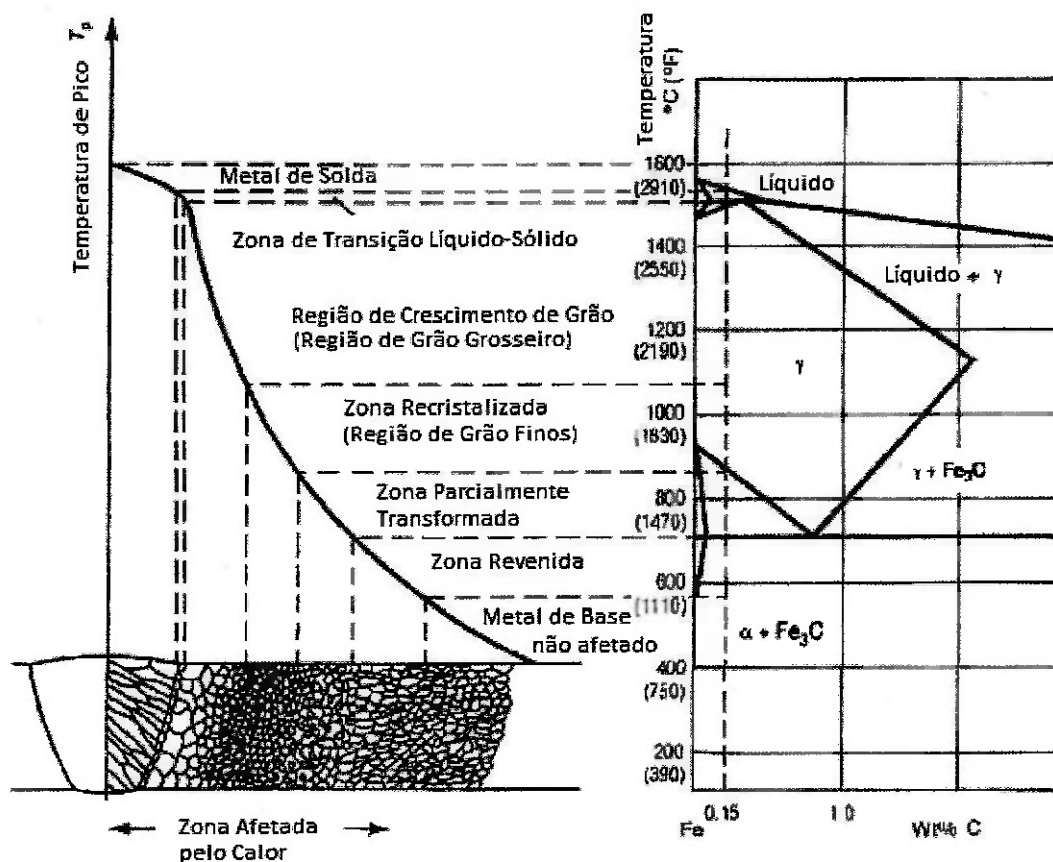


Figura 2.1: Ilustração das várias regiões da ZAC para uma junta soldada de topo [21].

- Região Intercrítica (região de transformação parcial) – temperaturas entre as linhas A₁ e A₃, apresenta recristalização parcial. Durante o resfriamento rápido, a austenita com alto carbono, transforma-se em ilhas de martensita, podendo ser obtidos uma mistura de martensita e bainita, resultando em propriedades mecânicas intermediárias;
- Região Subcrítica (região revenida) – é exposta a temperaturas abaixo da linha A₁, apresentando poucas alterações.

Materiais com grãos finos tem geralmente boa resistência à tração e boa tenacidade (dependendo da liga). Materiais com grãos grandes tem baixa resistência à tração, menor tenacidade e melhor resistência a altas temperaturas (fluência) [4].

A soldagem multipasse apresenta as mesmas regiões presentes em uma solda realizada em um passe único. No entanto, tanto a ZF como a ZAC são reaquecidas através do ciclo térmico dos subsequentes passes. Isto leva a mudanças microestruturais nestas duas regiões. Tais mudanças estão intimamente relacionadas à energia de soldagem que, adequadas, promovem mudanças no estado sólido que contribuem para uma melhora significativa das propriedades mecânicas desta união soldada [21]. A ZF tem seus grãos destruídos e recristalizados pelo passe de cobertura posterior promovendo o refino de grão [21].

A cada passe de cobertura a ZAC é parcialmente refinada introduzindo heterogeneidades nestas regiões com respeito à microestrutura e propriedades mecânicas. Na região supercrítica (região de grãos grosseiros) a recristalização é benéfica. Afastando-se da linha de fusão do passe de cobertura, o reaquecimento a temperaturas interiores a A3, geram pequenas regiões de baixa tenacidade, reflexo do crescimento de grão, denominadas de “Zonas Frágeis Localizadas”, conforme figura 2.2. Tais zonas podem ser o caminho para propagação de trincas [21].

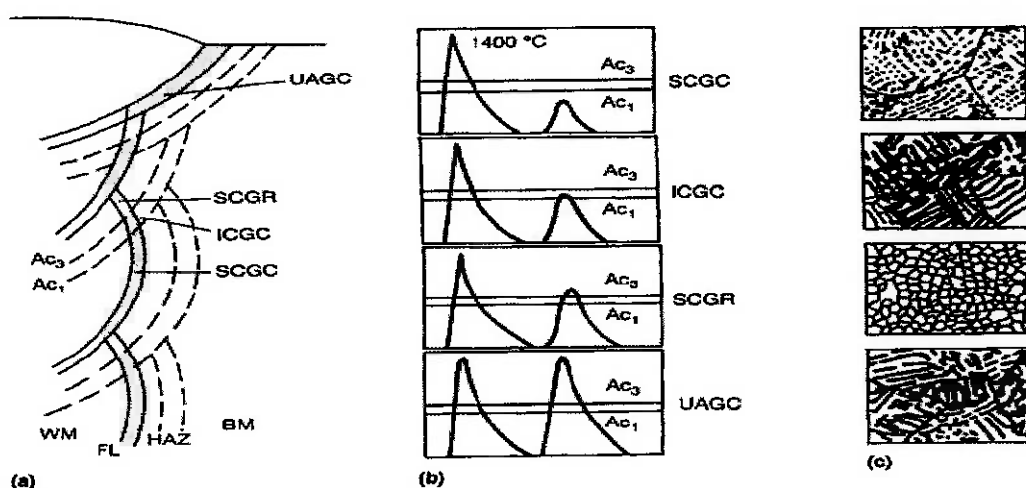


Figura 2.2: Ilustração esquemática demonstrando as diferentes subzonas da região de grão grosseiro na ZAC de uma solda multipasse. (A) Posição das subzonas em relação ao metal de base e metal de solda e a interação com os passes subsequentes de cobertura. (B) temperaturas que cada região foi submetida durante o reaquecimento. (C) Microestruturas das diferentes regiões [21].

2.4.2. TÉCNICAS DE DEPOSIÇÃO CONTROLADA

A técnica de deposição controlada é definida como um passe posicionado em um lugar específico da superfície de uma junta soldada com o objetivo de promover mudanças metalúrgicas na zona afetada pelo calor visando a substituição do procedimento de TTAT [24].

As características metalúrgicas da ZAC da primeira camada de solda podem ser alteradas através das isoterms geradas durante a operação de soldagem dos passes subsequentes, promovendo melhora significativa das propriedades

mecânicas da Região de Grãos Grosseiros, resultado do processo de refino desta estreita faixa adjacente à linha de fusão, quando submetida a temperaturas entre 900° e 1200°C [29].

O controle da microestrutura pode ser obtido através das técnicas meia e dupla camada. O sucesso do reparo empregando técnicas de deposição controlada sem TTAT está diretamente associado à qualidade e ao tempo dispensado ao treinamento dos soldadores, ao tempo dispensado na análise, avaliação e seleção dos parâmetros de soldagem bem como comprometimento da equipe.

2.4.2.1. TÉCNICA DA MEIA CAMADA

A técnica da meia camada consiste na remoção por esmerilhamento de metade da altura do depósito do primeiro passe [30]. Com esta operação a camada do refino de grão se torna facilitado pela deposição do passe subsequente. No entanto, existe uma grande dificuldade no controle em campo de quanto seria a porção ideal a ser removida. Com o desenvolvimento da técnica, viu-se que a efetividade da segunda camada poderia ser otimizada apenas uma limpeza e leve esmerilhamento e aplicando uma energia de soldagem mais alta que aquela usada no primeiro passe utilizando-se uma relação de 1,4 da energia de soldagem da primeira camada. [31]. A figura 2.3 ilustra a técnica multipasse com aplicação da meia camada.

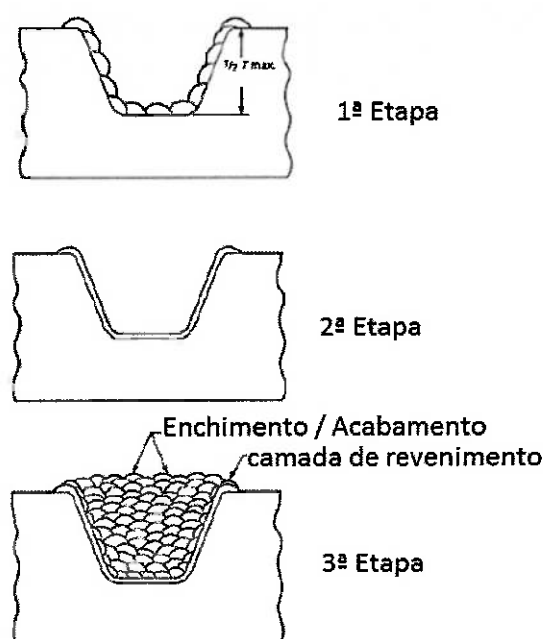


Figura 2.3: Ilustração da técnica multipasse com aplicação da meia camada [24].

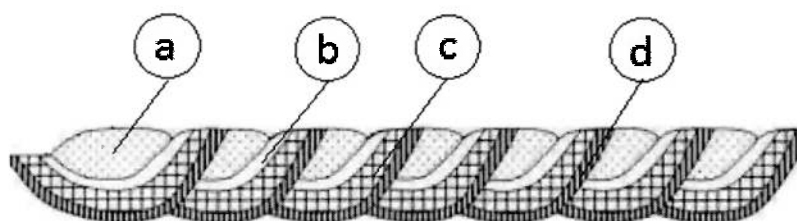


Figura 2.4: Ilustração das diferentes regiões durante deposição da primeira camada: metal de solda (a), as regiões de grãos grosseiros (b), região de grãos refinados (c) e região intercrítica (d) [21].

2.4.2.2. TÉCNICA DA DUPLA CAMADA.

A técnica da dupla camada consiste na deposição de cordões de solda subsequentes visando refinar a RGG da ZAC do passe anterior [30]. A figura 2.5 mostra o efeito da sobreposição de 50% sobre o passe adjacente (anterior) após conclusão de uma camada. Pode ser notado o refino parcial da ZAC e ZF (efeito da sobreposição) e possível efeito de revenimento [21].

O Código ASME prevê na Seção IX [24], através do QW-290 os requisitos para a qualificação de Procedimentos de Soldagem utilizando a técnica da dupla camada, tanto para soldas de produção como reparos. A figura 2.5 ilustra a segunda camada depositada diretamente sobre a primeira.

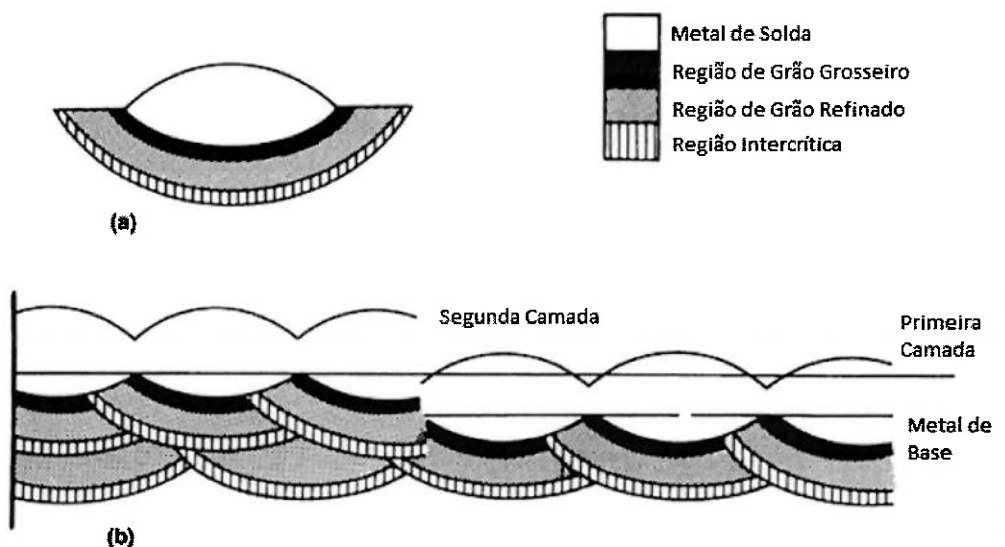


Figura 2.5: Ilustração da técnica de deposição controlada dupla camada.

2.5. PROCESSO DE SOLDAGEM TIG

O processo de soldagem TIG consiste em um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo não consumível de tungstênio e o metal de base. O calor gerado pelo arco funde o metal de base e, com a movimentação da tocha sobre a junta, as partes são unidas progressivamente [1].

No caso de uso metal de adição, este é adicionado pela borda da poça de fusão com a finalidade de preencher a junta. Para soldagem automatizada ou mecanizada é usado um alimentador para o metal de adição podendo ser usado arame quente ou frio. A poça de fusão é protegida da atmosfera através de um gás de proteção armazenado em cilindros. Este gás de proteção pode ser argônio ou hélio [22].

Os parâmetros principais do processo de soldagem são tensão (responsável pelo comprimento do arco), corrente de soldagem, velocidade de soldagem e tipo do gás de proteção. A quantidade de energia produzida pelo arco é proporcional a corrente e tensão. A quantidade de energia absorvida por unidade de comprimento da solda é inversamente proporcional à velocidade de soldagem. A penetração é maior quando se usa o gás de proteção Hélio com relação ao Argônio [22].

3. OBJETIVOS

Os objetivos deste trabalho são:

- Confrontar as propriedades mecânicas e metalúrgicas de três juntas soldadas utilizando técnica de deposição controlada e técnicas de deposição convencionais com e sem tratamento térmico de alívio de tensões.
- Determinar a efetividade da técnica de deposição controlada de dupla camada no refino de grão das RGG da ZAC em uma solda multipasse.
- Avaliar a viabilidade da supressão do procedimento de TTAT na soldagem de manutenção de tubos de serpentinas de fornos de processo, fabricados em 5Cr-1/2Mo.
- Avaliar o comportamento mecânico das juntas soldadas após serem submetidos à temperatura de trabalho de 450°C nos períodos de 1, 10 e 100 horas.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho foi realizado utilizando três procedimentos de soldagem multipasse, onde o primeiro foi realizado através do método de deposição convencional sem TTAT, o segundo executado utilizando técnicas de deposição controlada dupla camada sem TTAT e último fabricado através de deposição convencional com TTAT.

Foram obtidos 4 corpos de prova para cada procedimento proposto. Posteriormente, 3 CP's de cada conjunto foram expostos à temperatura de 450°C em períodos de tempo de 1, 10 e 100 horas, visando comparar as propriedades mecânicas das ZAC's de cada procedimento de soldagem realizado e as respectivas variações obtidos como resultado da exposição à temperatura de 450°C:

Tabela 4.1: Identificação dos corpos de prova obtidos.

Tipo de Procedimento	Identificação corpo de teste			
	CP01	CP02	CP03	CP04
PROC01 – Deposição convencional sem TTAT;				
PROC02 – Deposição controlada dupla camada sem TTAT.				
PROC03 – Deposição convencional com TTAT.				

Paralelamente, foi selecionado um metal de adição para o processo TIG que promovesse uma transição metalúrgica intermediária entre os metais de base selecionados e também pudesse ser submetido ao procedimento de TTAT sem prejuízos do ponto de vista metalúrgico.

Outro ponto observado está relacionado à capacidade do consumível de soldagem produzir ZF's não temperáveis, tendo em vista a proposta de supressão do procedimento de TTAT, requisito obrigatório para o material 5Cr-0,5Mo, conforme preconizado na norma ASME B31.3 [10].

4.1. MATERIAIS

Os metais de base utilizadas na produção dos corpos de prova, assim como o metal de adição selecionado para o procedimento de soldagem são os seguintes:

- Metal de base 1 – aço baixa liga 5Cr-0,5Mo, especificação SA-213 Grau T5 na forma de tubo sem costura 7,0 mm de espessura e 6 polegadas de diâmetro;
- Metal de base 2 – aço inoxidável 12Ni-18Cr-2,5Mo, especificação SA-213 TP317L na forma de tubo sem costura 7,0 mm de espessura e 6 polegadas de diâmetro;

- Metal de Adição – liga de níquel na forma de vareta / especificação – AWS A5.14 / classificação – ERNiCr3 / diâmetro – 3,25mm e 2,5mm / marca comercial – Kestra – NICROWELD 82

4.1.1. METAL DE BASE

De acordo com a norma ASME seção II Parte A1 [33], o metal de base SA-213 Grau T5 tem composição química conforme tabela 4.1 abaixo:

Tabela 4.2: Composição química do metal de base SA-213 Grau T5.

Elementos	Símbolo	% em peso
Carbono	C	0,15
Manganês	Mn	0,30 - 0,60
Fósforo (Máximo)	P	0,025
Enxofre (Máximo)	S	0,025
Silício	Si	0,50
Cromo	Cr	4,0 a 6,0
Molibdênio	Mo	0,45 - 0,65

De acordo com a norma ASME seção II Parte A1 [33], o metal de base SA-213 TP317L tem composição química conforme tabela 4.1 abaixo:

Tabela 4.3: Composição química do metal de base SA-213 Grau TP317L.

Elementos	Símbolo	% em peso
Carbono	C	0,035
Manganês	Mn	2,0
Fósforo (Máximo)	P	0,045
Enxofre (Máximo)	S	0,030
Silício	Si	1,0
Cromo	Cr	18,0 a 20,0
Níquel	Ni	11,0 a 15,0
Molibdênio	Mo	3,0 – 4,0

4.1.2. METAL DE ADIÇÃO

De acordo com a norma ASME seção II Parte C, o metal de adição especificação SFA 5.14 classificação ERNiCr3, tem composição química conforme tabela 4.3 abaixo:

Tabela 4.4: Composição química do consumível de soldagem ERNiCr3.

Elementos	Símbolo	% em peso
Carbono	C	0,10
Manganês	Mn	2,5 a 3,5
Fósforo (Máximo)	P	0,03
Enxofre (Máximo)	S	0,015
Silício	Si	0,50
Cromo	Cr	18,0 a 22,0
Ferro	Fe	3
Cobre	Cu	0,5
Níquel	Ni	67,0 mínimo
Titânio	Ti	0,75
Nióbio, Tântalo	Nb, Ta	2,0 a 3,0
Outros elementos		0,5

4.2. PARÂMETROS DE SOLDAGEM

A configuração de junta definida para o experimento foi a tipo "V", em tubo de 6 polegadas de diâmetro e 7,0 mm de espessura. A soldagem foi executada utilizando-se o processo TIG para a raiz, enchimento e acabamento das respectivas juntas soldadas. A sequência de soldagem foi definida para cada método de deposição convencional e também para a técnica de deposição controlada.

Para a técnica de deposição controlada (PROC02) foram utilizadas três camadas na face do chanfro do MB 5Cr-0,5Mo, com o objetivo de se obter o refino de grão da RGG da ZAC proveniente da primeira camada. Foi utilizada uma relação de energias de soldagem entre a primeira e segunda camada da ordem de 1,4 a 1,6, visando submeter a RGG da ZAC do primeiro passe a temperaturas na faixa entre 900° e 1200°C. Em seguida, o corpo de teste foi usinado e preparado o chanfro tipo "V" para a posterior união convencional com MB de SA-213 TP317L sem TTAT.

As tabelas abaixo resumem os parâmetros de soldagem nos três procedimentos.

Tabela 4.5: Parâmetros de soldagem procedimento deposição convencional sem TTAT.

PARÂMETROS DE SOLDAGEM DO CORPO DE TESTE EXECUTADO POR DEPOSIÇÃO CONVENCIONAL SEM TTAT (PROC01)									
Camada	N° Passe	Consum.	Diâm. (mm)	Tensão (V)	Tipo Polar.	Corrente (A)	Veloc. Soldagem (mm/min)	Pré-Aquec. (°C)	Energia de Soldagem (J/mm)
1	1	ER-NiCr3	3,25	12	CCPD	125	90	N/A	400
	2	ER-NiCr3	3,25	11	CCPD	125	90	N/A	367
2	3	ER-NiCr3	3,25	12	CCPD	120	100	N/A	346
	4	ER-NiCr3	3,25	11	CCPD	120	100	N/A	317
3	5	ER-NiCr3	3,25	12	CCPD	120	110	N/A	314
	6	ER-NiCr3	3,25	12	CCPD	120	110	N/A	314

Tabela 4.6: Parâmetros de soldagem experimento deposição controlada sem TTAT.

PARÂMETROS DO AMANTEIGAMENTO DO CORPO DE TESTE EXECUTADO POR DEPOSIÇÃO CONTROLADA POR DUPLA CAMADA SEM TTAT (PROC02)									
Camada	Nº Passe	Consum.	Diâm. (mm)	Tensão (V)	Tipo Polar.	Corrente (A)	Veloc. Soldagem (mm/min)	Pré-Aquec. (°C)	Energia de Soldagem (J/mm)
1	1	ER-NiCr3	2,5	11	CCPD	100	120	150	220
	2	ER-NiCr3	2,5	10	CCPD	100	120	160	200
	3	ER-NiCr3	2,5	10,5	CCPD	100	120	170	210
2	4	ER-NiCr3	3,2	11,5	CCPD	120	105	170	315
	5	ER-NiCr3	3,2	11,5	CCPD	120	110	180	301
3	6	ER-NiCr3	3,2	11,5	CCPD	120	100	180	331
	7	ER-NiCr3	3,2	10,5	CCPD	115	105	150	276

Tabela 4.7: Parâmetros de soldagem experimento deposição convencional com TTAT.

PARÂMETROS DO AMANTEIGAMENTO DO CORPO DE TESTE EXECUTADO POR DEPOSIÇÃO CONVENCIONAL COM TTAT (PROC03)									
Camada	Nº Passe	Consum.	Diâm. (mm)	Tensão (V)	Tipo Polar.	Corrente (A)	Veloc. Soldagem (mm/min)	Pré-Aquec. (°C)	Energia de Soldagem (J/mm)
1	1	ER-NiCr3	3,25	10,5	CCPD	110	120	140	231
	2	ER-NiCr3	3,25	10,5	CCPD	110	110	150	252
2	3	ER-NiCr3	3,25	11,5	CCPD	110	110	160	276
	4	ER-NiCr3	3,25	10,5	CCPD	110	120	160	231
3	5	ER-NiCr3	3,25	10,5	CCPD	110	110	170	252
	6	ER-NiCr3	3,25	11	CCPD	110	120	170	242

As soldas de união entre os materiais de base 5Cr-0,5Mo e 317L foram executadas sem pré-aquecimento e com parâmetros de soldagem semelhantes aos aplicados no procedimento de amanteigamento dos experimentos com

deposição controlada sem TTAT (PROC02) e deposição convencional com TTAT (PROC03).

4.3. PARÂMETROS TTAT

Para a técnica de deposição convencional com TTAT (PROC03), foi executado o amanteigamento do MB 5Cr-0,5Mo com metal de adição ERNiCr3 e realizado o TTAT. Em seguida, o corpo de teste foi usinado e preparado o chanfro tipo "V" para a posterior união convencional com MB de SA-213 TP317L. A junta soldada foi submetida ao tratamento térmico de alívio de tensões através de aquecimento por resistência elétrica de acordo com os parâmetros abaixo:

Tabela 4.8: Parâmetros usados para o TTAT.

PARÂMETROS TTAT				
Temperatura Controle (°C)	Taxa Aquecimento (°C/h)	Temperatura Patamar (°C)	Tempo Patamar (horas)	Taxa Resfriamento (°C/h)
300	150	730	02:00	150

4.4. ANÁLISE MICROESTRUTURAL

Com o objetivo de analisar a microestrutura dos corpos de provas as seguintes técnicas foram empregadas:

4.4.1. PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

Concluída a etapa de fabricação dos três corpos de teste e TTAT do PROC03, teve início a etapa de remoção dos três conjuntos de corpos de prova, compondo o total de 12 CP's e posterior exposição à temperatura de 450°C de três CP's de cada conjunto.

Finalizada esta etapa os CP's foram preparados para o ensaio de Microscopia Ótica e Dureza Vickers.

4.4.2. PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA PARA MICROSCOPIA ÓTICA

Inicialmente as amostras foram embutidas em baquelita, subseqüentemente realizou-se a preparação metalográfica considerando as seguintes etapas:

- i. Lixamento sob fluxo de água da amostra embutida, utilizando-se lixas de carbeto de silício de 100, 240, 300, 400, 600 e 1000mesh, nesta sequência;
- ii. Polimento da amostra em pano, com pasta abrasiva de diamante, de 9, 3 e 1 μ m, nesta sequência;

Uma vez obtida a superfície totalmente polida o material foi submetido ao ataque químico com os reagentes Nital 5% (5 ml de ácido nítrico e 95 ml de álcool etílico), durante um tempo aproximado de 30 segundos, e ácido Crômico 10% por 2 minutos, para o metal de base e revestimento, respectivamente.

Uma vez revelada a microestrutura, a aquisição de imagens foi realizada utilizando a câmera digital Opticam OPT 10000 acoplada no microscópio de marca Olympus BX60M.

4.4.3. METALOGRAFIA QUANTITATIVA

A análise da microestrutura para cada um dos doze corpos de prova foi realizada sobre a seção ao longo da espessura, visualizando a junta soldada em corte, no sentido longitudinal do tubo.

4.5. ENSAIOS DE AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO

Para avaliação do desempenho mecânico foi utilizado o ensaio de microdureza Vickers, visando avaliar as propriedades mecânicas obtidas na Zona Afetada pelo Calor e Zona Fundida das uniões soldadas para os três procedimentos de soldagem e condições propostas neste trabalho.

4.5.1. ENSAIO DE MICRODUREZA VICKERS

O perfil de dureza definido para este trabalho seguiu as condições preconizadas no código ASME Seção IX. As impressões realizadas na raiz e na face localizaram-se a 1mm de ambas extremidades da seção do CP, transversalmente à solda, conforme figura 4.1 abaixo.

A carga definida para o ensaio foi 0,5Kg com espaçamento entre impressões de 0,5mm ao longo das regiões de interesse (ZF, ZAC, MB), devendo a primeira impressão ser realizada na ZAC a 0,25mm da linha de fusão.

Foi utilizado o microdurômetro da marca SHIMADZU. A carga utilizada foi de 0,5 kgf durante 15s.

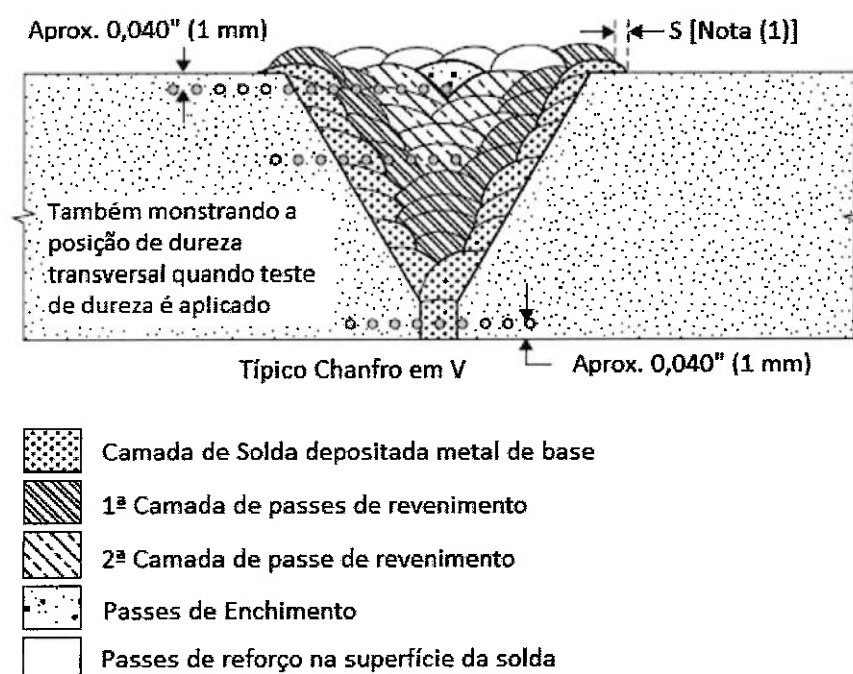


Figura 4.1: ASME seção IX Ano 2010, QW.462.12, pág. 176

Abaixo fotos ilustrando as impressões de microdureza nos corpos de prova.



Figura 4.2: Linha de impressões através da ZF, linha de fusão e ZAC.

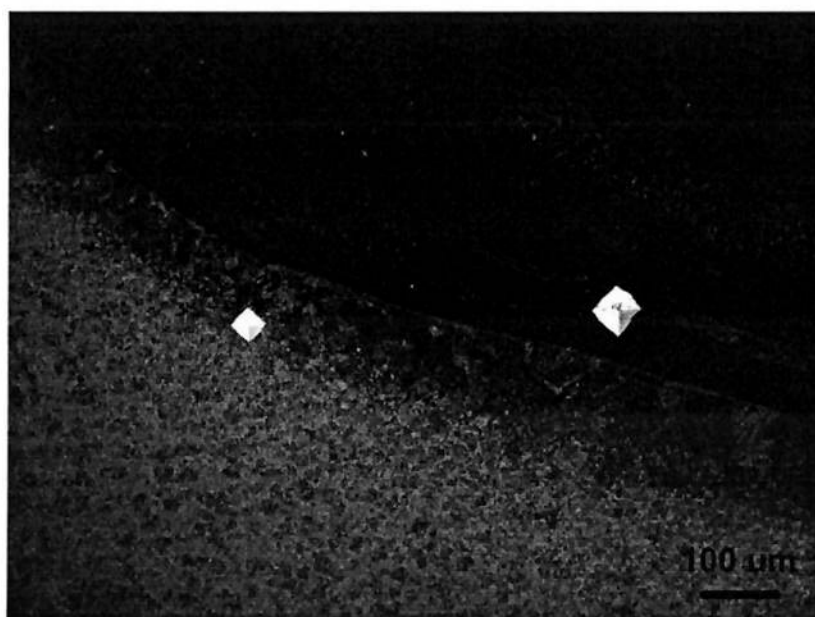


Figura 4.3: Imagem ilustrando as duas impressões de microdureza adjacentes à linha de fusão.

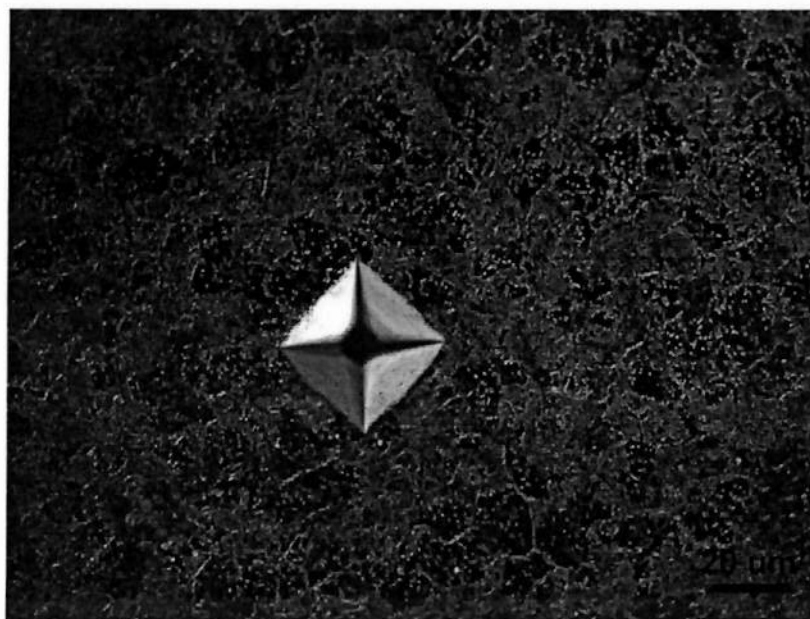


Figura 4.4: Detalhe da impressão na ZAC do MB 5Cr-0,5Mo.

4.6. SIMULAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE TRABALHO

O trabalho contempla duas propostas onde a primeira tem por objetivo avaliar a efetividade da técnica de deposição controlada frente à técnica de deposição convencional com TTAT. A segunda proposta está relacionada à influência da temperatura de operação (aproximadamente 450°C) sobre a ZAC das juntas soldadas de uma serpentina de forno, para avaliação das variações do ponto de vista metalúrgico e mecânico.

Para a avaliação da segunda proposta três CP's de cada conjunto de quatro foram expostos à temperatura de trabalho, simulando as condições

operacionais as quais as juntas soldadas estão submetidas. O quarto CP de cada set foi mantido no estado "como soldado".

- Rampa de subida foi de 150 °C/h,
- Temperatura de patamar de 450°C
- Taxa de resfriamento 100 °C/h.
- Tempo na temperatura de patamar: 1 hora, 10 horas e 100 horas.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. CARACTERIZAÇÃO MACROGRÁFICA DAS JUNTAS SOLDADAS.

Abaixo imagens macrografias da junta soldada através procedimento de soldagem através do procedimento de soldagem:

5.1.1. PROC01 – Deposição convencional sem Tratamento Térmico de Alívio de Tensões.

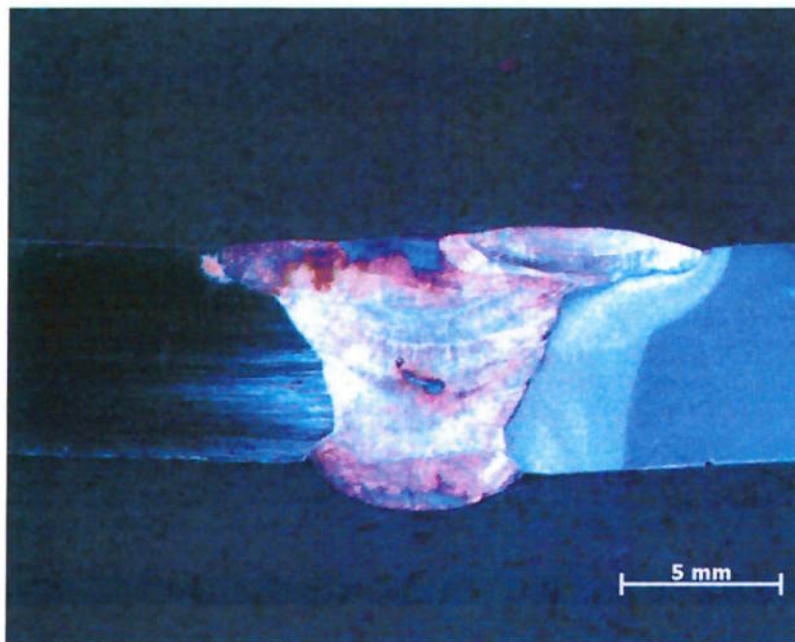


Figura 5.1: CP01 - Sem exposição à temperatura de trabalho.

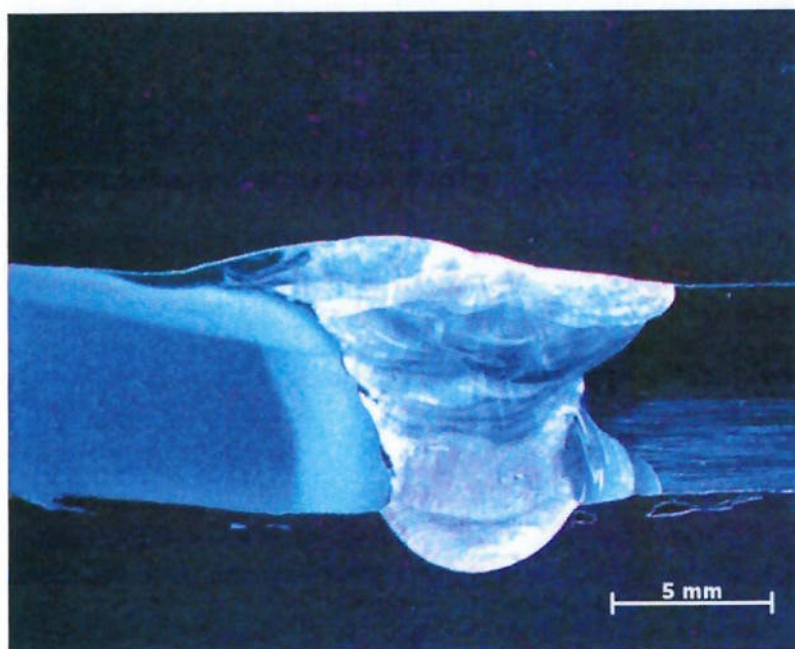


Figura 5.2: CP02 - Tempo de exposição 1 hora.

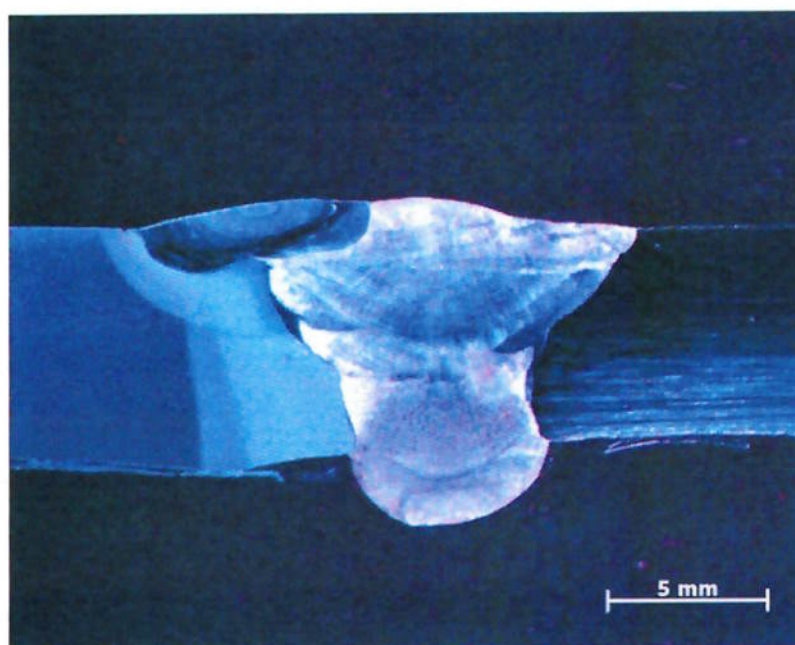


Figura 5.3: CP03 - Tempo de exposição 10 horas.

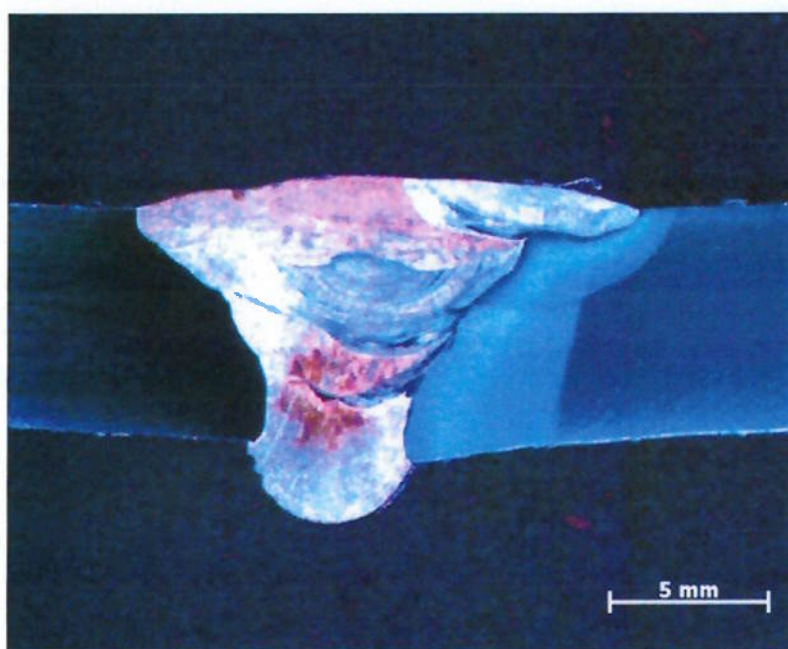


Figura 5.4: CP04 - Tempo de exposição 100 horas.

5.1.2. PROC02 – Técnica de Deposição controlada Dupla Camada sem TTAT.

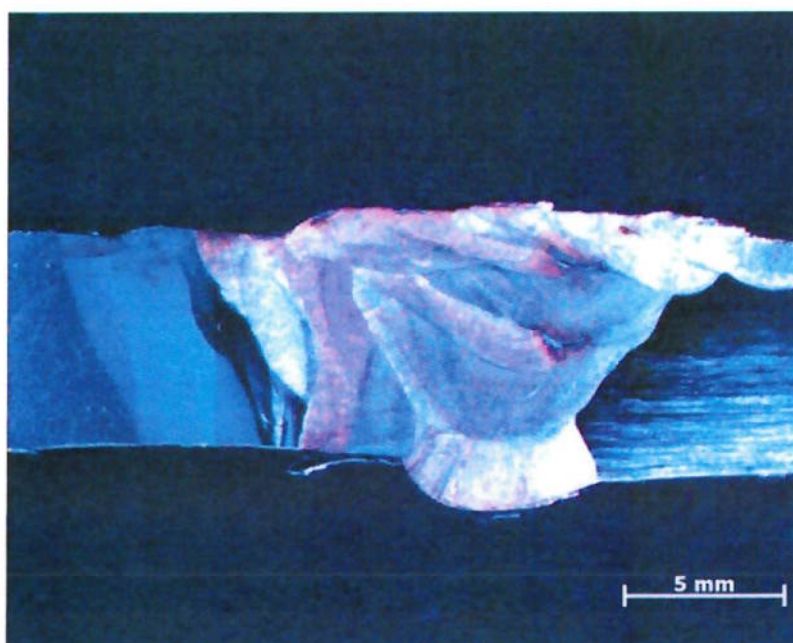


Figura 5.5: CP05 - Sem exposição à temperatura de trabalho.

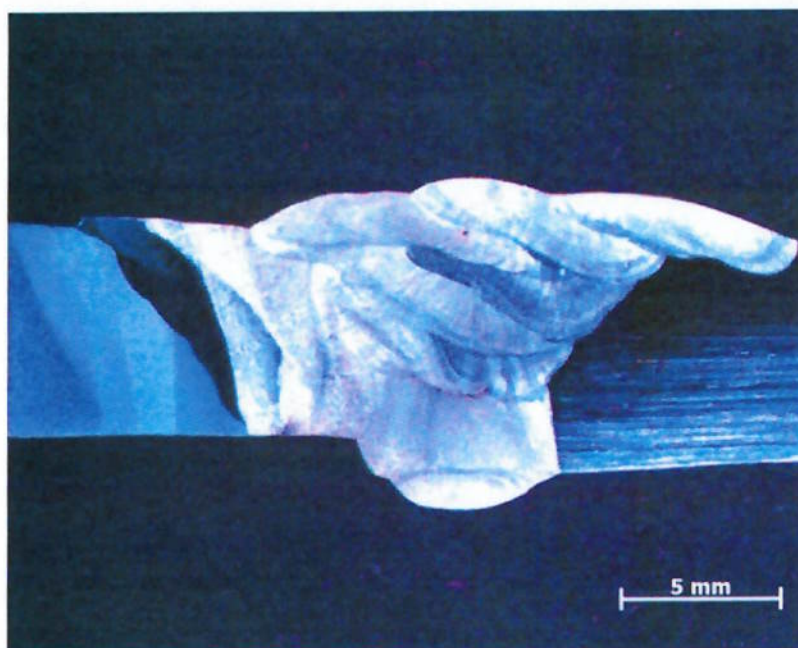


Figura 5.6: CP06 - Tempo de exposição 1 hora.

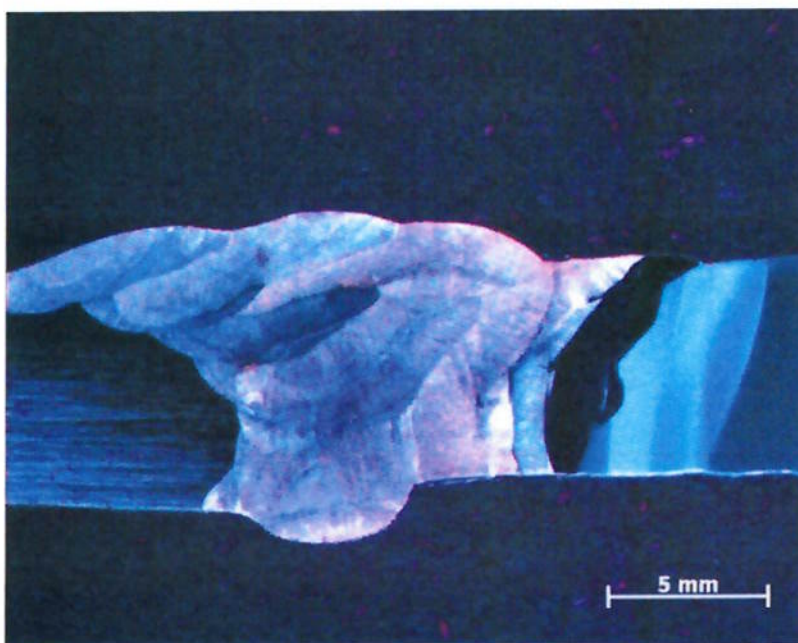


Figura 5.7: CP07 - Tempo de exposição 10 horas.

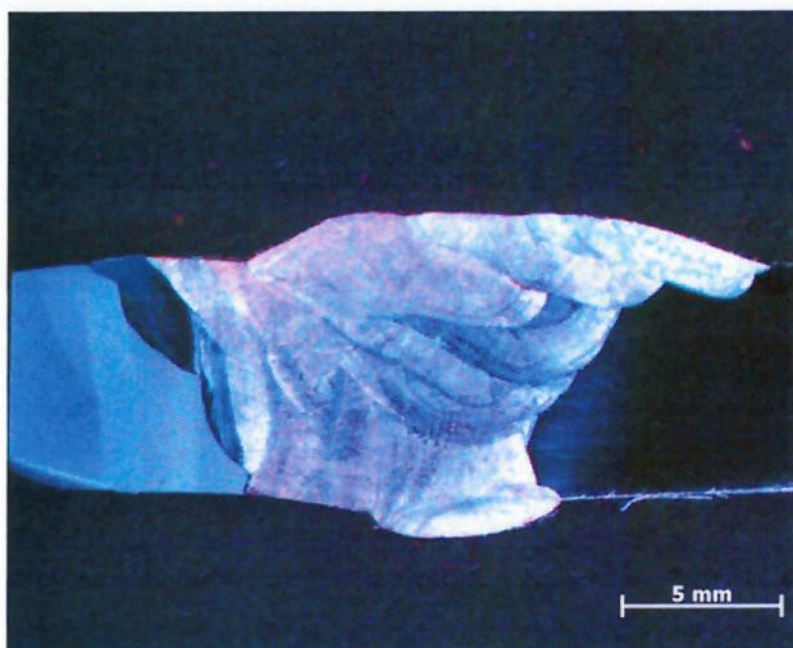


Figura 5.8: CP08 - Tempo de exposição 100 horas.

5.1.3. PROC03 – Técnica de Deposição convencional com TTAT.

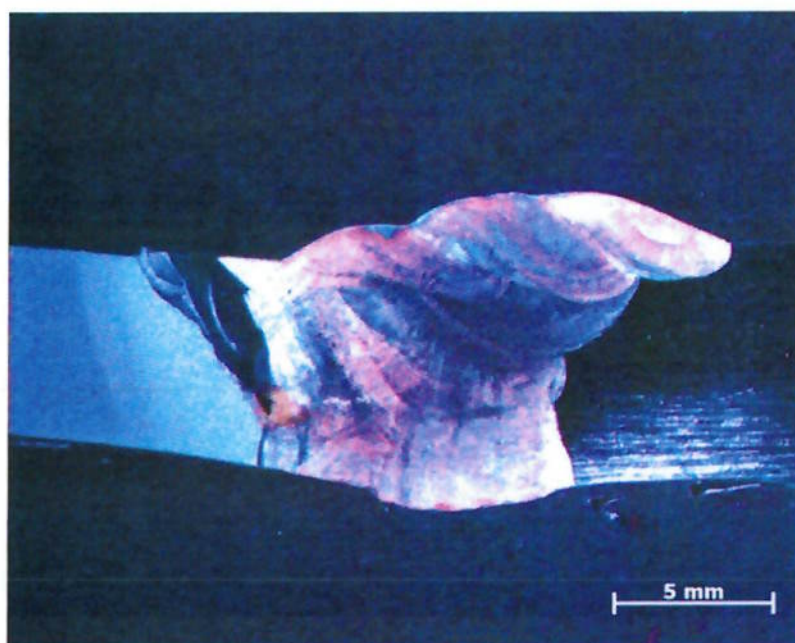


Figura 5.9: CP09 - Sem exposição à temperatura de trabalho.

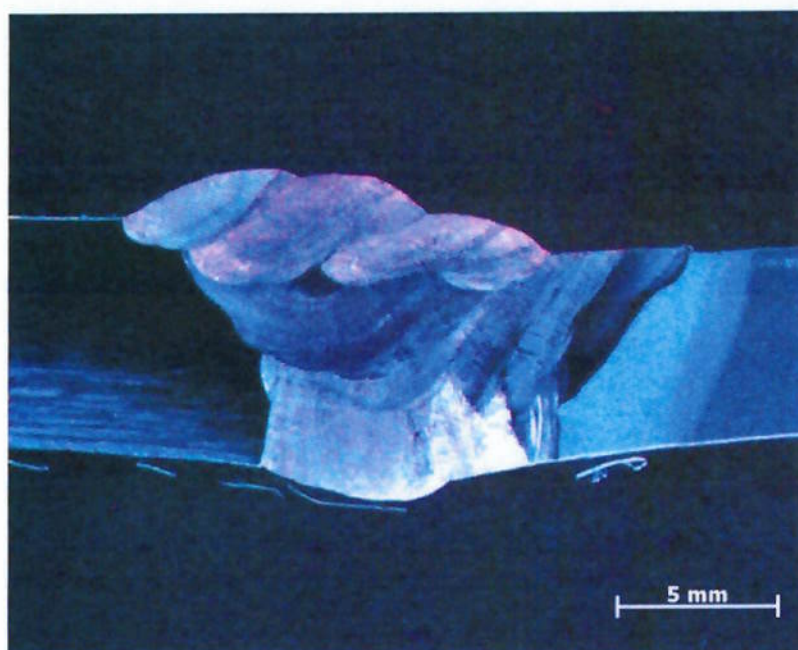


Figura 5.10: CP10 - Tempo de exposição 1 hora.

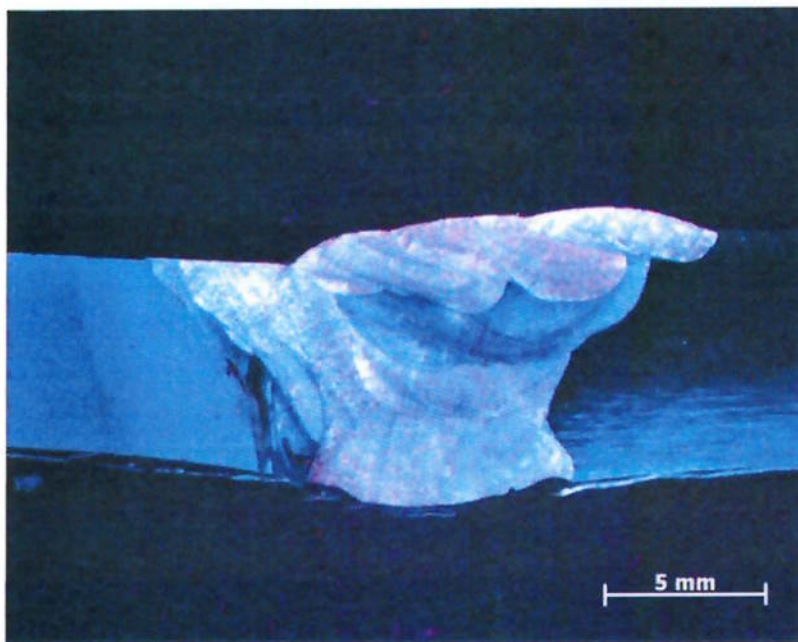


Figura 5.11: CP11 - Tempo de exposição 10 horas.

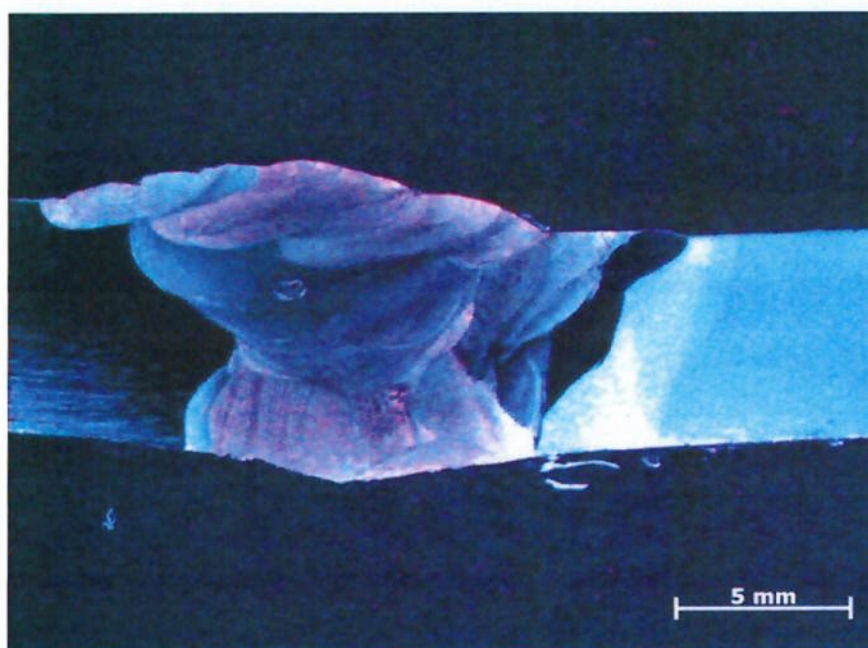


Figura 5.12: CP12 - Tempo de exposição 100 horas.

5.2. CARACTERIZAÇÃO DA MICROESTRUTURA DA ZAC E ZF

5.2.1. MICROSCOPIA ÓTICA DA ZF E ZAC DO MB 5Cr-0,5Mo.

Abaixo imagens micrográficas da ZF e ZAC do metal de base 5Cr-0,5Mo da junta soldada através procedimento de soldagem:

5.2.1.1. PROC01 – Deposição convencional sem Tratamento Térmico de Alívio de Tensões.

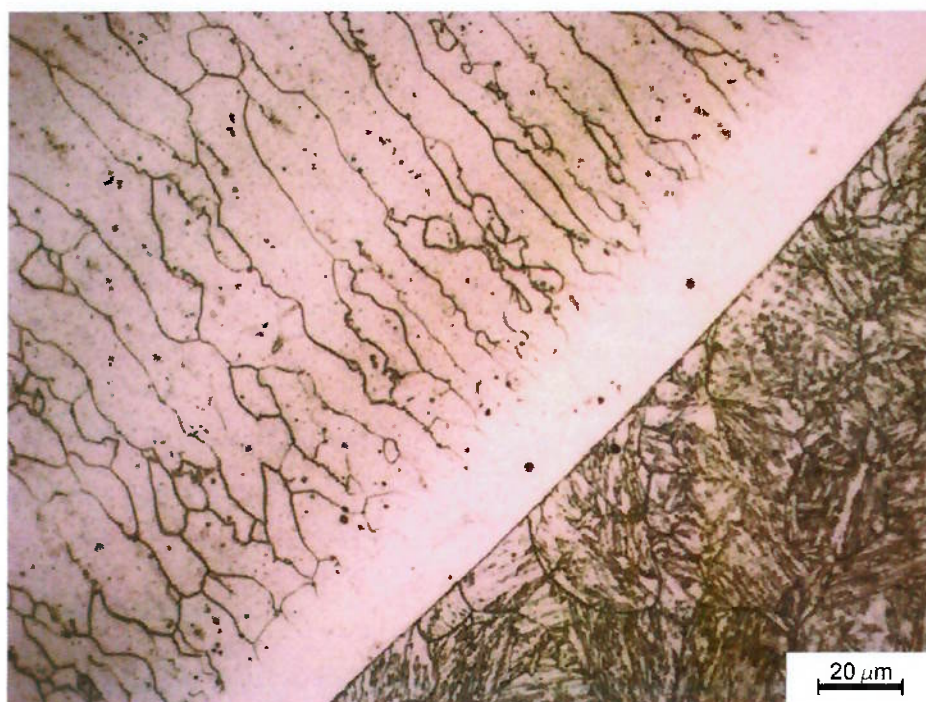


Figura 5.13: CP01 - Sem exposição à temperatura de trabalho.

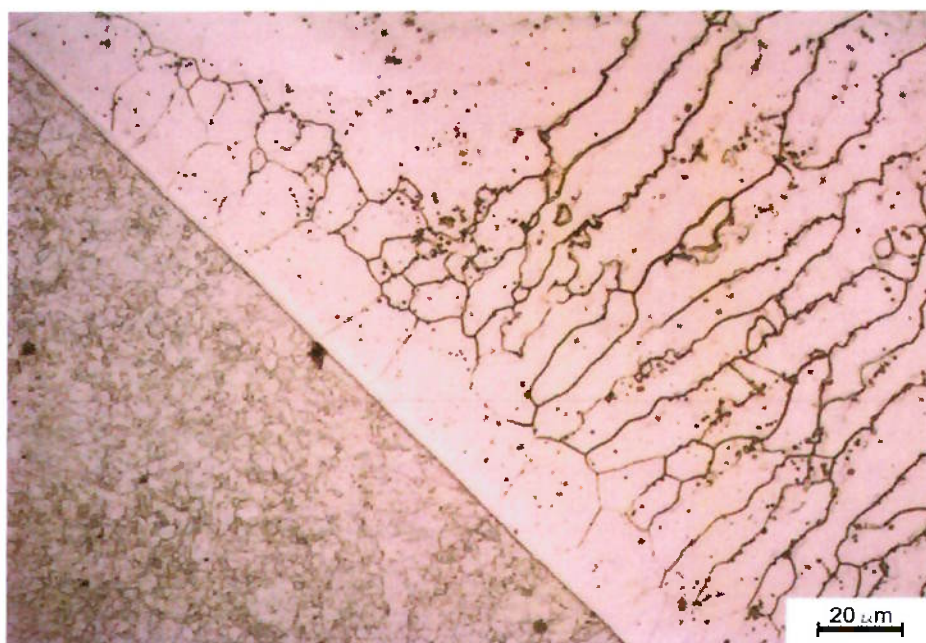


Figura 5.14: CP02 - Tempo de exposição 1 hora

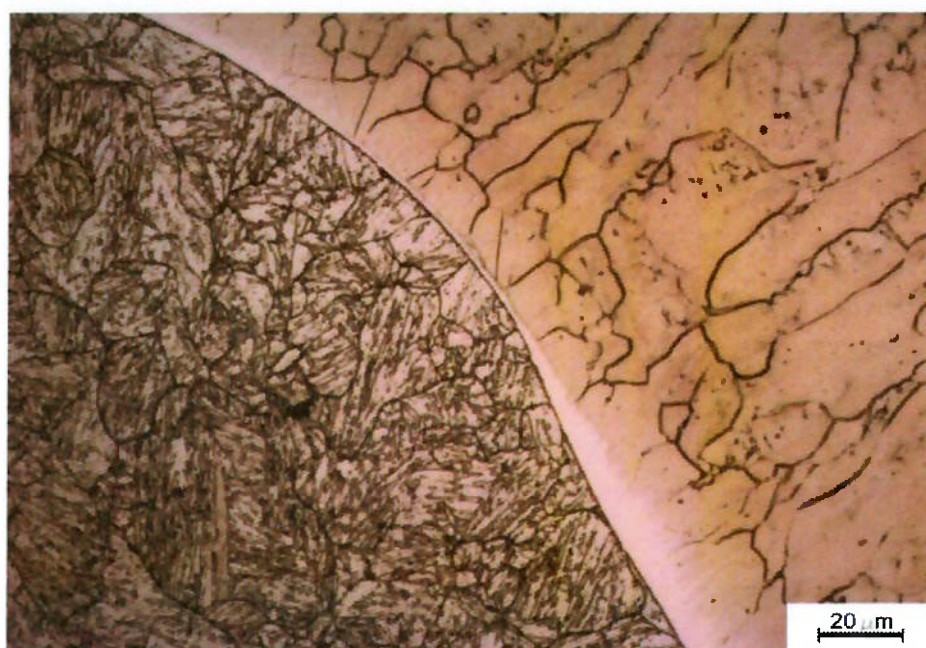


Figura 5.15: CP03 - Tempo de exposição 10 horas.

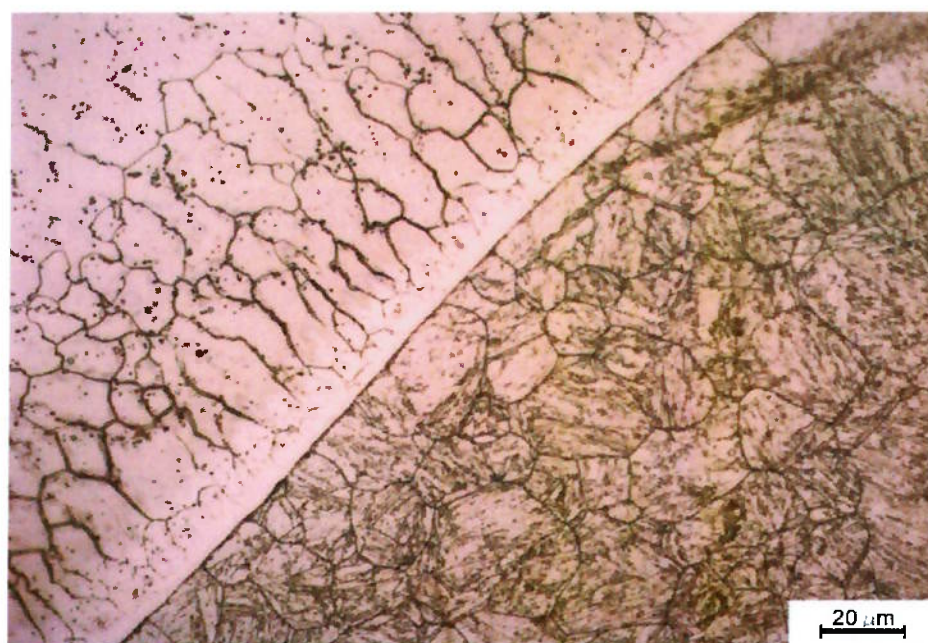


Figura 5.16: CP04 - Tempo de exposição 100 horas.

5.2.1.2. PROC02 – Técnica de Deposição controlada Dupla Camada sem TTAT

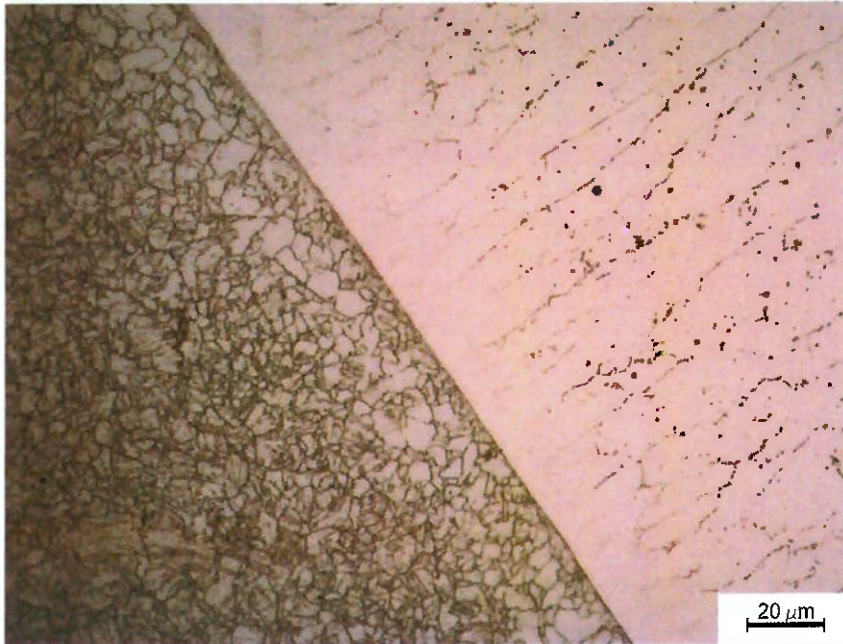


Figura 5.17: CP05 - Sem exposição à temperatura de trabalho.

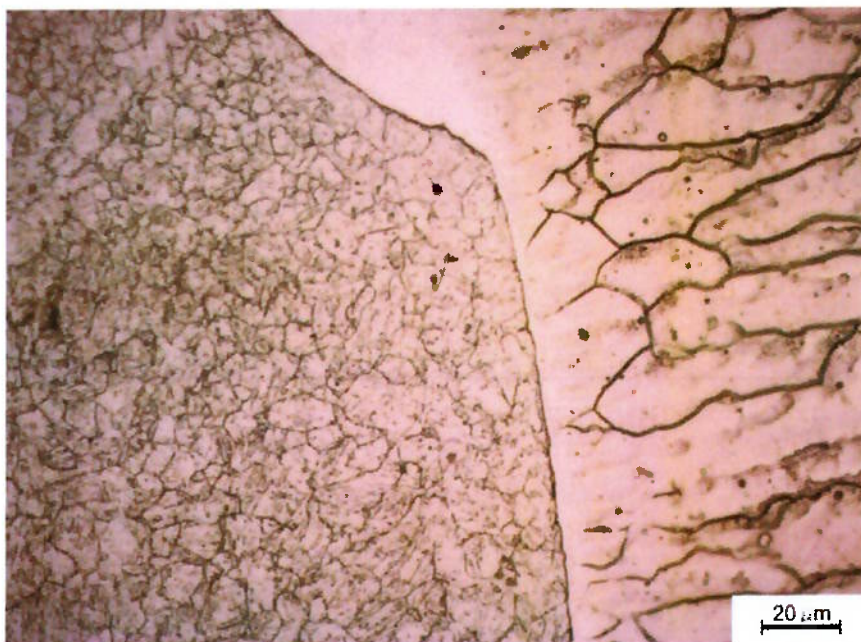


Figura 5.18: CP06 - Tempo de exposição 1 hora.

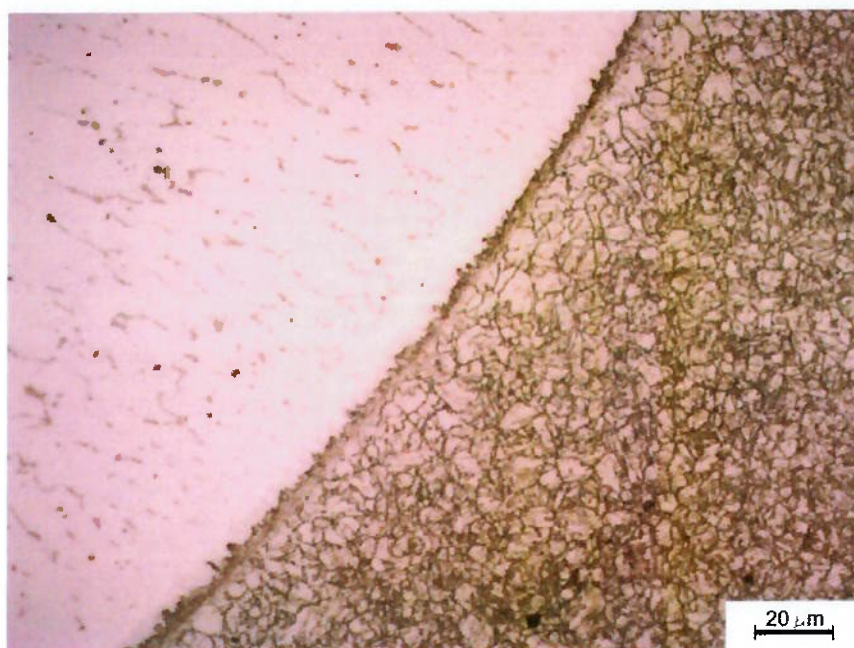


Figura 5.19: CP07 - Tempo de exposição 10 horas.

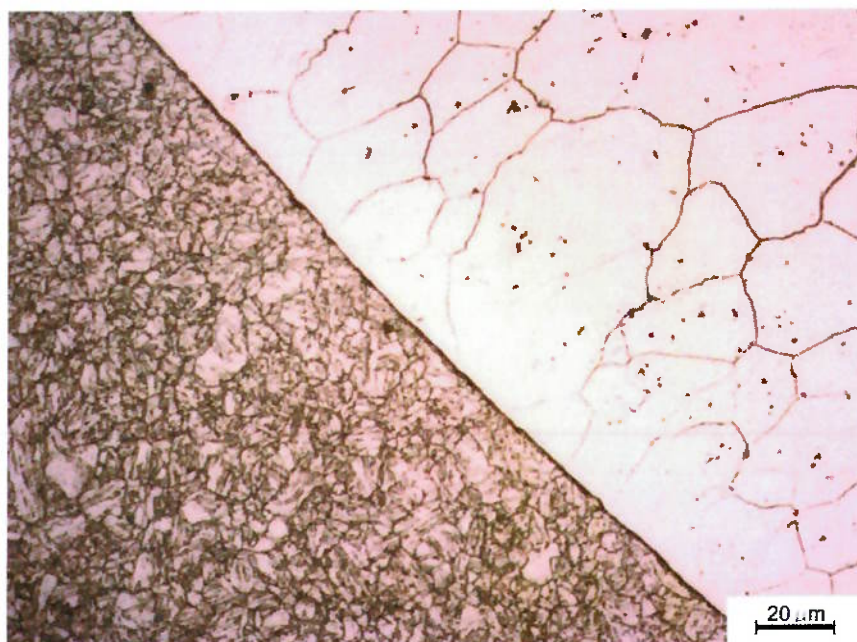


Figura 5.20: CP08 - Tempo de exposição 100 horas.

5.2.1.3. PROC03 – Técnica de Deposição convencional com TTAT.

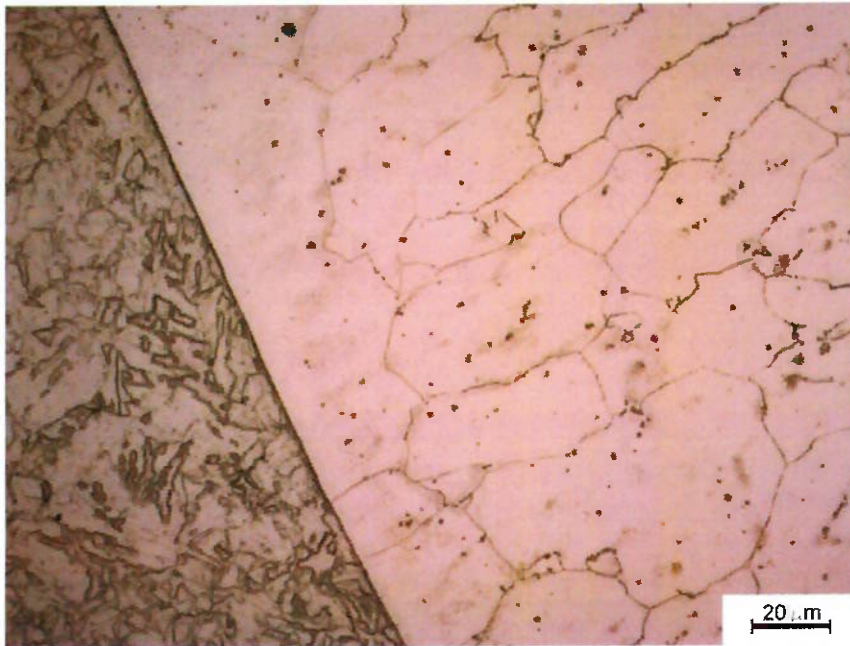


Figura 5.21: CP09 - Sem exposição à temperatura de trabalho.

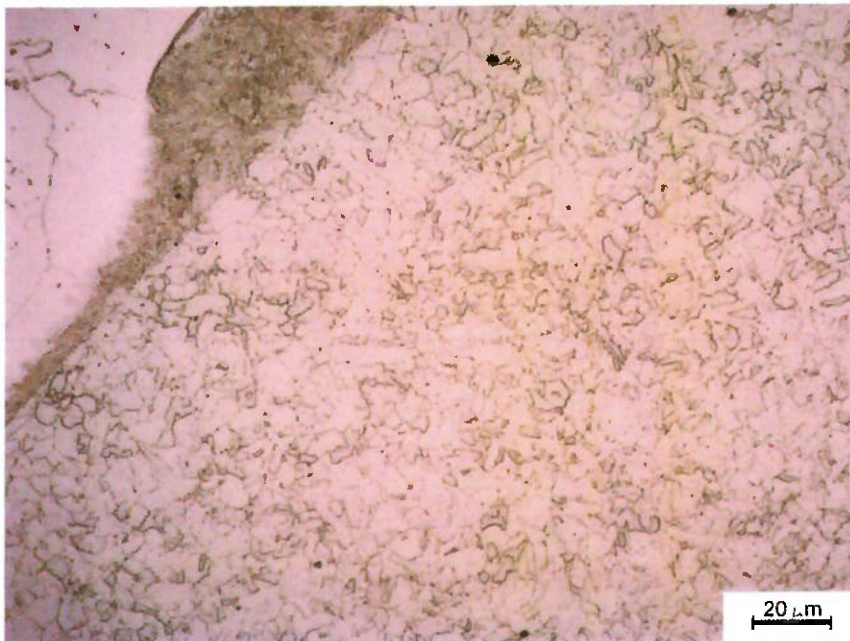


Figura 5.22: CP10 - Tempo de exposição 1 hora.

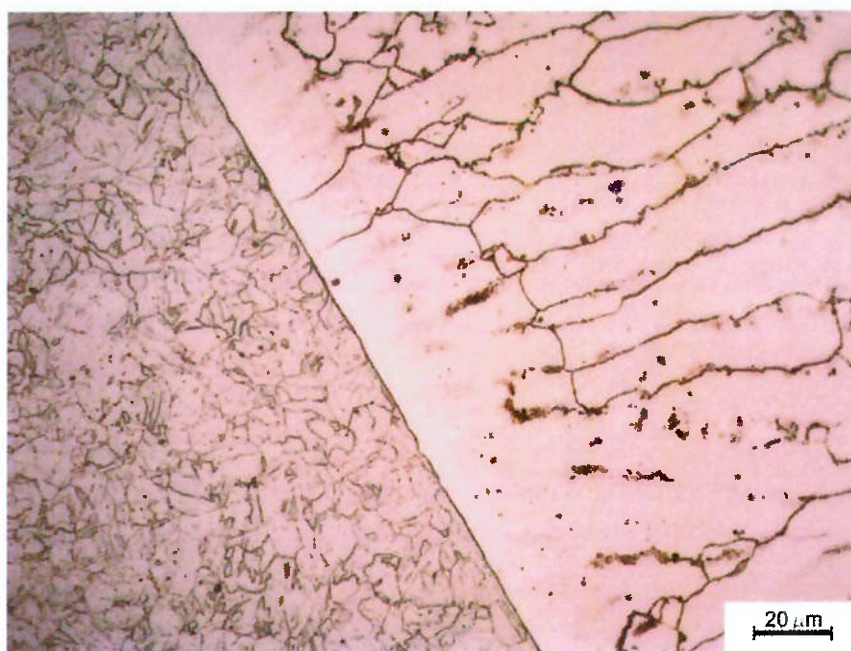


Figura 5.23: CP11 - Tempo de exposição 10 horas.

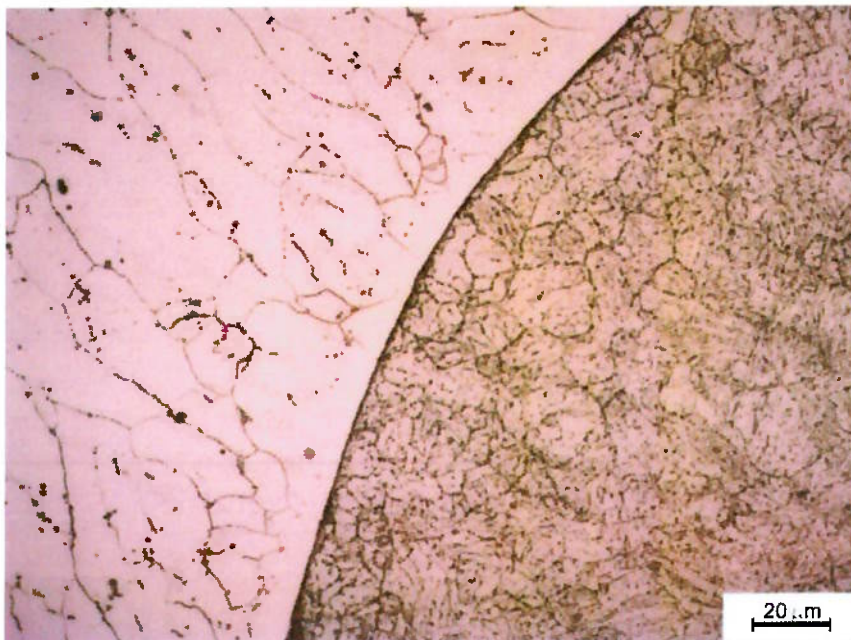


Figura 5.24: CP12 - Tempo de exposição 100 horas.

5.2.2. MICROSCOPIA ÓTICA DA ZAC DO METAL DE BASE 5Cr-0,5Mo

Abaixo imagens micrográficas da junta soldada através procedimento de soldagem:

5.2.2.1. PROC01 – Deposição convencional sem TTAT.

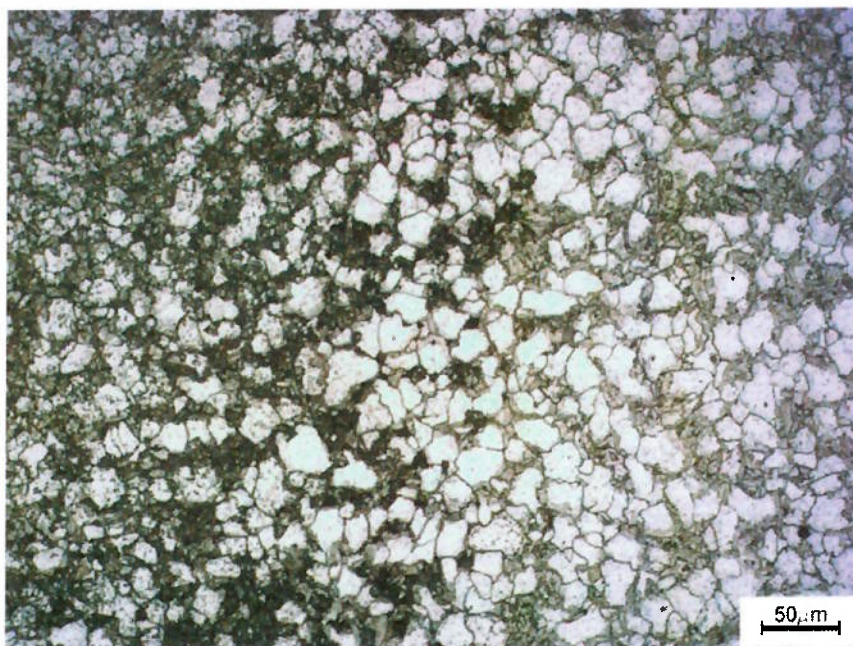


Figura 5.25: CP01 - Sem exposição à temperatura de trabalho.



Figura 5.26: CP02 - Tempo de exposição 1 hora.

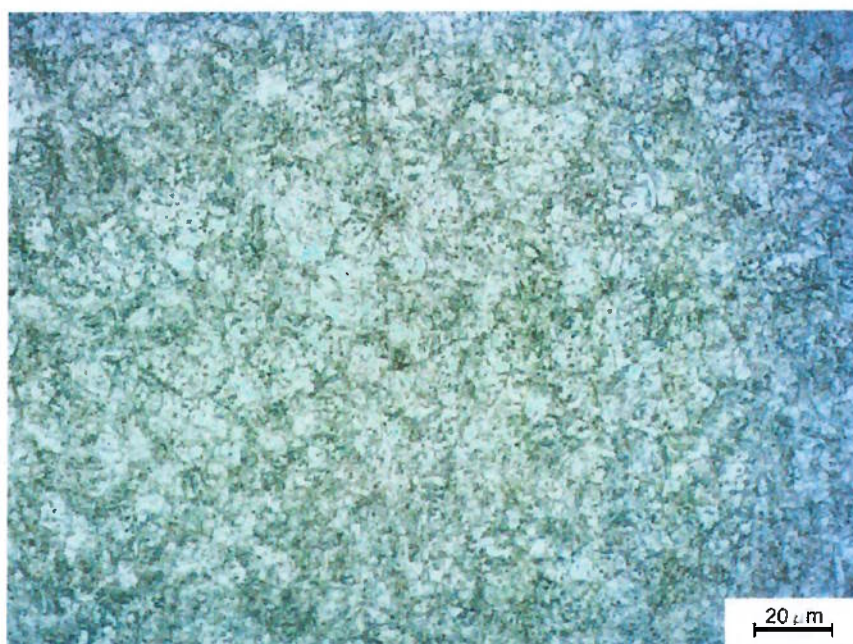


Figura 5.27: CP03 - Tempo de exposição 10 horas.

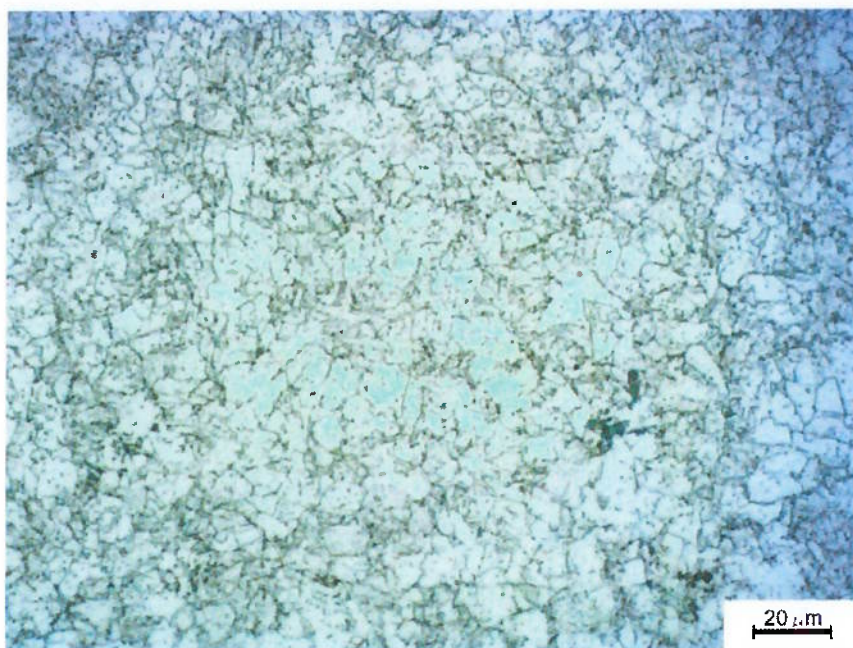


Figura 5.28: CP04 - Tempo de exposição 100 horas.

5.2.2.2. PROC02 – Técnica de Deposição controlada Dupla Camada sem TTAT

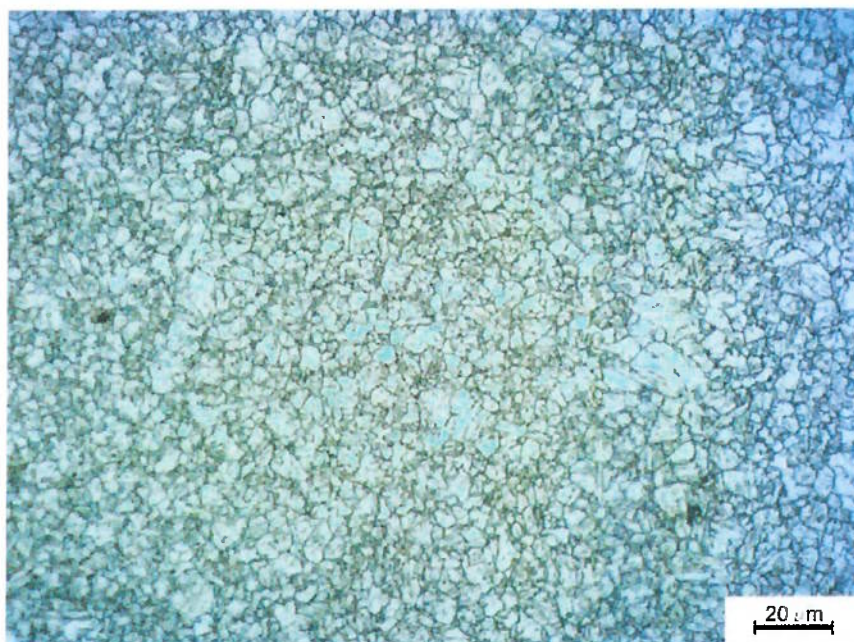


Figura 5.29: CP05 - Sem exposição à temperatura de trabalho.

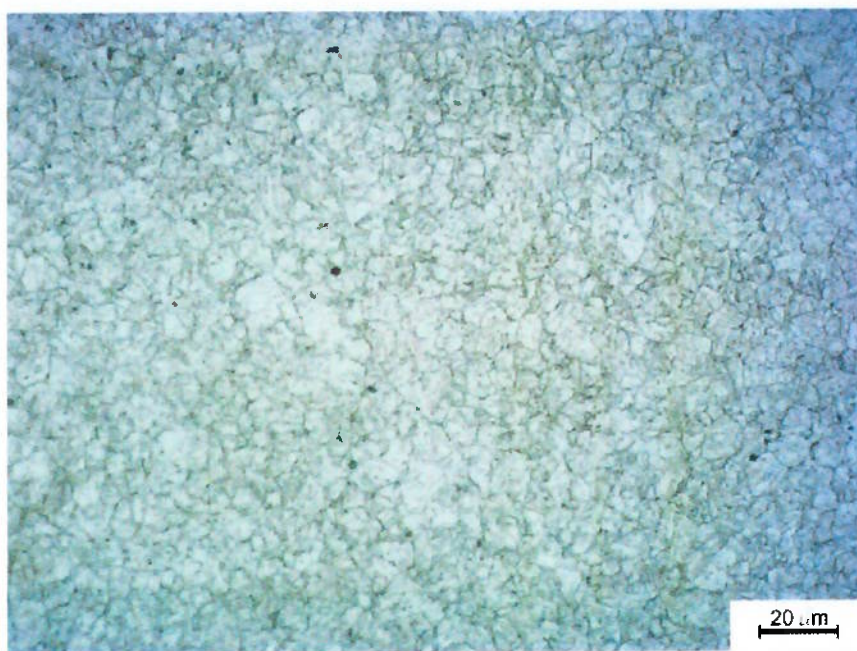


Figura 5.30: CP06 - Tempo de exposição 1 hora.

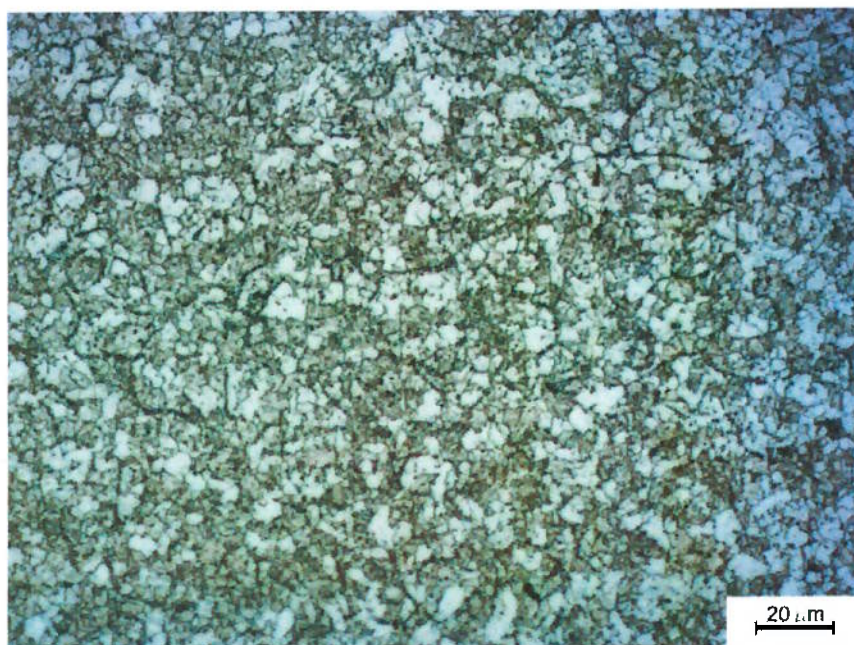


Figura 5.31: CP07 - Tempo de exposição 10 horas.

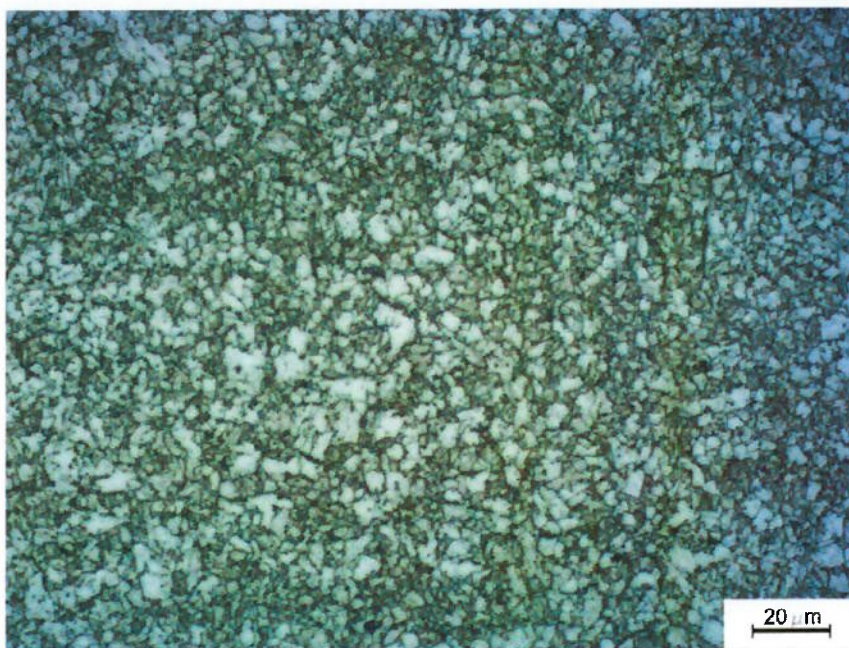


Figura 5.32: CP08 - Tempo de exposição 100 horas.

5.2.2.3. PROC03 – Técnica de Deposição convencional com TTAT.



Figura 5.33: CP09 - Sem exposição à temperatura de trabalho.



Figura 5.34: CP10 - Tempo de exposição 1 hora.

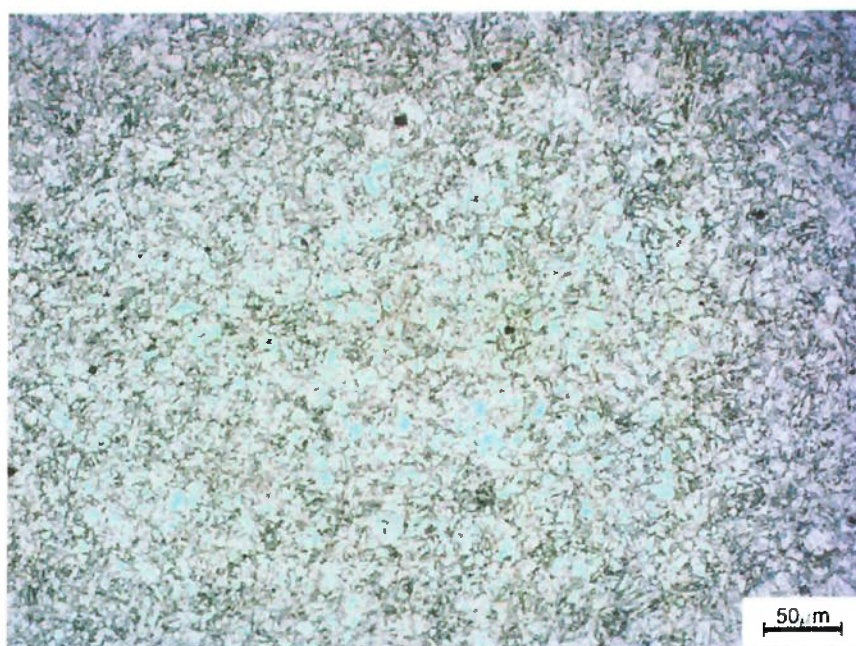


Figura 5.35: CP11 - Tempo de exposição 10 horas.



Figura 5.36: CP12 - Tempo de exposição 100 horas.

5.2.3. MICROSCOPIA ÓTICA DA ZF

5.2.3.1. PROC01 – Deposição convencional sem TTAT.

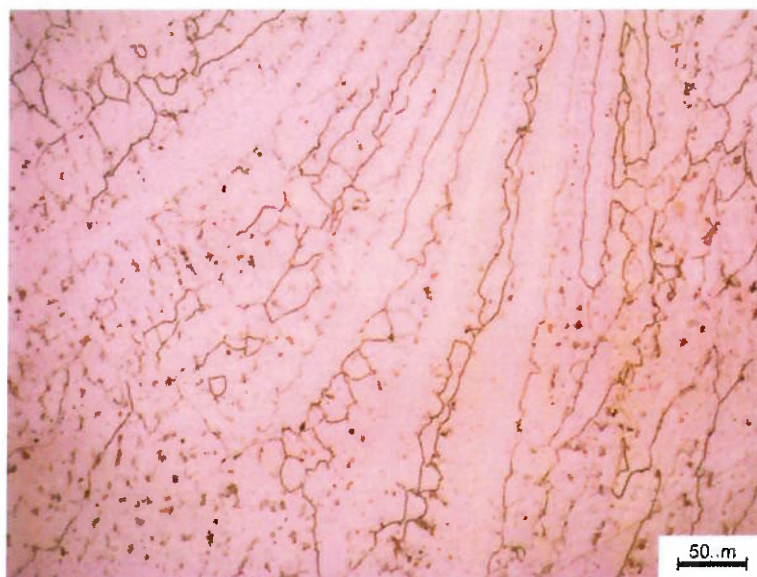


Figura 5.37: CP01 - Sem exposição à temperatura de trabalho.



Figura 5.38: CP02 - Tempo de exposição 1 hora.

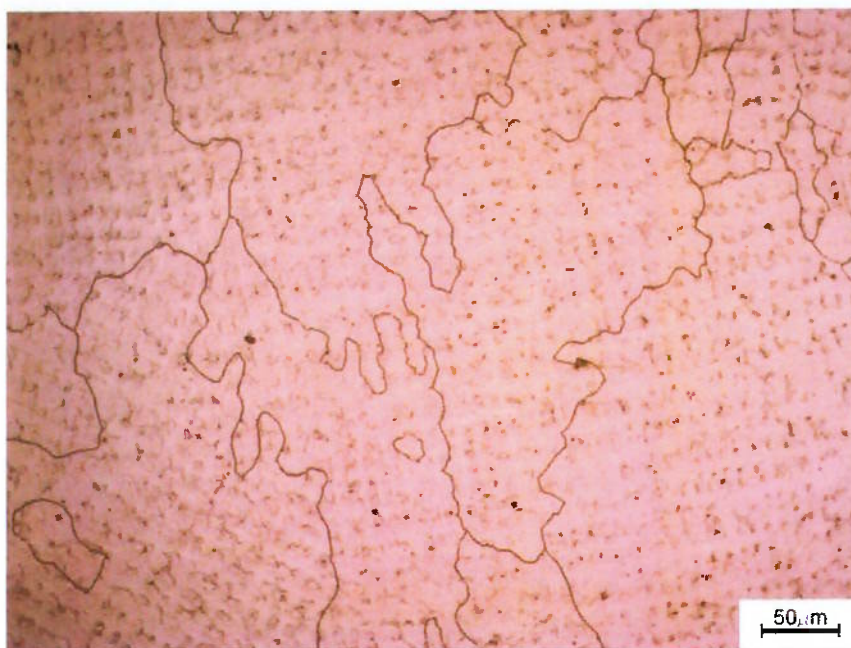


Figura 5.39: CP03 - Tempo de exposição 10 horas.

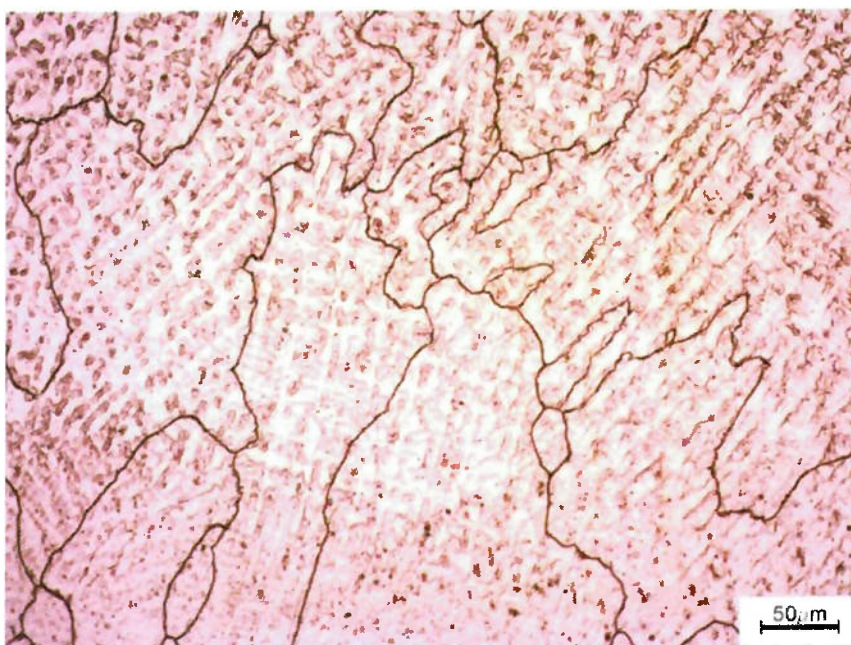


Figura 5.40: CP04 - Tempo de exposição 100 horas.

5.2.3.2. PROC02 – Técnica de Deposição controlada Dupla Camada sem TTAT

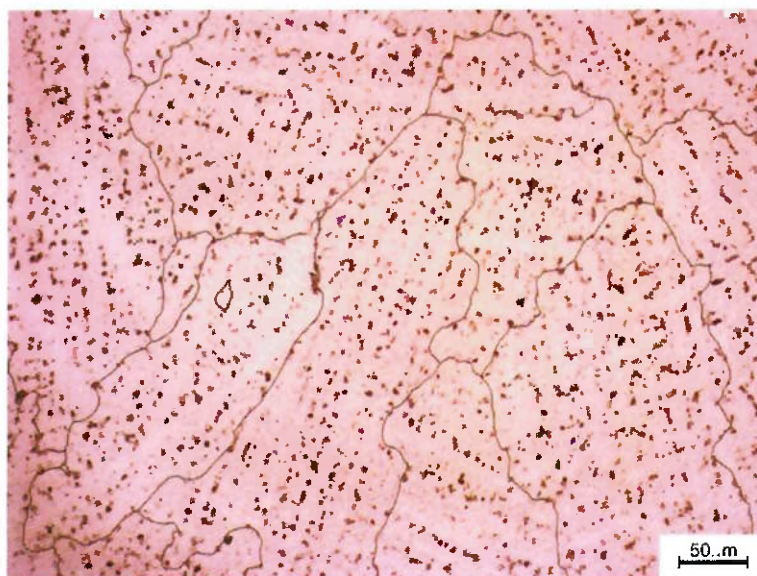


Figura 5.41: CP05 - Sem exposição à temperatura de trabalho.

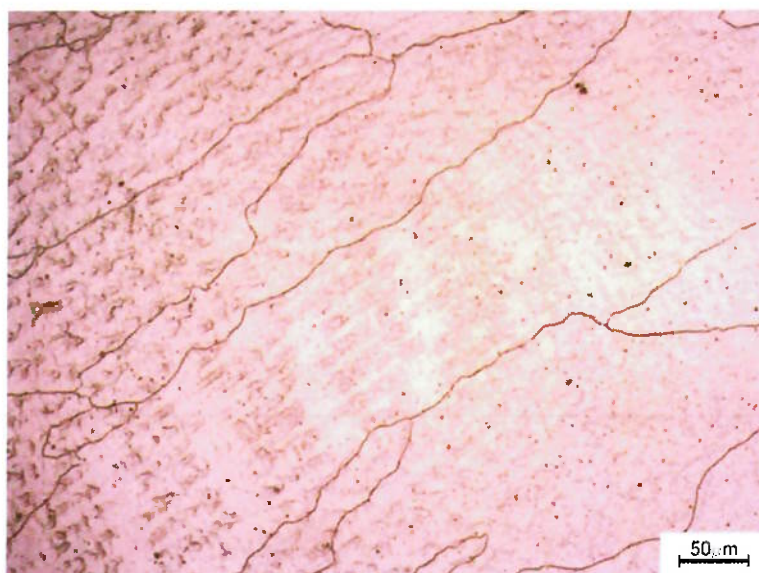


Figura 5.42: CP06 - Tempo de exposição 1 hora.

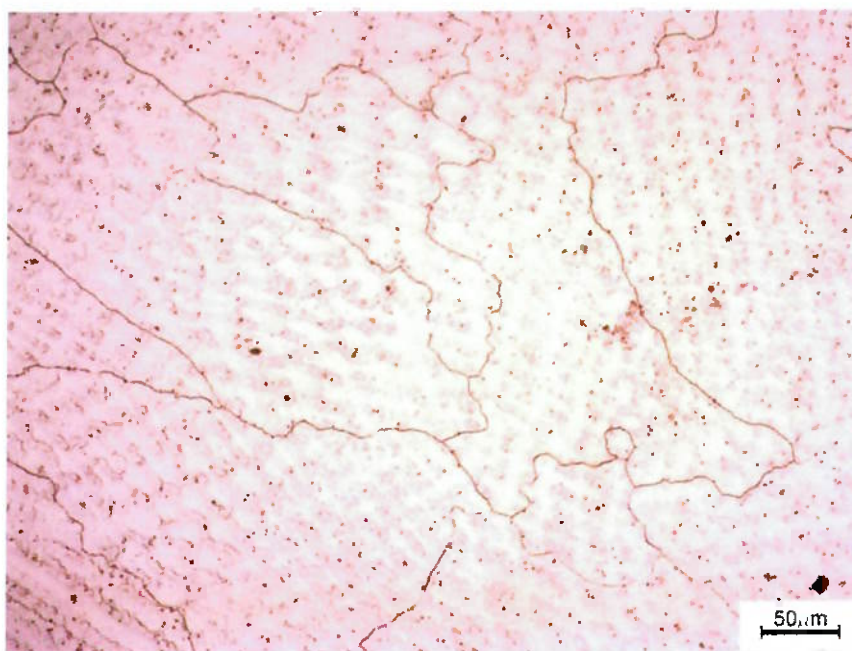


Figura 5.43: CP07 - Tempo de exposição 10 horas.

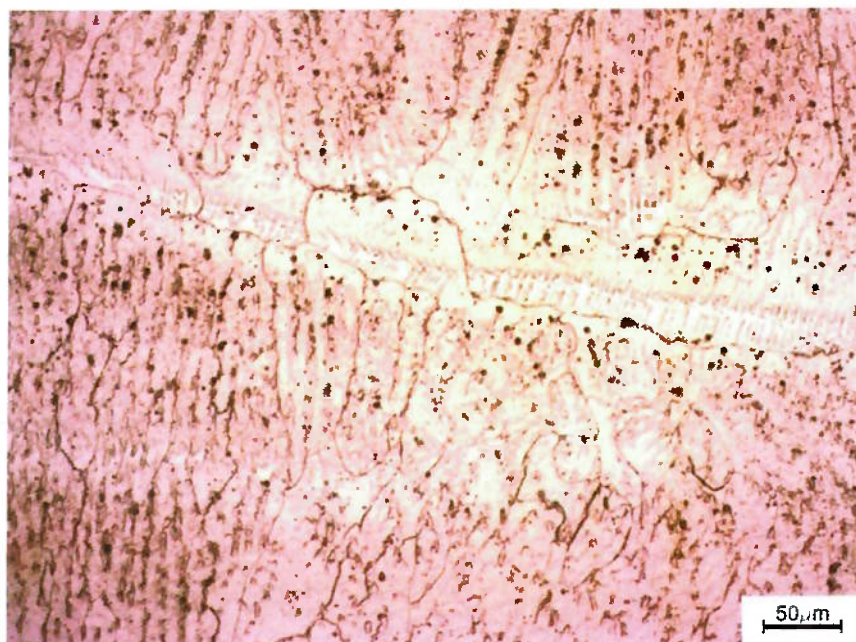


Figura 5.44: CP08 - Tempo de exposição 100 horas.

5.2.3.3. PROC03 – Técnica de Deposição convencional com TTAT.

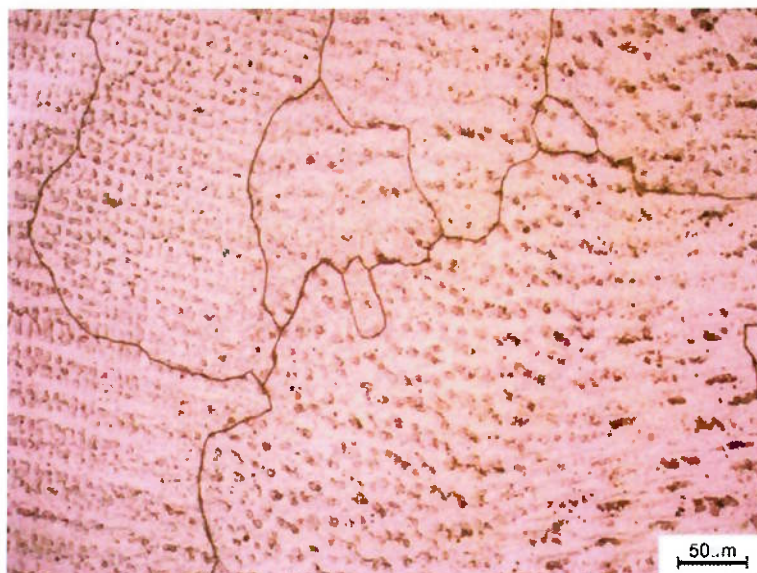


Figura 5.45: CP09 - Sem exposição à temperatura de trabalho.

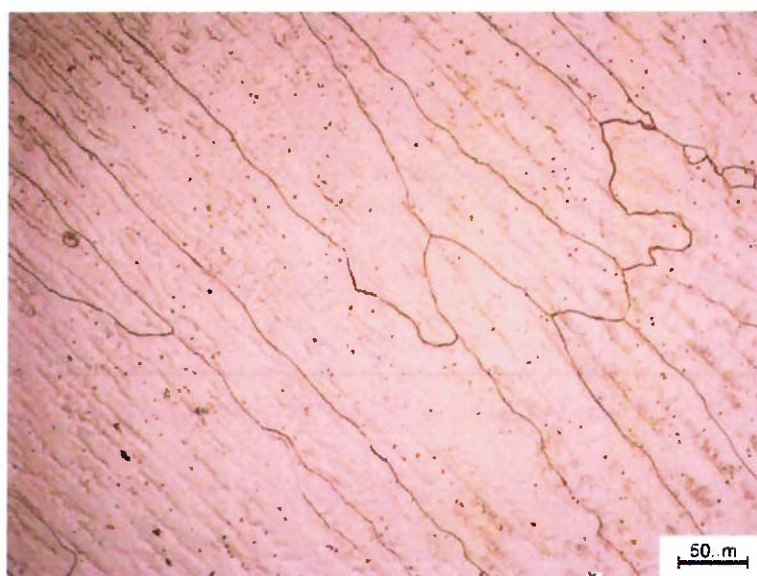


Figura 5.46: CP10 - Tempo de exposição 1 hora.

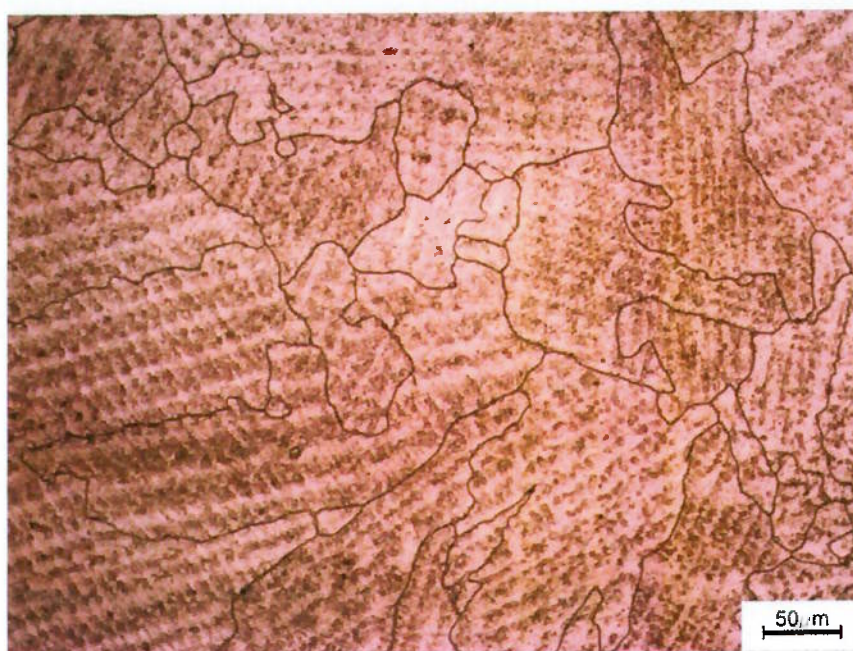


Figura 5.47: CP11 - Tempo de exposição 10 horas.



Figura 5.48: CP12 - Tempo de exposição 100 horas.

5.3. ENSAIOS DE AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO

5.3.1. PERFIL DE MICRODUREZA VICKERS DOS CORPOS DE PROVA DO LADO DO MB 5Cr 0,5Mo.

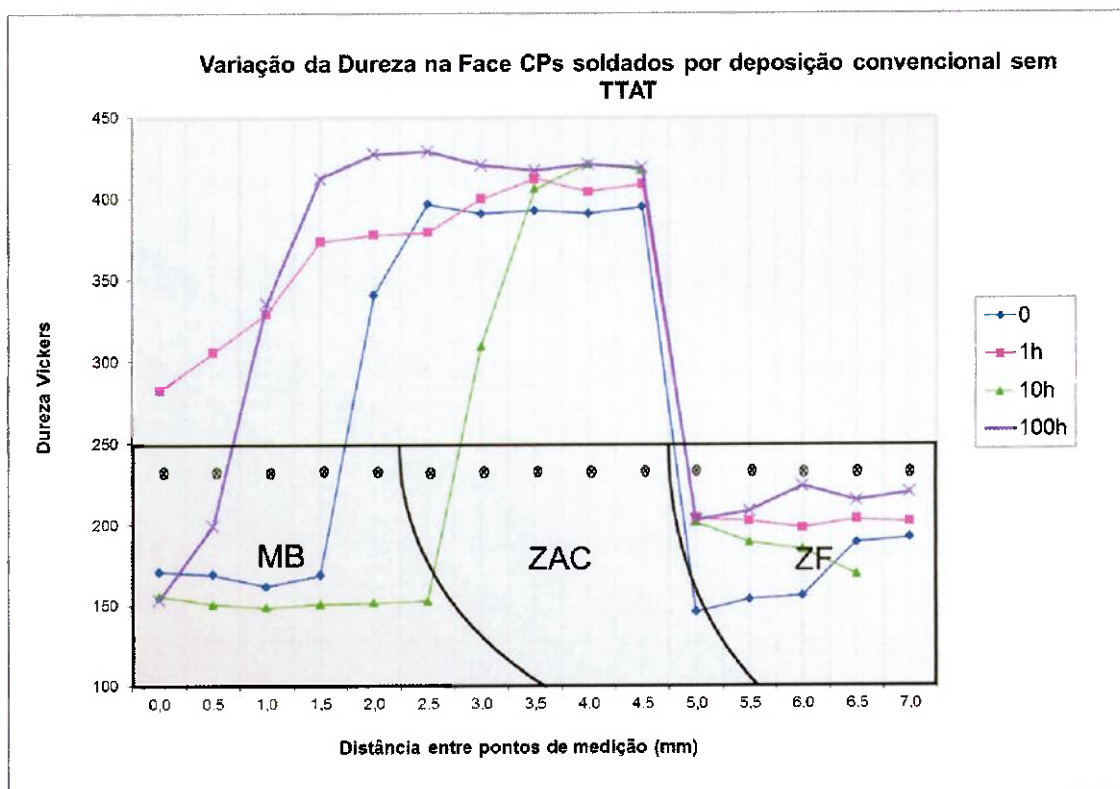


Figura 5.49: Gráfico mostrando as durezas medidas a 1mm da face dos CP's.

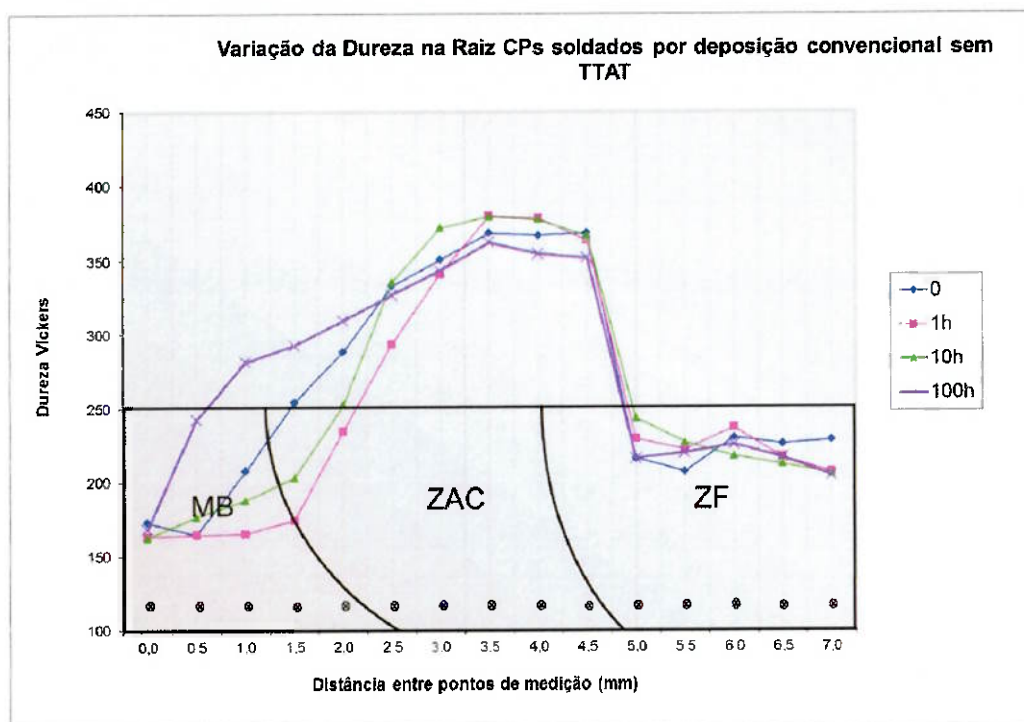


Figura 5.50: Gráfico mostrando as durezas medidas a 1mm da raiz dos CP's.

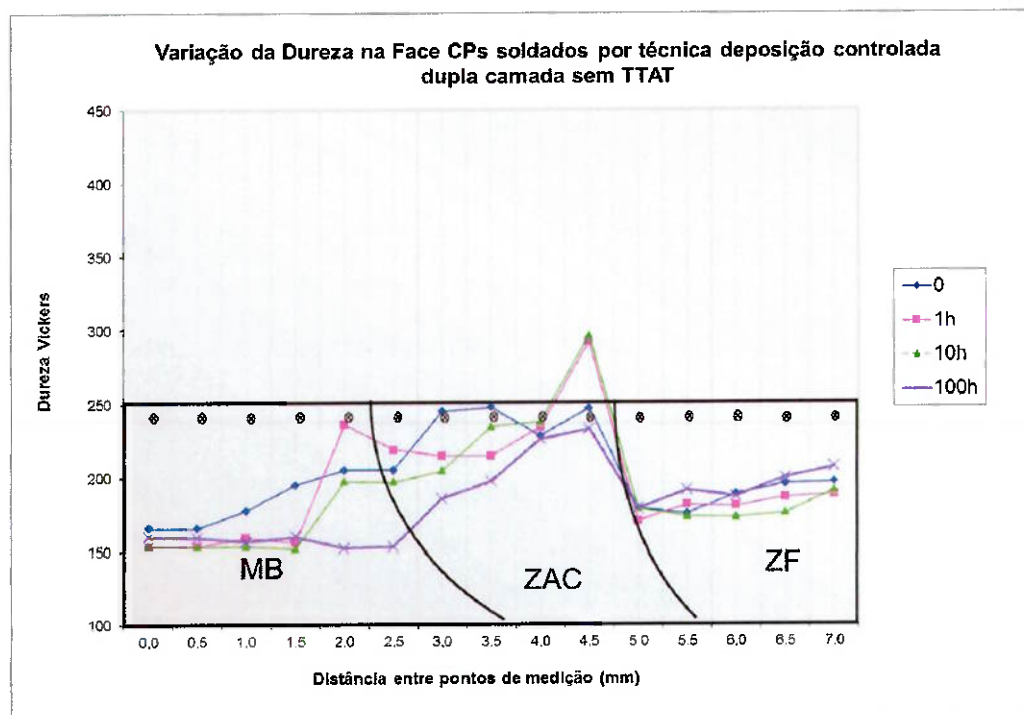


Figura 5.51: Gráfico mostrando as durezas medidas a 1mm da face dos CP's.

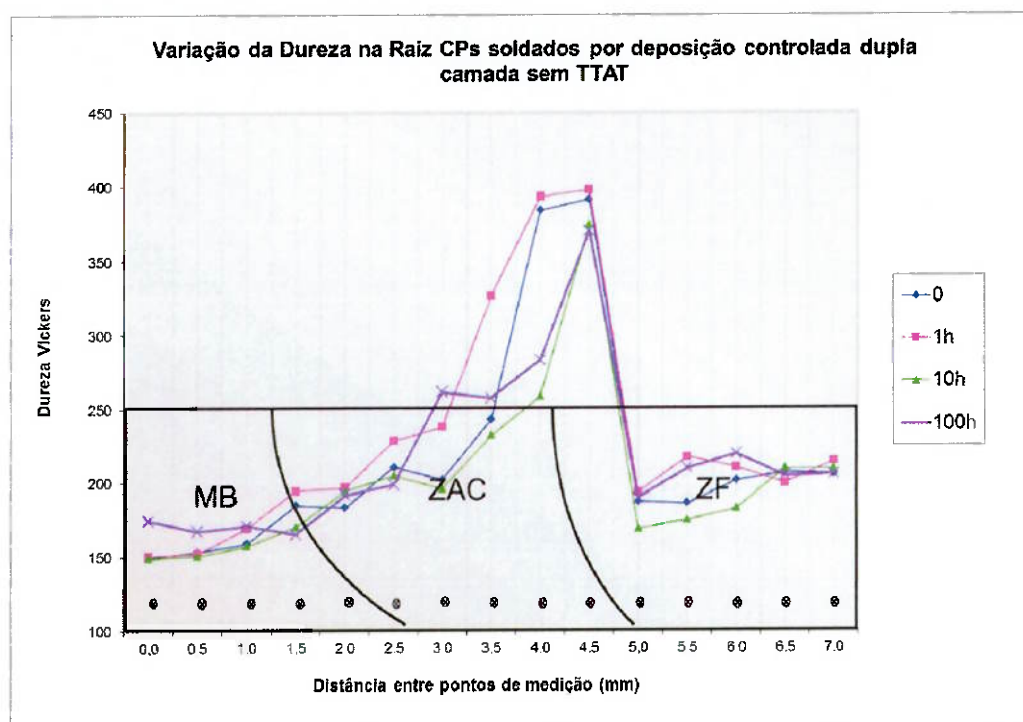


Figura 5.52: Gráfico mostrando as durezas medidas a 1mm da raiz dos CP's.

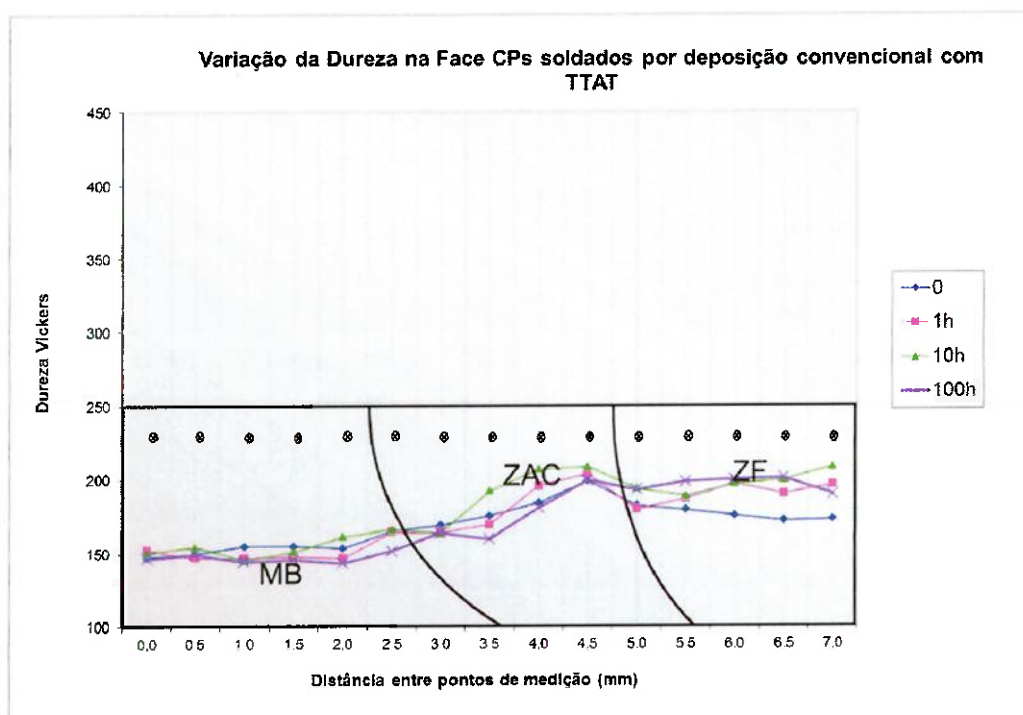


Figura 5.53: Gráfico mostrando as durezas medidas a 1mm da face dos CP's.

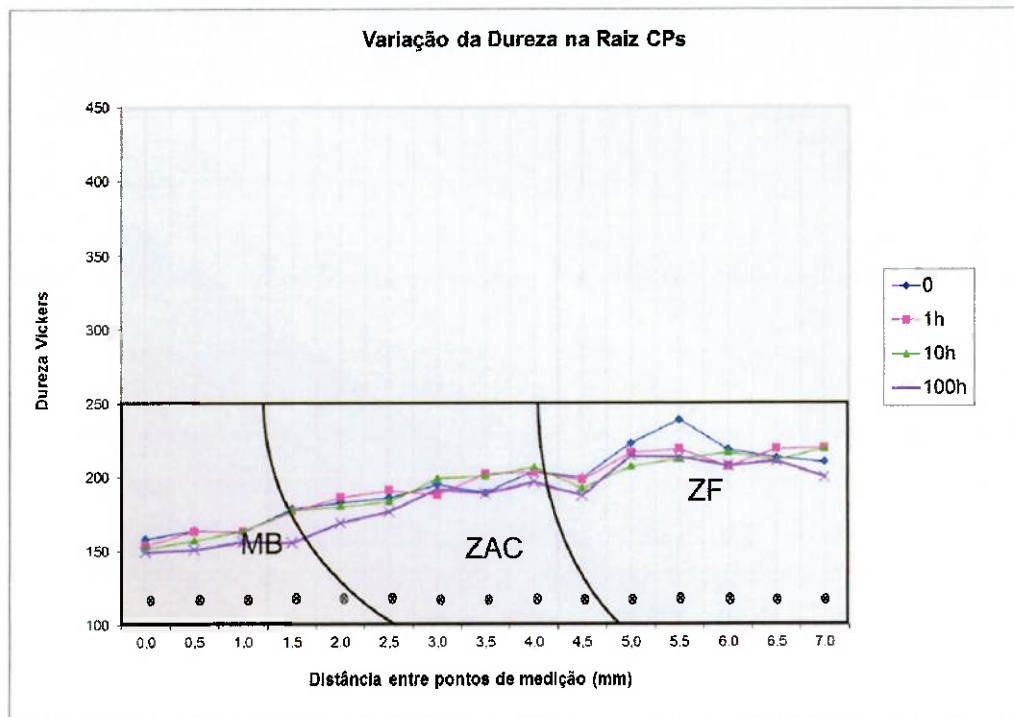


Figura 5.54: Gráfico mostrando as durezas medidas a 1mm da raiz dos CP's.

Baseado nas figuras 5.49 e 5.50, observa-se que a ZAC do MB 5CR-0,5Mo apresenta valores de dureza, tanto para a face quanto para a raiz da solda, bem superiores ao limite máximo preconizado pela norma ASME B31.3. Para a raiz, há uma dispersão menor nos valores.

Baseado nas figuras 5.51 e 5.52, para os corpos de prova em que foi usada a técnica de deposição controlada, observa-se que para a face da solda aparece apenas 2 valores acima do limite máximo preconizado pela norma ASME B31.3. Isso mostra uma tendência de evolução do procedimento de soldagem PROC02 em relação ao PROC01. No entanto, para a raiz da solda os valores de dureza não atendem a determinação da norma de projeto. Nota-se também uma

tendência de diminuição nos valores de dureza para tempo no forno de 100 horas.

Quando o tratamento térmico de alívio de tensões é aplicado todos os valores estão dentro dos limites aceitáveis para a norma de projeto. Nota-se uma redução de dureza para o corpo de prova em que o tempo no forno de 100 horas.

Para os procedimentos de soldagem PROC02 e PROC03 os valores de dureza medidos a 1 mm na raiz da solda foram superiores àqueles medidos a 1 mm da face da solda.

6. CONCLUSÕES

1 - De forma geral, apesar dos valores de dureza apresentarem tendência de alta para os CP's submetidos a 1 e 10 horas de exposição a 450°C, verifica-se que os CP's submetidos a 100 horas, a mesma temperatura, apresentam decaimento percentual nos valores de dureza da ordem de 20% na face da solda e 7% na raiz da região de grãos grosseiros (RGG's) para os CP's que não sofreram TTAT.

2 - Todos os CP's apresentam valores de dureza na ZF abaixo dos valores máximos determinados pela norma de projeto para tubulações de processo ASME B.31.3, ratificando a efetividade do consumível de soldagem ER-NiCr3 para a produção de depósitos não temperáveis.

3 - O procedimento de soldagem por Deposição Controlada apresenta valores de dureza aceitáveis por algumas normas internacionais, mostrando-se efetivo, principalmente na seção medida próxima à face da junta soldada. Entretanto, para a seção medida na raiz da solda os valores ultrapassam os limites aceitáveis pelos códigos de projeto.

7. TRABALHOS FUTUROS

1 - Realizar ensaio de longa duração expondo um set de CP's a 450°C por 1000 horas, visando avaliar a manutenção do decaimento dos valores de dureza nas RGG's observado nos CP's submetidos a 450°C por 100 horas.

2 - Avaliar os níveis de tensão residual dos CP's após soldagem nas condições "como soldado", 1, 10, 100, 1000 horas.

3 - Realizar ensaio de fluência nos CP's soldados através do procedimento de deposição controlada sem TTAT e deposição convencional com TTAT.

4 - Avaliar a atuação do elemento Níquel como supressor no mecanismo de difusão de carbono na soldagem heterogênea.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. WAINER, E.; BRANDI, S. D.; MELLO, F. D. H. **Soldagem: processos e metalurgia**. São Paulo: Blucher, 1992. 494p.
2. PETROBRAS. **N-1438: terminologia soldagem**. Rio de Janeiro, 2011. 41p.
3. OKUMURA, T.; TANIGUCHI, C.; **Engenharia de Soldagem e Aplicações**; LTC; Rio de Janeiro; 1982.
4. TELLES, P. C. S. **Materiais para equipamentos de processo**. Rio de Janeiro: Interciência, 2003. 277p.
5. MEYERS, R.A. **Handbook of petroleum refining processes**. New York: McGraw-Hill, 2003.
6. SLAVCHEVA, E.; SHONE, B.; TURNBULL, A.; **Review of naphthenic acid corrosion in oil refining**. London; British Corrosion Journal, 1999.
7. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR10778: Forno Tubular Sujeito a Chama**. Rio de Janeiro, 1989. 20p
8. AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **API 560: Fired Heaters for General Refinery Service**. Washington, 2007. 266p
9. PETROBRAS. **N1637: Montagem de Forno**. Rio de Janeiro, 2012. 18p
10. THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **B31.3: Process Piping**. New York, 2010. 330p.
11. PETROBRAS. **N-0115: Fabricação e Montagem de Tubulações Metálicas**. Rio de Janeiro, 2011. 66p.

12. PETROBRAS. **N-1673**: critérios de cálculo mecânico para tubulação. Rio de Janeiro, 2011. 11p.
13. PETROBRAS. **N-0076**: materiais de tubulação para instalações de refino e transporte. Rio de Janeiro, 2007. 358p.
14. ASM INTERNATIONAL. **Corrosion**. USA: 1993. V.13.
15. NACE – NATIONAL ASSOCIATION OF CORROSION ENGINEERS. **Process Industries Corrosion**. Illinois, 1986.
16. AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **API 571: Damage Mechanisms Affecting Fixed Equipment in the Refining Industry**. Washington, 2003. 270p.
17. JAMBO, H.C.M.; FÓFANO, S. **Corrosão: Fundamentos, Monitoração e Controle**. Rio de Janeiro: Ciência Moderna Ltda., 2008. 342p
18. BERNARDES, R. **Comportamento de aços inoxidáveis comerciais e inonel na resistência à corrosão naftênica de petróleos nacionais: uma análise fenomenológica**. Rio de Janeiro, 2005.
19. GENTIL, V. **Corrosão**. 3ª Edição. Rio de Janeiro: LTC, 1996. 345p
20. ASM INTERNATIONAL. **Properties and Selection: Irons Steels and High Performance Alloys** USA: 1993. V.01.
21. ASM INTERNATIONAL. **Welding, Brazing and Soldering**. USA: 1993. V.06.
22. AMERICAN WELDING SOCIETY. **Welding Handbook: Materials and applications – part 2**. 8th Edition, Miami, 1998.
23. LIPPOLD, J. C.; KOTECKI, D. J. **Welding metallurgy and weldability of stainless steels**. New Jersey: Wiley-Interscience, 2005. 341p.

24. THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **BPVC Section IX: qualifications standard for welding and brazing procedures, welders, brazers, and welding and brazing operators.** New York, 2010. 290p.
25. DUPONT, J. N.; LIPPOLD, J. C.; SAMUEL D. KISER, S. D.; **Welding Metallurgy and Weldability of Nickel-Base Alloys.** New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2009.
26. OLSON, D.L., MATLOCK, D.K., SELF, J.A.; **An evaluation of austenitic Fe-Mn-Ni weld metal for dissimilar metal welding.** 1984.
27. ASM INTERNATIONAL. **Heat Treating.** USA: 1993. V.04.
28. THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **BPVC Section VII: Rules for Construction of Pressure Vessels – Division 1.** New York, 2010. 798p.
29. AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **API 510: Pressure Vessel Inspection Code: In-Service Inspection, Rating, Repair, and Alteration.** Washington, 2006. 70f
30. SPERKO, W.J. **Exploring temper bead welding.** Welding Journal, 2005.
31. PETROBRAS. **N-0133: soldagem.** Rio de Janeiro, 2005. 63p.
32. THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **BPVC Section II: Materials, Part A, Ferrous Material Specifications (Beginning to SA-450)** New York, 2010. 290p.