

UNIVERSIDADE SANTA CECILIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

NATAL DE JESUS GASPAR

POTENCIAL USO DO PASSE DE REVENIMENTO NO REPARO DE SOLDAS:
AVALIAÇÃO VIA MAPEAMENTO DE DUREZAS

SANTOS – SP
2013

NATAL DE JESUS GASPAR

**POTENCIAL USO DO PASSE DE REVENIMENTO NO REPARO DE SOLDAS:
AVALIAÇÃO VIA MAPEAMENTO DE DUREZAS**

Dissertação apresentada à Universidade Santa Cecília como parte dos requisitos para obtenção de título de mestre no Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, sob orientação do Prof. Dr. José Carlos Morilla, coorientação, Prof. MSc. Willy Ank de Moraes e MSc. Dorotéia Vilanova Garcia.

SANTOS/SP

2013

Autorizo a reprodução parcial ou total deste trabalho, por qualquer que seja o processo, exclusivamente para fins acadêmicos e científicos.

GASPAR, Natal de Jesus.

Potencial uso do passe de revenimento no reparo de soldas.
Avaliação via mapeamento de dureza / Natal de Jesus Gaspar.
2013.
105p.

Orientador: José Carlos Morilla.

Coorientador: Dorotea Vilanova Garcia
Willy Ank de Moraes

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Santa Cecília,
Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA MECÂNICA, Santos,
SP, Ano de conclusão.

1. Soldagem. 2. Dureza. 3. Aço liga 4. Passe de revenimento.
I. Morilla, José Carlos
II. Garcia, Dorotéa Vilanova. II. Moraes, Willy Ank
III. Potencial uso do passe de revenimento no reparo de soldas.
Avaliação via mapeamento de dureza.

Elaborada pelo SIBi – Sistema Integrado de Bibliotecas - Unisanta

UNIVERSIDADE SANTA CECILIA

**POTENCIAL USO DO PASSE DE REVENIMENTO NO REPARO DE SOLDAS:
AVALIAÇÃO VIA MAPEAMENTO DE DUREZAS**

NATAL DE JESUS GASPAR

Banca Examinadora:

Prof. Dr. José Carlos Morilla
Universidade Santa Cecília - UNISANTA

Prof. Dr. Sergio Norifumi Doi
Universidade Santa Cecília-UNISANTA

Prof. Dr. Jan Vatauvuk
Universidade MACKENZIE

☐ **O orientador declara que a Dissertação tem a aprovação** para digitalização (02 cópias em CD), a fim de serem entregues na Secretaria para o início do processo de pedido de diploma, com o prazo máximo de **30 dias** a contar da defesa.

☐ **O orientador declara que a Dissertação tem a aprovação condicionada às reformulações solicitadas pela Banca Examinadora** no prazo máximo de **90 dias** a contar da defesa, tendo o aluno, obrigatoriamente, que apresentar a dissertação com as reformulações aprovadas até ____ / ____ / _____. O aluno tem, a partir desta data-limite, o prazo máximo de **30 dias** para a entrega de 02 cópias em CD da dissertação, a serem entregues na Secretaria para o início do processo de pedido de diploma.

Assinatura do Orientador

Data: ____ / ____ / _____

“Dedico este trabalho primeiramente a DEUS, e aos meus pais que me ensinaram a aprender, amar e respeitar ao próximo, aos meus filhos, Caio, Cauan, Bárbara e Letícia, aos meus irmãos e aos educadores que me conduziram a este caminho”.

AGRADECIMENTOS

Ao amigo e orientador **Prof. Dr. José Carlos Morilla**, pela paciência, orientação e dedicação no apoio técnico e experiência no que contribuiu para a elaboração deste trabalho, um verdadeiro amigo que esteve sempre presente;

Ao **Prof. MSc. Manoel Messias Neris**, por ser o grande idealizador deste trabalho, sempre apoiando tecnicamente nas dúvidas e sempre dando força com sua simpatia e humildade;

Ao coorientador e **Prof. MSc. Willy Ank de Moraes**, pela orientação na revisão bibliográfica e orientação nos testes realizados, apoio técnico e contribuição didática;

À coorientadora **Prof. MSc. Dorotéa Vilanova Garcia**, que contribuiu com sua experiência e orientação na utilização de software MATLAB® (V-6. 5);

Ao coordenador do curso de Engenharia Mecânica **Prof. MSc. Carlos Alberto do Amaral Moino**, por seu companheirismo e confiança, sempre me apoiando nos momentos difíceis;

Ao Coordenador do curso de Mestrado em Engenharia Mecânica, **Prof. Dr. Marcos Tadeu Tavares Pacheco**, pela experiência adquirida e aplicada na elaboração deste trabalho;

Ao **Técnico de Manutenção, Nelson Vaz Filho**, da **PETROBRAS**, que forneceu uma amostra do tubo da liga P91 para execução da soldagem;

Ao **Engº e amigo Eduardo Sanches Farias**, pelo apoio técnico e revisão do trabalho;

Ao meu filho **Caio Cesar Rodrigues Antonio Gaspar**, pela realização das medições de dureza vickers;

Aos técnicos de laboratório:

Irineu da Penha;

Sergio Giangulio;

Wilson Roberto de Oliveira Santos;

por apoiar constantemente para execução do projeto;

À **UNIVERSIDADE SANTA CECILIA (UNISANTA)** pela excelência no curso de mestrado em Engenharia Mecânica, o que me propiciou conhecimento técnico para a elaboração deste trabalho.

Aos meus colegas, **Adilson da Silva Magno, Cicero Alexandre da Silva, Edimilson da Silva, Ronaldo de Souza Freire e Thania Fernandez Tristão** do grupo de TTC na graduação, no qual demos o primeiro passo para a realização deste trabalho;

Ao gerente do setor CAOP da **PETROBRAS, Engº Furquim Castro Junior** e ao amigo **Engº Vinicius Braga Pereira** pela compreensão e apoio dado durante meu afastamento parcial do trabalho nos tempos de dissertação;

Ao **Engº Dr. Luiz Antonio Bereta**, do setor de inspeção de equipamentos da **PETROBRAS/RPBC**, pelas orientações quanto à identificação das estruturas metalográficas;

À **Priscila Martins Ferreira**, pela paciência, companheirismo e apoio em todas as horas;

À **USIMINAS-CUBATÃO**, por realizar os ensaios de dureza vickers nos corpos de prova da primeira soldagem;

À empresa **INSPEBRAS, (Engº Heretiano Dalmacio Sampaio Junior e o Inspetor de Soldagem – Rodrigo Sampaio)** pelo apoio no fornecimento de mão de obra e local para a execução da soldagem das peças de teste.

"Se fui capaz de ver mais longe, é porque me apoiei em ombros de gigantes."

SIR ISAAC NEWTON

RESUMO

O reparo realizado em tubulações de aço que trabalham com pressão, construídas a partir de metais soldados com tratamento térmico pós-soldagem, devem ser seguidos por um tratamento térmico, que a depender do local, tipo de instalação, etc, nem sempre é factível. Assim torna-se necessário encontrar novas formas de se reparar este tipo de equipamento sem a aplicação de um tratamento térmico adicional pós-reparo. Neste trabalho é realizado um estudo sobre uma forma para a realização deste reparo conhecida como passe de revenimento, onde cordões de solda adicionais são aplicados e o respectivo aporte de calor é explorado como alternativa para a eliminação do tratamento térmico pós-soldagem. Além disso, este tipo de soldagem pode ser utilizado para controlar a microestrutura, a dureza final e outras propriedades do material na região próxima à solda. Neste estudo foi feita uma abordagem sobre as técnicas de revenimento utilizadas para se executar reparos sem posterior tratamento térmico, sobre as especificações da norma ASME B31.3 - 2012 além de uma comparação entre as durezas encontradas no metal base, na zona termicamente afetada e no metal de solda de corpos de prova reparados com este tipo de técnica e de corpos de prova construídos com a técnica convencional.

Palavras-chave: Soldagem, dureza, aço liga, passe de revenimento.

ABSTRACT

Repair performed on steel pipes that work pressure built from metal with post-weld heat treatment (PWHT) should be followed by a heat treatment, which depending on the location, type of facility, etc., is not always feasible. So it becomes necessary to find new ways to repair this equipment without the application of an additional heat treatment after repair. This work is a study on a way to accomplish this repair known as tempering pass where weld beads are applied and its additional heat input is explored as an alternative to the elimination of post-weld heat treatment. Moreover, this type of welding may be used to control the microstructure, hardness and other properties of the final material in the region near the weld. This study was made on the technical approach temperatures used to perform repairs without subsequent thermal treatment on the specifications of the ASME B31.3 - 2012 and a comparison between the hardness found in the base metal heat affected zone, and weld metal specimens repaired with this kind of technique and specimens built with the conventional technique.

Keywords: Welding, hardness, alloy steel, tempering pass.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Comparação dos valores de espessuras de parede em tubulações de aço P22 e P91.....	22
Figura 2 – Tempo e temperatura de soldagem e TTAT de um aço ASTM A 335 Gr P91 ("Guideline for Welding P(T)91" by William F. Newell Jr, Euroweld Ltda, December 2001).....	23
Figura 3 – Resistências utilizadas para controle da soldagem – pré-aquecimento, interpasse e pós-aquecimento – (figura extraída da internet – Advel tecnologia) mar-2013.	27
Figura 4 - Passe de solda de raiz em uma junta – terminologia usual de soldagem e símbolos de solda – (MARQUES, MODENESI, BRACARENSE) – UFMG – Julho-2007.	30
Figura 5 – Passe de acabamento em uma junta soldada – (a) passe oscilante e (b) passe estreito (adaptado do AWS A3. 0 – 2010).	30
Figura 6 – Penetrâmetros ASTM – (a) tipo placa e (b) tipo arame (JUNIOR, MARQUES, 2006).....	31
Figura 7 – Penetrâmetros DIN – (a) tipo placa e (b) tipo arame (JUNIOR e MARQUES, 2006).....	32
Figura 8 – Curva TTT de um aço T23 – (1,90 a 2,60%Cr) – (LUNDIN,2000).....	38
Figura 9 – Curva TTT de um aço P91. (HUYSMANS e VEKEMAN, 2009)).....	39
Figura 10 – Esquemático mostrando um procedimento de reparo de áreas afetadas de um único cordão de solda (adaptado do ASM – Metals Handbook – vol. 6 – 1993 pag.209).	40
Figura 11 – Deposição de cordões de solda mostrando um procedimento de reparo de duas camadas (deposito da segunda camada (adaptado do ASM – Metals Handbook – vol. 6 – 1993 pag.209).	41
Figura 12 – Pontos da ZTA – pontos de transição para várias partes da ZTA relacionados com o diagrama de ferro-carbono – Exploring temper bead Welding. (Walter J. Sperko – Welding Journal – July – 2005 – pag. 37 to 40).....	43
Figura 13 - Representação do efeito da sobreposição de cordões subsequentes na extensão da ZTA pelo cordão de solda depositado previamente. – Exploring temper bead Welding. (Walter J) - Sperko – Welding Journal – July – 2005.....	46

Figura 14 - Efeito da aplicação da segunda camada do metal de solda e na ZTA da primeira camada – Exploring temper bead Welding (Walter J. Sperko – Welding Journal – July – 2005.	47
Figura 15 - Superfície revenida reforçando a deposição do cordão de solda – Exploring temper bead Welding (Walter J. Sperko – Welding Journal – July – 2005.	47
Figura 16 – Peça do aço ASTM A 335 Gr P91 preparada para soldagem.	50
Figura 17 – “Meia cana” de tubo. (ASTM A 335 Gr P91).....	51
Figura 18 - Aplicação da técnica do passe de revenimento em camadas sobreposta (a) e deposição de solda na junta chanfrada (b) para mapeamento com ensaio de dureza vickers.	51
Figura 19 – Dimensões da junta e altura da camada do passe de revenimento	52
Figura 20 – Preparação da junta após remoção do defeito simulado.	52
Figura 21 – Execução da soldagem aplicando a técnica da meia camada.	53
Figura 22 – Junta soldada com a remoção da última camada de solda.....	53
Figura 23 – Peça de teste do aço ASTM A335 Gr P91.	54
Figura 24 - Dimensões da peça de teste preparada para a execução de soldagem.	55
Figura 25 – Pré-aquecimento da peça de teste.....	55
Figura 26 – Soldagem da peça de teste pelo processo AT/TIG.....	56
Figura 27 - Sequência da soldagem e distribuição das camadas de solda.....	56
Figura 28 – Conclusão da soldagem da peça de teste e pós-aquecimento.	57
Figura 29 - Imagem radiográfica da peça de teste – Identificação do IQI – fios de arame que identificam a qualidade da imagem radiográfica.	58
Figura 30 - Gráfico de TTPS – modelo reduzido – gráfico real de TTPS.	59
Figura 31 – Localização da remoção do corpo de prova.....	59
Figura 32 – Corpo de prova obtido da peça de teste.	60
Figura 33 – Sentido da soldagem dos passes de revenimento.	61
Figura 34 - Soldagem com passe de revenimento – corpo de prova.	61
Figura 35 - Dimensões do corpo de prova e reparo executado.....	63
Figura 36 – Execução da primeira camada de revenimento.	63
Figura 37 – Execução da segunda camada de revenimento.....	64
Figura 38 – Execução da terceira e quarta camada de revenimento.	65
Figura 39 – Pontos de medição da dureza.....	66
Figura 40 – Representação gráfica dos pontos de medição da dureza.....	66

Figura 41 - Gráfico de dureza vickers (5 N) do corpo de prova soldado com o processo TIG/AT.	67
Figura 42 – Metalografia da junta soldada com o processo AT/TIG.....	68
Figura 43 – Mapeamento de dureza no corpo de prova com solda de revenimento.	69
Figura 44 – Gráfico da dureza vickers (5N) do corpo de prova após execução do passe de revenimento soldado com eletrodo revestido.....	70
Figura 45 – Gráfico da dureza vickers (5N) do corpo de prova após execução do passe de revenimento soldado com eletrodo revestido.....	70
Figura 46 - Soldagem eletrodo revestido – corpo de prova com passe de revenimento: (a) metal base (1000x) (b) ZTA (1000x) e (c) metal de solda (1000x).	72
Figura 47 - Soldagem eletrodo revestido – corpo de prova com passe de revenimento: (a) ZTA entre cordões (1000x) (b) ZTA (1000x) e (c) metal de solda (1000x).	72
Figura 48 – Mapeamento de dureza na região do reparo.	73
Figura 49 - Gráfico da dureza vickers (5N) do corpo de prova após execução do reparo (a) representação gráfica, (b) localização dos pontos de medição - dureza máxima de 450 HV.....	75
Figura 50 – Medições de dureza vickers entre cordões de soldas e as ZTA´s destes cordões.....	76
Figura 51 – Impressão da dureza vickers (5N) do corpo de prova, na região entre a ZTA e o centro de um cordão de solda.	77
Figura 52 - Soldagem com eletrodo revestido - CP do reparo: (a) metal de base (1000x) (b) ZTA (1000x) e (c) metal de solda (1000x).	78
Figura 53 - Soldagem com eletrodo revestido - CP do reparo: (a) ZTA entre cordões (1000x) (b) ZTA (1000x) e (c) metal de solda (1000x).	79
Figura 54 – Pontos de medição de dureza acima do limite estabelecido pelo ASME B31.3 – 2012.	80
Figura 55 - Gráfico da dureza vickers (5N) - corpo de prova do passe de revenimento – perfil tridimensional.....	82
Figura 56 - Gráfico da dureza vickers (5N) - corpo de prova da solda do reparo revenimento – perfil tridimensional.....	83
Figura 57 – Polígono delimitando a região de dureza maior do que 400 HV.	84

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Comparação da variação de dureza – solda original, solda com passe de revenimento e solda do reparo com passe de revenimento.	85
Quadro 2 – Média das durezas – solda original, solda com passe de revenimento e solda do reparo com passe de revenimento.....	87
Quadro 3 – Desvio padrão das durezas – solda original, solda com passe de revenimento e solda do reparo com passe de revenimento.	87
Quadro 4 - Comparação da variação de dureza – solda com passe de revenimento e solda do reparo com passe de revenimento.....	89
Quadro 5 - Média das durezas – solda com passe de revenimento e solda do reparo com passe de revenimento.	89
Quadro 6 – Desvio padrão das durezas – solda com passe de revenimento e solda do reparo com passe de revenimento.	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química de aços 9-12% Cr (WEGST – 2004) (adaptado de CARDOSO – 2009).	21
Tabela 2 – Parâmetros para execução do pré-aquecimento e controle da temperatura de interpasse (ASME B31.3 - 2012 – com adaptações).	28
Tabela 3 – Parâmetros para execução de tratamento térmico de alívio de tensões e dureza máxima permitida (ASME B31. 3-2012 – com adaptação).	33
Tabela 4 – Composição química de um aço Gr P91 (ASTM A 335-2012).	36
Tabela 5 – Tensões admissíveis de um aço Gr P91 (ASTM A 335-2012).	37
Tabela 6 – Propriedades mecânicas à temperatura ambiente de aços resistentes a altas temperaturas (Adaptado de ROCHA, 2012).	37
Tabela 7 – Resumo e aplicação das diversas técnicas de passe de revenimento.	49
Tabela 8 – Composição química do metal de base e consumível de soldagem.	54
Tabela 9 – Parâmetros para TTAT do aço ASTM A335 Gr P91.	58
Tabela 10 – Parâmetros de soldagem utilizados para realização do passe de revenimento.	62
Tabela 11 – Parâmetros de soldagem com passe de revenimento – primeira camada.	64
Tabela 12 – Parâmetros de soldagem com passe de revenimento – segunda camada.	64
Tabela 13 – Parâmetros de soldagem com passe de revenimento – terceira e quarta camada.	65
Tabela 14 – Resultados da medição de dureza na peça de teste soldada.	67
Tabela 15 – Resultados medição de dureza do corpo de prova com passe de revenimento.	69
Tabela 16 – Resultados medição de dureza do corpo de prova com passe de revenimento. Linha vertical A e B.	71
Tabela 17 – Resultados da medição de dureza da peça reparada com passe de revenimento.	74
Tabela 18 – Resultados da medição de dureza da peça reparada com passe de revenimento. Regiões entre soldas e ZTA entre cordões.	76

LISTA DE ABREVIATURAS

A – Intensidade de Corrente Elétrica
ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASM International – The materials Information Society
ASME - American Society of Mechanical Engineers
ASTM - American Society for Testing and Materials
AWS – American Welding Society
B – Boro
C - Carbono
CFC – Cúbico de face centrada
CP – Corpo de Prova
Cr - Cromo
END – Ensaio Não Destrutivo
EPS – Especificação do Procedimento de Soldagem
GMAW – Gas Metal Arc Welding (AT)
GTAW – Gas Tungsten Arc Welding (TIG)
IQI – Indicador de qualidade de imagem
h - Hora
HB – Dureza Brinell
HV – Dureza Vickers
J – Joule – unidade de energia (W.s)
MB – Metal Base
Mn - Manganês
Mo – Molibdênio
MPa – Megapascal – unidade de pressão
MS – Metal de Solda
N - Nitrogênio
Nb – Níbio
Pag. – Página
S.A – Solda anterior – referência a solda original executada
SMAW – Shielded Metal Arc Welding (ER – Eletrodo Revestido)
TTAT – Tratamento Térmico de Alívio de Tensões
TTPS – Tratamento Térmico Pós Soldagem
v – Velocidade de Avanço mm/min.
V – Vanádio
vol. – Volume
Vo – Tensão elétrica
ZF – Zona Fundida
ZL – Zona de ligação
ZTA GG – Zona Termicamente Afetada de grãos grosseiros
ZTA GF – Zona Termicamente Afetada de grãos finos
ZTA IC – Zona Termicamente Afetada intercrítica
ZTA SC – Zona Termicamente Afetada subcrítica
W - Tungstênio

LISTA DE SÍMBOLOS

°C – Grau Celsius

°F – Grau fahrenheit (33,8°C)

µm - micrometro

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	20
1 PROPOSTA DE TRABALHO	25
2 O CÓDIGO ASME E A NORMA ASME B31.3	26
2.1 Qualificação do procedimento de soldagem	26
2.2 Qualificação do soldador	27
2.3 Cuidados a serem tomados na soldagem do aço ASTM A 335 Gr P 91	27
2.3.1 Pré-aquecimento	28
2.3.2 Temperatura de interpasse	29
2.3.3 Pós-aquecimento	29
2.3.4 Interrupção da Soldagem	30
2.3.5 Resfriamento	30
2.3.6 Controle da soldagem	30
2.3.7 Qualidade de imagem radiografica - IQI	31
2.3.8 Tratamento térmico alívio de tensões - TTAT	32
3 A LIGA DE AÇO ASTM A 335 Gr P 91	34
3.1 Histórico da evolução dos aços ferríticos Cr-Mo para aplicação em altas temperaturas	34
3.2 A Especificação do aço ASTM A 335 Gr P91	35
3.3 Curva TTT de um aço ASTM A 335 Gr P22	38
3.4 Curva TTT de um aço ASTM A 335 Gr P91	39
4 PASSE DE REVENIMENTO	40
4.1 Técnica do passe de revenimento	40
4.2 Aplicação do passe de revenimento	41
4.3 Princípios metalúrgicos do passe de revenimento	42
4.3.1 ZTA – zona termicamente afetada	44
4.3.2 TTPS – tratamento térmico pós soldagem	44
4.3.3 TTAT – tratamento térmico de alívio de tensões	45
4.4 Técnicas de soldagem	45
4.4.1 Técnica da meia camada	46
4.4.2 Técnica da camada alternada	48
4.4.3 Técnica da camada consistente	48
4.4.4 Técnica da deposição controlada	48
5 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	50
5.1 Confeção da peça de teste	53
5.2 Soldagem, controle radiografico e tratamento térmico da peça de teste	55
5.3 Obtenção dos corpos de prova	59
5.4 Análise metalográfica	60

5.5	Simulação da técnica do passe de revenimento -----	60
5.6	Corpo de prova do reparo -----	63
6	RESULTADOS -----	66
6.1	Ensaio de dureza dos corpos de prova da solda original -----	66
6.2	Análise metalográfica do corpo de prova da solda original -----	67
6.3	Mapeamento da dureza do corpo de prova do passe de revenimento-----	69
6.4	Análise metalográfica do corpo de prova do passe de revenimento-----	71
6.5	Medição de dureza do corpo de prova do passe de revenimento-----	73
6.6	Metalografia do corpo de prova do reparo -----	77
7	DISCUSSÃO-----	80
7.1	Solda original da peça de teste-----	80
7.2	Solda com passe de revenimento -----	81
7.3	Solda do reparo com passe de revenimento -----	83
7.4	Comparação entre o corpo de prova da solda original, o corpo de prova com passe de revenimento e o corpo de prova da solda de reparo com passe de revenimento.-----	85
7.5	Comparação entre as ZTA´s dos cordões de solda e centro do cordão de solda do corpo de prova com passe de revenimento e o corpo de prova da solda de reparo com passe de revenimento. -----	88
8	CONCLUSÕES -----	91
9	PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS -----	94
10	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS-----	95
11	APÊNDICE -----	100
	APÊNDICE A - Parâmetros de soldagem – Utilizado para a soldagem da peça de teste.-----	101
	APÊNDICE B - Ensaio radiográfico – Laudo.-----	102
	APÊNDICE C - Registro de tratamento térmico e gráficos. -----	103
12	Anexo fotográfico -----	105

INTRODUÇÃO

A história nos revela que é comum existir uma interação entre os avanços tecnológicos e o desenvolvimento de novos materiais. Na segunda metade do século XX, o aparecimento de novos aços esteve na maioria das vezes associado à necessidade existente de colocar conhecimentos adquiridos em prática, mas que estavam limitados pelos materiais existentes até a década de 1960 (CARDOSO – 2009).

Até a década de 1960 os aços usados na fabricação de tubos possuíam até 2,25% de cromo (Cr) em sua composição. Com o aumento do teor de cromo acima de 7%, a partir da década de 1960, surge um novo grupo de aços, caracterizado por possuir uma microestrutura martensítica. Com a introdução do X20CrMoNiV11-1 (European steel and alloy grades - EN 10222-2 que é similar ao ASTM A 335 Gr P91) no início dos anos 60, deu-se um importante passo em termos de melhoria da eficiência das centrais termoeletricas, pois foi possível aumentar a pressão de trabalho nas tubulações. A adição de elementos como o vanádio (V), nióbio (Nb), tungstênio (W) e boro (B) veio permitir a obtenção de melhorias substanciais no âmbito da resistência à fluência, característica muito importante para equipamentos que sofrem variação de temperatura e pressões acima de 650°C e 40 MPa (CARDOSO, 2009).

Na tabela 1 da página 21, estão relacionados os vários tipos de aços contendo em sua composição química um teor de cromo acima de 7%, cuja coluna está destacada.

Tabela 1 - Composição química de aços 9-12% Cr (WEGST – 2004) (adaptado de CARDOSO – 2009).

AÇOS	COMPOSIÇÃO QUÍMICA													
	C	Si	Mn	Al	Cr	Cu	Ni	Mo	W	V	Nb	Ti	B	N
X11CrMo9-1	0,18	0,25	0,3	0,04	8	-	-	0,9	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	max.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,15	1	0,6	-	10	-	-	1	-	-	-	-	-	-
X20CrMoNiV11-1	0,17	0,15	1	0,04	10	-	0,3	0,8	-	0,25	-	-	-	-
	-	-	Max.	max.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,23	0,5	-	-	12,5	-	0,8	1,2	-	0,15	-	-	-	-
X10CrMoVNb9-1	0,18	0,2	0,3	0,04	8	-	0,1	0,9	-	0,18	0,06	-	-	0,03
	-	-	-	max.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,12	0,5	0,6	-	9,5	-	0,4	0,1	-	0,25	0,1	-	-	0,07
X11CrMoWVNb9-1-1	0,09	0,1	0,3	0,04	8	-	-	0,9	0,9	0,18	0,06	0,05	0,001	0,05
	-	-	-	max.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,13	0,5	0,6	-	9,5	-	-	1,1	0,1	0,1	0,1	1,1	0,006	0,09
T/P 92	0,07	0,5	0,3	0,04	8	-	0,4	0,3	1,5	0,15	0,04	0,05	0,001	0,03
	-	max.	-	max.	-	-	max	-	-	-	-	-	-	-
	0,13	-	0,6	-	9,5	-	-	0,6	2	0,25	0,09	1,1	0,006	0,09
T/P 122	0,07	0,5	0,7	0,04	10	0,3	0,5	0,25	1,5	0,15	0,04	0,05	0,005	0,04
	-	max.	max.	max.	-	-	max.	-	-	-	-	-	max.	-
	0,13	-	-	-	12,5	1,7	-	2,5	2,5	0,3	0,1	1,1	-	0,1

Em meados do ano de 1970, nos Estados Unidos, foi desenvolvido um novo material intermediário entre o aço ASTM A335 Gr T/P22 e os aços inoxidáveis austeníticos, que comportasse temperaturas entre 540 e 600°C (CARDOSO, 2009).

Com o avanço tecnológico, vários tipos de materiais foram desenvolvidos para as mais diversas finalidades e aplicações. Para atender a essas necessidades, os projetistas precisam de aços com diferentes elementos de liga. Ao mesmo tempo, fabricantes, montadores e contratantes na construção de uma nova instalação, ou na manutenção de uma existente, devem utilizar equipamentos e técnicas que os ajudem a trabalhar de forma rápida e eficiente, como afirma ROTH (2002):

“Muitas construções na década de 70 foram construídas usando aços P22 (2,25 Cr-1Mo (cromo – molibdênio)) conforme recomendações da American Society for Testing and Materials (ASTM A335); hoje, muitos fabricantes e projetistas estão usando cada vez mais uma liga com 9 Cr-1Mo-V (Cromo - Molibdênio e Vanádio) (ASTM A335 Gr - P91), denominada aço grau 91. O aço P91 normalmente permite uma redução da espessura da parede do tubo, pelo menos, com uma razão de 2 para 1. Se a parede é mais fina, as cargas de suspensão são mais leves. Além disso, uma parede que é de 50 % mais fina o tempo de solda é menor e menos metal de enchimento é usado.”

A figura 1 da página 22 mostra um tubo com um diâmetro interno de 381 mm, 50 mm de espessura feito com um aço ASTM A335 Gr P22 (P22), e um tubo de mesmo diâmetro de aço ASTM A335 Gr P91 (P91). Os dois tubos foram projetados para trabalhar nas mesmas condições de serviço. Observa-se que o tubo de aço

P22 possui espessura igual a 50 mm e o P91, espessura igual a 25 mm. Percebe-se, assim, uma diminuição de 50% na espessura (25 mm), com isso tem se uma redução de massa de aproximadamente 54%. Por essa razão a liga P91 vem sendo utilizada com mais frequência na fabricação destes tubos (CARDOSO, 2009).

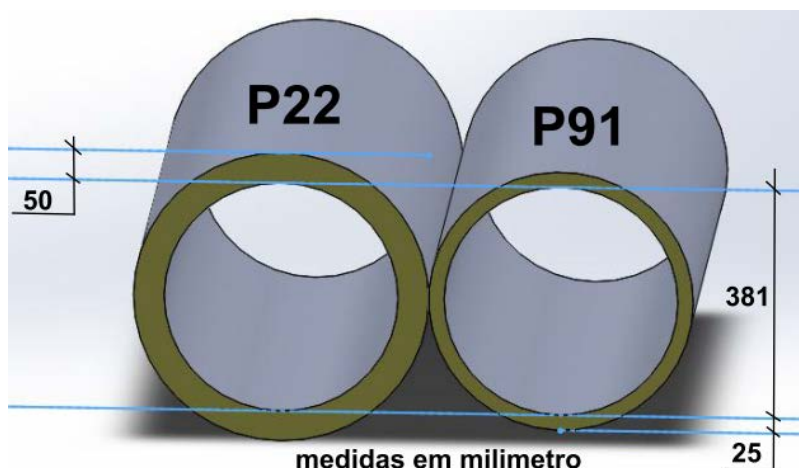


Figura 1 - Comparação dos valores de espessuras de parede em tubulações de aço P22 e P91.

Para a construção destes tubos de aço ASTM A335 Gr P91, após o processamento mecânico, eles são sujeitos a uma têmpera com um aquecimento até à temperatura de austenitização (1040-1080°C), em um estágio de 1 h/25 mm de espessura, permitindo a obtenção de um tamanho de grão austenítico de 20 a 30 μm , capaz de otimizar as propriedades mecânicas. O aço é em seguida submetido a um resfriamento ao ar até à temperatura ambiente. Este tratamento térmico promove uma microestrutura de martensita escorregada com elevada densidade de discordâncias e baixa quantidade de precipitados, apresentando uma dureza e resistência mecânica elevada, mas uma ductilidade e tenacidade muito baixa (ROCHA, 2012).

Em seguida é realizado um revenimento entre 730 e 800°C durante 1 h/25 mm de espessura. (ROCHA, 2012).

O tratamento térmico de alívio de Tensões (TTAT) requer o controle da temperatura em fases distintas para o alívio de tensão causado pela soldagem. A norma ASME B31.3 - 2012, descreve algumas recomendações para o aço ASTM A 335 Gr P91 que serão apresentados no capítulo 2 que se inicia na página 26.

A figura 2 da página 23 mostra um gráfico com as etapas para a execução da soldagem e do TTAT, conforme as recomendações da norma ASME B31.3 – 2012.

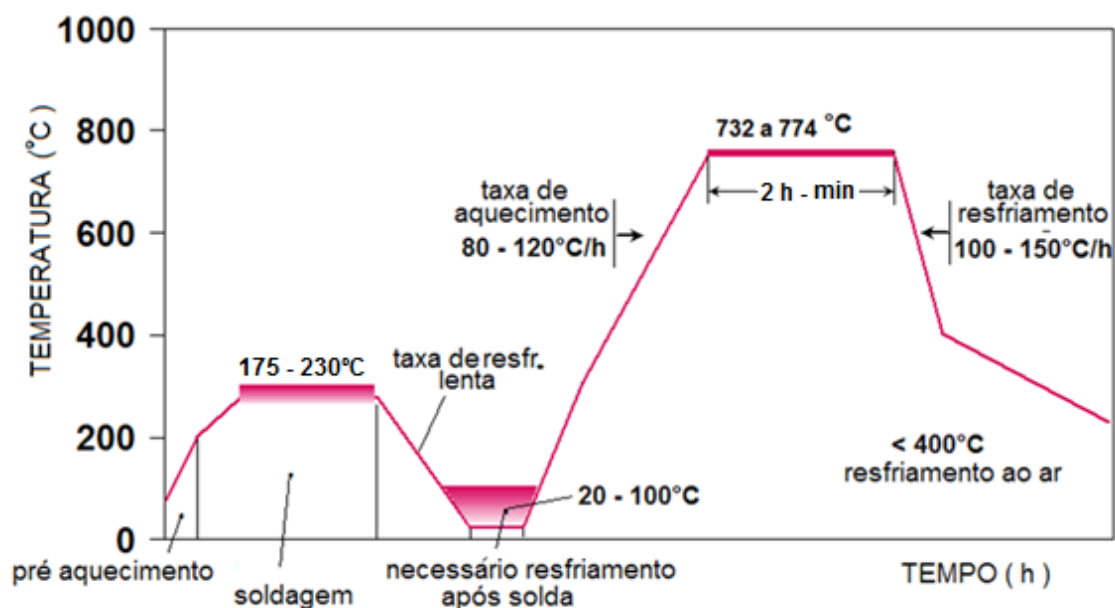


Figura 2 – Tempo e temperatura de soldagem e TTAT de um aço ASTM A 335 Gr P91 ("Guideline for Welding P(T)91" by William F. Newell Jr, Euroweld Ltda, December 2001)

Observa-se neste gráfico que a temperatura para o pré-aquecimento inicia em aproximadamente 100°C, porém, a execução da soldagem é iniciada quando esta temperatura atinge 200°C, a soldagem deve permanecer em uma faixa de 175°C a 230°C, denominada de interpasse, após a soldagem o aço é resfriado lentamente.

Após essa etapa, a junta soldada é então preparada para os ensaios não destrutivos (END's) necessários para a comprovação da qualidade da solda.

Concluída esta etapa, inicia-se o TTAT, onde uma taxa de aquecimento com velocidades entre 80°C/h a 120°C/h é requerida, ao atingir a temperatura de tratamento, esta deve permanecer em uma temperatura de 732° a 774°C por um período mínimo de 2 horas. Em seguida é controlada a taxa de resfriamento com uma velocidade entre 100°C/h a 150°C/h, até atingir uma temperatura de aproximadamente 400°C, abaixo desta temperatura o aço é resfriando até a temperatura ambiente sem a necessidade do controle da temperatura. Após concluída toda essa etapa, a junta soldada é novamente submetida a END's, a fim de comprovar que não surgiu algum defeito durante o TTAT.

O tempo levado para concluir uma junta de aço ASTM A 335 Gr P91 com diâmetro externo de 324 mm e espessura de 27 mm, desde a soldagem até a conclusão do TTAT é de aproximadamente 30 horas.

Este tempo é necessário somente para a execução da soldagem e do TTAT e caso seja detectado um defeito na avaliação dos ensaios não destrutivos (END's) após o TTAT, este deve ser reparado, e novamente submetido a um novo TTAT, cujo tempo de reparo e tratamento é de aproximadamente 20 horas.

Casos semelhantes também podem acontecer quando houver paradas de manutenção para a verificação da integridade dessa tubulação e/ou defeitos detectados durante os serviços.

Uma técnica para pequenos reparos em materiais ferrosos, sem fazer TTAT, e permitida pelo código ASME (*American Society of Mechanical Engineers*) é denominada soldagem com passe de revenimento ou *temper bead*. A norma AWS (*American Welding Society*) D10.8 - 1996 define a soldagem com passe de revenimento como sendo um cordão de solda depositado em um local específico ou superfície, com a finalidade de influenciar as propriedades metalúrgicas da zona termicamente afetada (ZTA) e/ou do metal de solda (MS).

Esta técnica tem sido bastante estudada, para realização do reparo com solda, onde, através da aplicação de uma relação adequada de energias de soldagem entre as duas camadas, procura-se obter uma sobreposição dos ciclos térmicos, de tal forma que ocorra revenimento e refino na ZTA do primeiro passe (AZEVEDO, 2002).

1 PROPOSTA DE TRABALHO

O objetivo deste trabalho é verificar se com o uso do passe de revenimento aplicado nos reparos executados em tubulações feitas com aço ASTM A335 Gr P91 sem o posterior TTAT a dureza no metal base (MB), na ZTA e MS, fica, ou não, dentro do limite estabelecido na norma ASME B31.3 - 2012.

Para tal investigação será executado um mapeamento de dureza em três corpos de provas soldados, sendo o primeiro denominado CP da solda original, onde será realizada a soldagem e o TTAT, conforme as recomendações da norma ASME B31.3 – 2012, o segundo CP denominado de solda com passe de revenimento, onde serão aplicados cordões de solda, utilizando a técnica do revenimento e o terceiro CP, que será denominado de solda do reparo com passe de revenimento, onde será executado um reparo, usando a mesma técnica. Nos três CP's será executado um mapeamento de dureza numa área que envolve o MB a ZTA e o MS.

Posteriormente estas durezas serão comparadas entre si e com os limites estabelecidos na norma ASME B31.3 - 2012. Além disto, será observada a microestrutura desenvolvida nas três zonas dos três corpos de prova e verificado se existirão ou não alterações. Por fim verificar-se-á se as alterações na microestrutura podem influenciar na dureza encontrada.

2 O CÓDIGO ASME E A NORMA ASME B31.3

Fundada em 1880 como *American Society of Mechanical Engineers*, ASME é uma organização profissional que permite a colaboração, a partilha de conhecimentos e o desenvolvimento de competências em todas as disciplinas da engenharia, promovendo simultaneamente o papel fundamental do engenheiro na sociedade (ASME, 2013).

O código ASME recomenda as seguintes normas para a construção e montagem de tubulações e equipamentos:

- ASME B31.1- Power Piping, 2012;
- ASME B31.3 - Process Piping, 2012;
- ASME Seção I - Rules for Construction of Power Boiler, 2011;
- ASME Seção III - Alternative Rules For Construction of High Power Boiler, 2011;
- ASME Seção VIII – Rules for Construction of Pressure Vessels, 2011;
- ASME Seção IX - Qualification Standard for Welding and Brazing Procedures, Welders, Brazers, and Welding and Brazing Operators, 2011.

A soldagem do aço ASTM A 335 Gr P91 geralmente requer cuidados para a soldagem de peças, na qual devem ser mantidas as temperaturas de pré-aquecimento, interpasse e pós-aquecimento em faixas determinadas por cada norma.

Será utilizada a norma ASME B31.3 – 2012, também denominada de B31.3 como referência para os critérios adotados e descritos a seguir.

2.1 Qualificação do procedimento de soldagem

Devido a diversos acidentes significativos ocorridos no passado, tendo como origem da falha a soldagem utilizada nas intervenções de reparo, basicamente devido a procedimentos inadequados que permitiram trinca induzida por hidrogênio, determinou-se que as execuções das soldas fossem realizadas somente com procedimentos qualificados (KÜCHLER, 2009).

O objetivo da qualificação de um procedimentos de soldagem é o de determinar se a solda proposta para ser empregada na fabricação é capaz de alcançar as propriedades exigidas para a sua pretendida aplicação (ASME IX – QW 100.1, 2011).

2.2 Qualificação do soldador

Todos os soldadores deverão ser qualificados conforme as recomendações previstas para cada norma de construção a ser utilizada, para tanto deverá comprovar através de testes de qualificação a sua habilidade em executar soldas sem defeitos (WTIA, 2006).

A norma ASME B31.3 - 2012, determina que os soldadores devem ser qualificados de acordo com as exigências da norma ASME seção IX.

A complexidade da maioria das técnicas do passe de revenimento exige que o soldador seja supervisionado durante a execução da soldagem (WTIA, 2006).

2.3 Cuidados a serem tomados na soldagem do aço ASTM A 335 Gr P 91

De acordo com as recomendações prescritas na norma ASME B31.3 - 2012, alguns cuidados devem ser tomados para a soldagem do aço ASTM A 335 Gr P91, e dentre essas recomendações, algumas são destacadas a seguir.

Para o pré-aquecimento, no controle de temperatura, são utilizadas resistências elétricas e termopares, mostradas na figura 3, este tipo de controle também pode ser utilizado para as etapas de interpasse e pós-aquecimento.

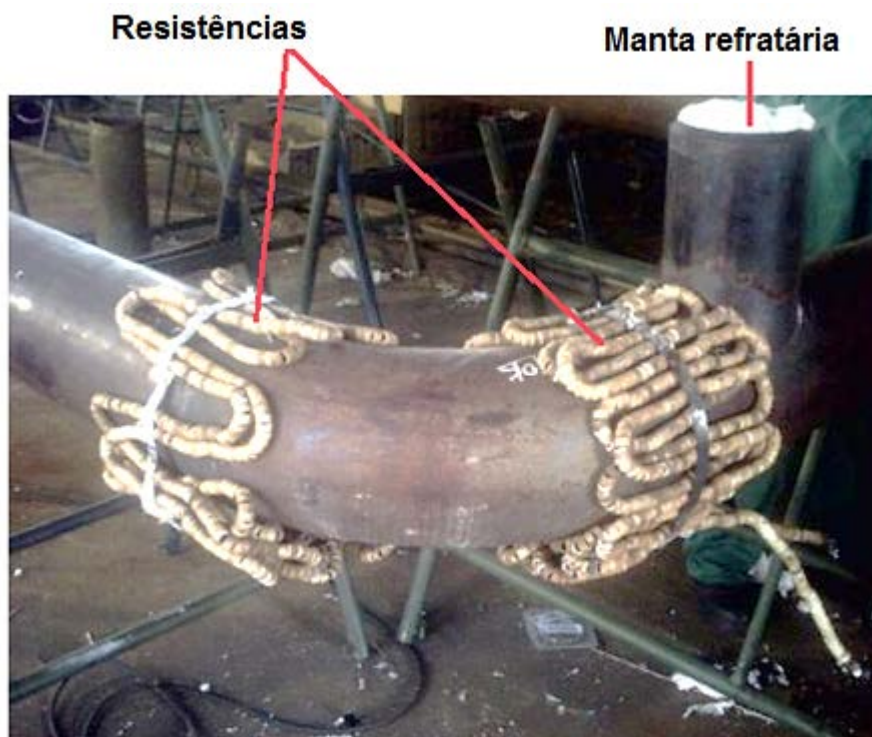


Figura 3 – Resistências utilizadas para controle da soldagem – pré-aquecimento, interpasse e pós-aquecimento – (figura extraída da internet – Advel tecnologia) mar-2013.

2.3.1 Pré-aquecimento

Um controle do pré-aquecimento (aplicação controlada de calor no metal base (MB)), é essencial nas regiões adjacentes da junta a ser soldada, imediatamente antes da operação de soldagem para a remoção de umidade da peça).

O pré-aquecimento recomendado pela norma ASME B31. 3 2012 (parágrafo 330 - preheating) tem a finalidade de reduzir a taxa de resfriamento do metal cuja temperatura pode variar de 50 a 540°C, sendo mais comumente aplicada na faixa de 150 a 200°C.

O pré-aquecimento é o método mais largamente usado para eliminar as trincas induzidas por hidrogênio (trincas a frio – são aquelas que ocorrem algum tempo após a soldagem) em soldas. Ele diminui a taxa de resfriamento da solda, reduz as chances para formação de microestruturas frágeis, consequentemente, influencia nas propriedades mecânicas da junta soldada e aumenta o tempo para o hidrogênio se difundir da solda (DAVIDSON, 2003).

Na tabela 2, está destacada a temperatura mínima de pre-aquecimento de 200°C recomendado para o aço ASTM A 335 Gr P91. Este pre-aquecimento deve ser executado sempre pelo lado oposto por onde se esta aquecendo a junta a ser soldada e sua medição de temperatura e feita com lapis de controle de temperatura e/ou termômetro digital.

Tabela 2 – Parâmetros para execução do pré-aquecimento e controle da temperatura de interpasse (ASME B31.3 - 2012 – com adaptações).

METAL BASE	ANÁLISE DO METAL DE SOLDADA-Nº	GRUPO DO METAL BASE	ESPESSURA NOMINAL DA PAREDE (mm)	TENSÃO MÍNIMA DE RESISTÊNCIA, METAL BASE (MPa)	TEMPERATURA MÍNIMA REQUERIDA (°C)
1	1	Aço Carbono	< 25	≤ 490	10
			≥ 25	Todas	80
			Todas	> 490	
5A,5B,5C	4,5	Aços ligas 2 1/4% ≤ Cr ≤ 2%	Todas	Todas	120
15E	5	Aços ligas 9Cr-1Mo-V	Todas	Todas	200

NOTA: A temperatura de interpasse deve estar entre 175°C - 230°C

Na nota da tabela 2 da página 28, observa-se a faixa de temperatura recomendada para o controle de temperatura entre os passes executados (interpasse).

2.3.2 Temperatura de interpasse

Conforme estabelecido na norma ASME B31.3 - 2012 uma temperatura de interpasse (faixa de temperatura que a junta soldada deve apresentar antes do passe seguinte ser iniciado), deve ser mantida durante a soldagem ficando geralmente compreendida entre 175 e 230°C conforme mostrada na nota da tabela 2 da página 28.

A temperatura de interpasse permite que a junta soldada resfrie abaixo do início da linha de transformação da austenita em martensita, permitindo assim que parte da martensita já transformada sofra algum tratamento térmico proporcionado pelos passes subsequentes. A medição deve ser feita diretamente por onde está sendo executada a soldagem, utilizando lápis de controle de temperatura ou termômetro digital. A limitação da temperatura de interpasse vai baixar a probabilidade de existência de fissuração a quente (trincas geradas pela contração da solda ou trincas de solidificação), devido às percentagens de silício e nióbio existentes no material de adição (DANIELSEN, HALD, 2006).

2.3.3 Pós-aquecimento

Após a conclusão da soldagem é requerido um pós-aquecimento (temperatura na qual a junta soldada deve permanecer durante um período de no mínimo uma hora e temperatura de 300°C), imediatamente após a soldagem, e cujo objetivo é reduzir o teor de hidrogênio introduzido na operação de soldagem, uma vez que sua presença favorece o aparecimento de fissuração a frio (DANIELSEN, HALD, 2006).

Conforme estabelecido pela norma AWS D10.10 - 2009 um pós-aquecimento de 149 a 316°C por um período mínimo de duas horas para cada 25 mm de espessura é recomendado para permitir a difusão do hidrogênio retido durante a soldagem.

2.3.4 Interrupção da Soldagem

A soldagem não deve ser interrompida antes de se concluir o passe de raiz e o passe de reforço dessa raiz. Conforme definido na norma AWS A3. 0 - 2011 é denominado de passe de raiz, o passe de solda feito para produzir um ou mais cordões de solda que se estendem em parte ou na totalidade na raiz da junta, mostrado na figura 4. A figura 4(a) mostra um croqui esquemático do passe de raiz e a figura 4(b) o passe de raiz executado na junta.

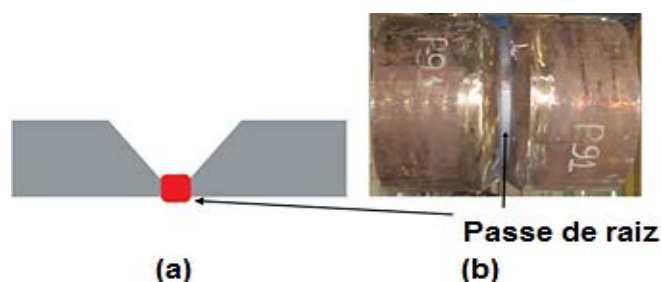


Figura 4 - Passe de solda de raiz em uma junta – terminologia usual de soldagem e símbolos de solda – (MARQUES, MODENESI, BRACARENSE) – UFMG – Julho- 2007.

2.3.5 Resfriamento

Deve-se permitir a redução da temperatura da peça até a temperatura ambiente, empregando-se para isso uma taxa de resfriamento controlada. Dessa forma se espera que toda a austenita (ferro com estrutura cubica de face centrada – CFC) formada seja transformada para martensita, que então será revenida no tratamento térmico que irá se suceder.

2.3.6 Controle da soldagem

A técnica de soldagem deve ser levemente oscilante (passe realizado com oscilação transversal em relação ao eixo da solda), de forma a se obter cordões de soldas mais largos e menos espessos figura 5(a). Além do passe oscilante existe também o passe estreito figura 5(b) que é aquele realizado sem movimento oscilatório. Estas definições estão estabelecidas na norma AWS A3.0 - 2010.

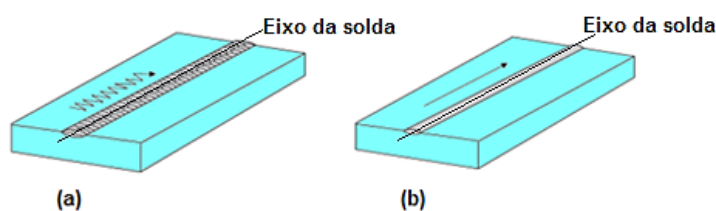


Figura 5 – Passe de acabamento em uma junta soldada – (a) passe oscilante e (b) passe estreito (adaptado do AWS A3. 0 – 2010).

Deve se também controlar a velocidade e a energia de soldagem, quanto aos consumíveis de soldagem, utilizar aqueles cuja composição química seja similar ao material a ser soldado, pois isso está diretamente relacionada com a qualidade final da solda.

2.3.7 Qualidade de imagem radiográfica - IQI

Uma forma de verificar a qualidade radiográfica é por meio do padrão de qualidade da radiografia, denominado indicador de qualidade da imagem (IQI).

Os indicadores da qualidade da imagem (IQI) ou penetrômetros são dispositivos para avaliação da qualidade da imagem radiográfica (JUNIOR e MARQUES, 2006).

Existem dois tipos de penetrômetros, o de placa e o de fios. A figura 6(a) apresenta o penetrômetro de placa e a 6(b) o de fio (JUNIOR e MARQUES, 2006).

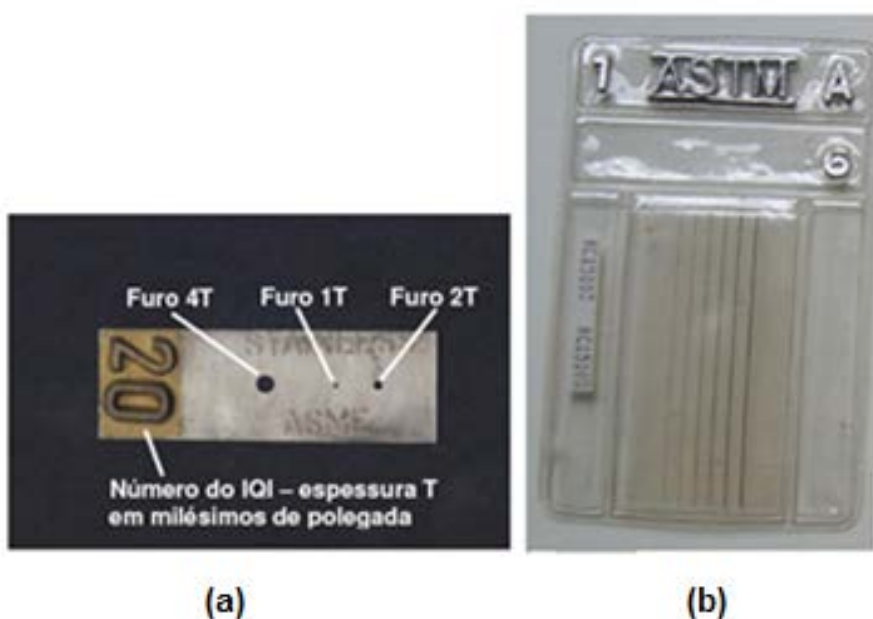


Figura 6 – Penetrômetros ASTM – (a) tipo placa e (b) tipo arame (JUNIOR, MARQUES, 2006).

Os penetrômetros são fabricados a partir de materiais idênticos ou radiograficamente similares aos materiais a serem radiografados e são posicionados, em geral, sobre a peça em exame, voltados para a fonte de radiação. Nos cordões de solda, os penetrômetros de fio em particular devem ser posicionados de maneira que os fios fiquem perpendiculares ao cordão. Com este procedimento a imagem formada na radiografia será uma superposição da imagem do penetrômetro na imagem da peça. (JUNIOR e MARQUES, 2006). Na figura 7 da página 32 é mostrada uma solda com um defeito e o penetrômetro de fio.

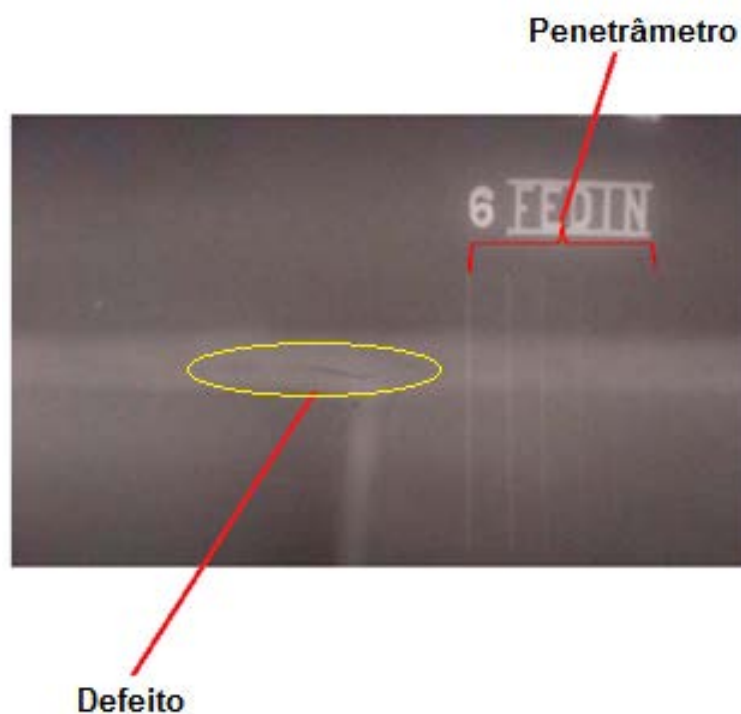


Figura 7 – Penetrâmetros DIN – (a) tipo placa e (b) tipo arame (JUNIOR e MARQUES, 2006).

Os penetrâmetros de fios são constituídos de 5 fios com diâmetros diferentes selados em um envelope plástico transparente. De acordo com a norma ASME seção V, artigo 2 a seleção do IQI deve ser feita para cada espessura a ser radiografada e deve ser verificado qual o diâmetro do fio que deverá ser visualizado na radiografia. Este fio é chamado de arame essencial e para o IQI de arame, admite-se que o arame essencial é bem visível quando se visualiza, na área de interesse da radiografia, 10 mm do seu comprimento (ASME V, 2011).

2.3.8 Tratamento térmico alívio de tensões - TTAT

O tratamento térmico de alívio de tensões (TTAT) requer o controle da temperatura em fases distintas para o alívio de tensão causado pela soldagem. A norma ASME B31.3 - 2012 descrevem algumas recomendações para o aço ASTM A 335 Gr P91.

É obrigatória a realização do TTAT nesse material, independente da espessura a ser soldada. Nesse tratamento toda a martensita será revenida, e a peça finalmente possuirá níveis de dureza e de tenacidade ideais à aplicação (ASME B31.3 - 2012).

A temperatura de TTAT, conforme destacada na tabela 3 da página 33, está compreendida na faixa de 732 a 774°C devendo ser respeitada e bem monitorada

observa-se nesta tabela o tempo mínimo para tratamento em função da espessura soldada.

Tabela 3 – Parâmetros para execução de tratamento térmico de alívio de tensões e dureza máxima permitida (ASME B31. 3-2012 – com adaptação).

METAL BASE	ANÁLISE DO METAL DE SOLDA A-Nº	GRUPO DO METAL BASE	ESPESSURA NOMINAL DA PAREDE (mm)	TENSÃO MÍNIMA DE RESISTÊNCIA, METAL BASE (MPa)	FAIXA DE TEMPERATURA (°C)	ESPESSURA NOMINAL DA PAREDE (mm/min)	TEMPO MÍNIMO, h	DUREZA BRINEL (HB), MAX.
15E	5	Aços ligas 9Cr-1Mo-V	Todas	Todas	732-774	2,4	2	250

Fonte – ASME B31. 3 – 2012.

Segundo a norma ASME B31.3 – 2012, exceder a temperatura máxima pode comprometer a resistência à fluência do material, enquanto temperaturas abaixo da mínima estabelecida ocasionarão durezas elevadas e baixa tenacidade.

Na tabela 3 também está em destaque a dureza máxima permitida para o aço ASTM A 335 Gr P91 que é de 250HB (253HV).

Após a realização deste tratamento deve se executar a medição de dureza que deve ser reduzida a valores entre 211 e 253 HV, e a tenacidade irá superar os 27J requeridos por norma, assim todas as etapas do tratamento devem ser bem controladas, e as colocações de termopares devem ser bem executadas de forma a proporcionar um registro exato das condições de tratamento (ASME B31.3 - 2012).

3 A LIGA DE AÇO ASTM A 335 Gr P 91

3.1 Histórico da evolução dos aços ferríticos Cr-Mo para aplicação em altas temperaturas

A meta de melhoria da eficiência de plantas termoelétricas, pelo aumento da temperatura e pressão do fluido de trabalho, vem sendo perseguida por muitas décadas. Por exemplo, uma planta termoelétrica que opere com faixa de 538°C e 18,5 MPa de pressão, pode ter aumentada a sua eficiência em 6% ao alterar a sua condição de operação para a faixa de 593°C e 30 MPa de pressão. A 650°C o ganho em eficiência situa-se em 8%. (LISBOA, 2007).

Dentro do regime elástico a variação da tensão na parede do tubo é proporcional à variação da pressão interna. Assim se a pressão da tubulação aumentar 1,7 vezes é importante que o material suporte essa variação sem a necessidade de aumento da espessura.

As plantas termoelétricas são divididas quanto à pressão e temperatura de operação, sendo elas: subcrítica, supercrítica e ultra supercrítica.

As condições subcrítica e supercrítica de operação se referem ao ponto crítico da água (374°C e 22 MPa de pressão). Temperaturas e pressões de trabalho abaixo destes valores configuram uma usina subcrítica, enquanto valores mais elevados uma usina supercrítica. Os patamares de operação atuais são de usinas que operam com temperaturas de 600°C e pressões em torno de 30 MPa de pressão, estas usinas são consideradas usinas ultra supercríticas. Algumas usinas europeias e americanas, construídas nos anos de 1950 e 1960, atingiram níveis ultra supercríticos, entretanto, os custos elevados com os materiais necessários para suportar tais condições forçaram a volta da maioria das usinas para condições supercríticas. (MASUYAMA, 2001).

Os aços austeníticos apresentam baixa condutividade e alto coeficiente de expansão térmica, que resultam em altos gradientes de tensões térmicas e trincas de fadiga. Em função destes problemas, que provocavam uma indisponibilidade frequente de operação destas plantas termoelétricas, ocorreu uma interrupção no interesse em fabricar plantas **supercríticas** (593°C e 30 MPa de pressão) e **ultra supercríticas** (650°C e 34 MPa de pressão). Consequentemente a maior parte das

unidades, tanto as já construídas como as subsequentes foram revertidas para condições de operação **subcrítica** (525 °C e 17 MPa de pressão) (LISBOA, 2007).

Desde 1920, as indústrias químicas, petroquímicas e de geração de energia começaram a utilizar aços ligados ao cromo e molibdênio (Cr-Mo). Por volta de 1940, os aços 2,25Cr-1Mo (conhecido por P22, segundo a ASTM) e 9Cr-1Mo (P9) foram introduzidos em aplicações de usinas. O P22 foi usado extensivamente a temperaturas de até 538 °C. Ao longo dos anos, houve uma ênfase na aplicação desses aços, que permitiam operar as usinas de energia em temperaturas superiores e, assim, obter uma maior eficiência energética e menor impacto ambiental (OLIVEIRA, 2010).

Até 1950, essa liga ferrítica era a mais utilizada em aplicações envolvendo altas temperaturas. Entretanto, alguns componentes fabricados com este aço apresentaram resultados insatisfatórios de comportamento em fluência e corrosão nos EUA e na Europa (LISBOA, 2007).

A partir da década de 1970 começou-se a usar uma nova classe de aços ferríticos de 9Cr com uma estrutura martensítica estável e resistência à deformação, o aço ASTM A 335 Gr P91 foi desenvolvido nos Estados Unidos da América para aplicações nucleares, com base no aço para tubulações de P9, 9Cr-1Mo (HALD, VISWANATHAN, ABE, 2006).

Posteriormente considerou-se que aço ASTM (*American Society for Testing and Materials*) A 335 Gr P91 podia ser utilizado para instalações tradicionais com vapor, e em 1984 a ASTM aprovou o aço 9Cr-1Mo-V modificado para uso em tubulações, sendo codificado como ASTM A335 Gr P91 conhecido como aço Gr P91 ou P91 (HALD, VISWANATHAN, ABE, 2006).

O uso do aço ASTM A 335 Gr P91, obteve-se um aumento significativo da resistência à deformação através da melhoria da composição desta liga com pequenas quantidades de vanádio (V), nióbio (Nb) e nitrogênio (N) (HALD, VISWANATHAN, ABE, 2006).

3.2 A Especificação do aço ASTM A 335 Gr P91

Os aços ferríticos Cr-Mo são amplamente utilizados tanto na indústria de geração de energia (plantas termelétricas) quanto na indústria petroquímica (unidades de hidrocraqueamento, hidrotratamento e sistemas de recuperação de calor) e na indústria química por apresentarem praticamente a mesma resistência à

ciclagem térmica a um custo inferior ao dos aços inoxidáveis austeníticos. Atualmente a utilização dos aços Cr-Mo convencionais ocorre em condições críticas de temperatura e pressão, para essa classe de material. Na última década aços ferríticos modificados foram empregados em plantas de geração de energia do Japão e da Europa e as condições de operação foram elevadas para 593 °C e 30 MPa (CUNHA, 2006).

Em caldeiras, que operam com combustíveis fósseis, a temperatura de operação gira em torno de 550°C. O aço 9Cr-1Mo-V modificado caracteriza-se pela sua resistência à corrosão, o que resultou na recomendação de engenheiros projetistas para o seu uso em paredes d'água quando as caldeiras operarem com carvão altamente corrosivo. A quase totalidade dos aços utilizados nos equipamentos submetidos a altas temperaturas se caracteriza por uma resistência à ruptura máxima de 60 MPa de pressão à 600°C. (LISBOA, 2007).

O aço ASTM A 335 Gr P91, é um aço ligado ao Cr e Mo, com adições de V e Nb, com sua composição química estabelecida na norma ASTM A335 – 2012, destacada na tabela 4. Nesta tabela também está apresentada a composição química de um aço P22.

Tabela 4 – Composição química de um aço Gr P91 (ASTM A 335-2012).

GRAU	COMPOSIÇÃO %							OUTROS
	C	Mn	P (max)	S (max)	Si	Cr	Mo	
P1	0,10 - 0,20	0,30-0,80	0,025	0,025	0,10-0,50	...	0,44-0,65	...
P2	0,10 - 0,20	0,30-0,61	0,025	0,025	0,10-0,30	0,50-0,81	0,44-0,65	...
P5	0,15 max	0,30-0,60	0,025	0,025	0,50 max.	4,00-6,00	0,45-0,65	...
P5B	0,15 max	0,30-0,60	0,025	0,025	1,00-2,00	4,00-6,00	0,45-0,65	...
P5C	0,12 max	0,30-0,60	0,025	0,025	0,50 max.	4,00-6,00	0,45-0,65	...
P9	0,15 max	0,30-0,60	0,025	0,025	0,25-1,00	8,00-10,00	0,90-1,10	...
P11	0,05-0,15	0,30-0,60	0,025	0,025	0,50-1,00	1,00-1,50	0,44-0,65	...
P12	0,05-0,15	0,30-0,61	0,025	0,025	0,50 max.	0,80-1,25	0,44-0,65	...
P15	0,05-0,15	0,30-0,60	0,025	0,025	1,15-1,65	...	0,44-0,65	...
P21	0,05-0,15	0,30-0,60	0,025	0,025	0,50 max.	2,65-3,35	0,80-1,06	...
P22	0,05-0,15	0,30-0,60	0,025	0,025	0,50 max.	1,90-2,60	0,87-1,13	...
P23	0,04-0,10	0,30-0,60	0,030 max.	0,010 max.	0,50 max.	1,90-2,60	0,05-0,30	V - 0,20-0,30
P91	0,08-0,12	0,30-0,60	0,020	0,010	0,20-0,50	8,00-9,50	0,85-1,05	V - 0,18-0,25 N - 0,030-0,070 Ni - 0,40 max. Cb - 0,06-0,10 Ti - 0,01 max. Zr 0,01 max.

Na tabela 4 pode se observar que no aço ASTM A335 Gr P91 a porcentagem de cromo é maior quando comparado com o aço ASTM A335 Gr P22, ainda é possível verificar outros elementos de ligas que são adicionados no aço P91.

Os tubos de aço ASTM A335 Gr P91 são fabricados de tubos sem costura e são usados em situações onde a temperatura de trabalho está entre 500°C e 600°C.

A tabela 5 mostra as tensões admissíveis de um aço ASTM A 335 Gr P91 em comparação com os aços ligados ao Cr e Mo.

Tabela 5 – Tensões admissíveis de um aço Gr P91 (ASTM A 335-2012).

TENSÕES ADMISSÍVEIS									
	GRAU								
	P1-P2	P12	P23	P24	P91	P92,P911, P36 classe 1	P122	P36 classe 2	OUTROS
LIMITE DE RESISTÊNCIA (MPa)	380	415	510	585	585	620	620	660	415
LIMITE DE ESCOAMENTO (MPa)	205	220	400	415	415	440	400	460	205

Rocha (2012) apresenta as tensões admissíveis, a tenacidade e a dureza dos aços P1, P2, P23, P24, P92, P911, P36, P122 que são utilizados a altas temperaturas. Observa-se nessa tabela o limite de resistência e o limite de escoamento do aço ASTM A 335 Gr P91, na coluna “outros” mostra os limites admissíveis do aço ASTM A 335 Gr P22, e pode-se verificar que as tensões admissíveis do ASTM A 335 Gr P91 são maiores que o ASTM A 335 Gr P22.

A tabela 6 apresenta em destaques as características entre um aço ASTM A 335 Gr P22 e ASTM A 335 Gr P91 sem realização do tratamento térmico.

Tabela 6 – Propriedades mecânicas à temperatura ambiente de aços resistentes a altas temperaturas (Adaptado de ROCHA, 2012).

AÇO	LIMITE RESISTÊNCIA (MPa) min.	LIMITE ESCOAMENTO (MPa)min.	ALONGAMENTO (%) min.	TENACIDADE (J)min.	DUREZA (max.) HV
A335 P11	415	205	22	35	170
A335 P12	415	220	22	35	170
A335 P22	415	205	22	35	170
A335 P9	415	415	22	35	170
A335 P91	585-760	415	20	35	253

Em comparação ao aço ASTM A 335 Gr P22, pode-se notar porque esses aços estão sendo substituído pelo aço ASTM A 335 Gr P91, uma característica é a redução de massa e uma diminuição de 50% na sua espessura conforme dito anteriormente na página 22, figura 1.

3.3 Curva TTT de um aço ASTM A 335 Gr P22

A figura 8 mostra uma curva TTT para um aço T23 que possui 2,25 %Cr e 1%Mo. De acordo com o ASTM A 335 - 2010, o aço ASTM A 335 Gr P22 possui característica similar do T23, conforme pode ser observado na tabela 4 da página 36.

Segundo o ASME IX – 2011, eles estão enquadrados no grupo de P number 5, que separa os materiais conforme suas características mecânicas químicas e físicas.

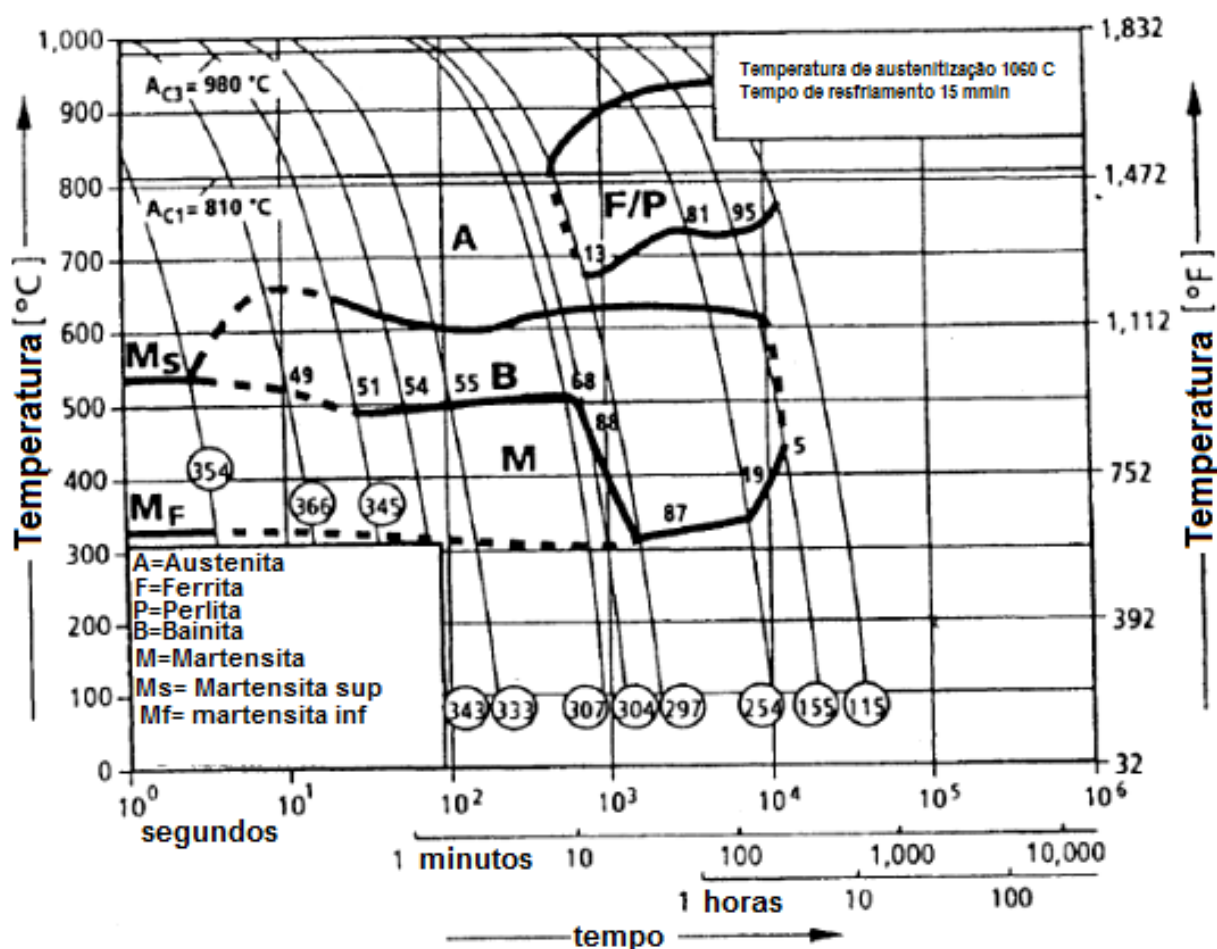


Figura 8 – Curva TTT de um aço T23 – (1,90 a 2,60%Cr) – (LUNDIN,2000).

A curva de resfriamento do aço T23 mostra com um tempo de resfriamento igual a 15 minutos na estrutura é encontrada martensita inferior. Observa-se aqui que o aço ASTM A 335 P22, por característica igual ao T23, possui o mesmo comportamento.

3.4 Curva TTT de um aço ASTM A 335 Gr P91

A microestrutura dos aços ASTM A 335 Gr P91 é martensítica revenida, obtida através da normalização e do revenimento. A figura 9, mostra um diagrama TTT para o aço P91. (FERREIRA, 2010).

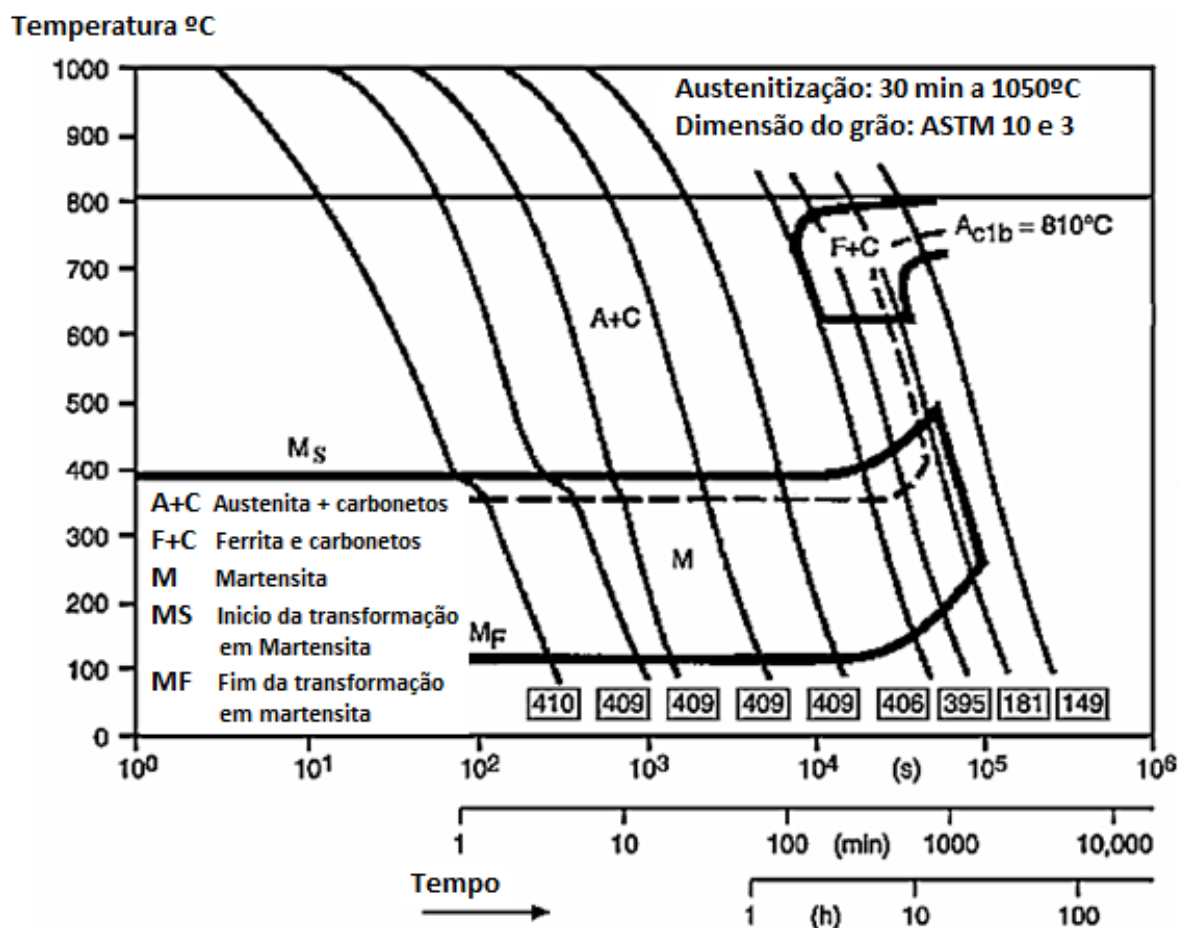


Figura 9 – Curva TTT de um aço P91. (HUYSMANS e VEKEMAN, 2009))

Na figura 9 é possível observar que mesmo com um tempo de tratamento igual a 10 horas, a estrutura é martensítica. Este tratamento promove uma estrutura martensítica com uma elevada densidade de discordâncias e baixa quantidade de precipitados, apresentando uma dureza e resistência mecânica elevadas mas de uma ductilidade e tenacidade muito baixas (<15J). (ROCHA, 2012).

Em comparação com a curva TTT do aço ASTM A 335 Gr P22, nota-se que o tempo de tratamento é de aproximadamente 2 horas.

4 PASSE DE REVENIMENTO

4.1 Técnica do passe de revenimento

A técnica do passe de revenimento, também conhecida por dupla camada, já é empregada em vários trabalhos voltados para o setor de petróleo e gás.

Esta técnica consiste na aplicação de cordões de soldas sobrepostos de maneira uniforme, cujo principal objetivo é por interferência do calor gerado nos passes posteriores da solda, controlar as transformações microestruturais dos passes anteriores (KÜCHLER, 2009).

Para compreender a soldabilidade dos aços é necessário conhecer as várias transformações microestruturais que ocorrem nas diversas regiões da solda.

No caso da soldagem com passe único, a solda é geralmente dividida em três regiões: zona fundida (ZF) constituída pelo metal fundido, zona de ligação (ZL), constituída por uma estreita região onde ocorre uma fusão parcial do metal base junto à zona fundida e zona termicamente afetada (ZTA), região do metal base que sofreu alterações microestruturais causadas pelo calor da soldagem. A ZTA é ainda subdividida em ZTA de grãos grossos (ZTA-GG), ZTA de grãos finos (ZTA-GF), ZTA intercrítica (ZTA-IC) e ZTA subcrítica (ZTA-SC) (ASM METALS HANDBOOK, vol.6), como serão visto mais adiante.

Na figura 10 é mostrada a área afetada por um único cordão de solda. Nesta figura estão destacadas as seguintes regiões: metal de solda, região de grãos grosseiros, região de refino de grãos, região intercrítica e região subcrítica. Neste caso o metal de solda (MS) é quem será austenitizado, proporcionando uma recristalização e formação de alguma martensita que, devido ao seu baixo teor de carbono não apresenta dureza elevada. (KÜCHLER, 2009).

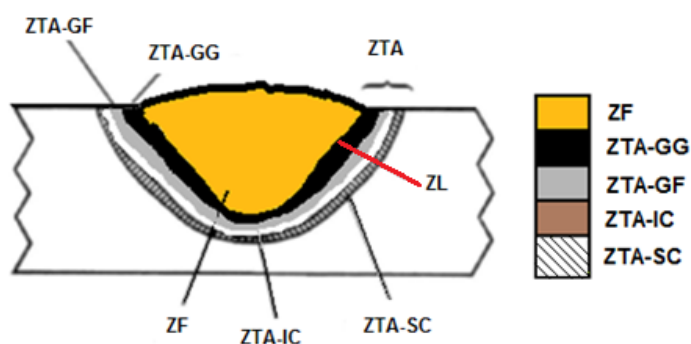


Figura 10 – Esquemático mostrando um procedimento de reparo de áreas afetadas de um único cordão de solda (adaptado do ASM – Metals Handbook – vol. 6 – 1993 pag.209).

A figura 11 apresenta o diagrama esquemático do efeito de sobreposição dos passes de revenimento. Observa-se que parte do MS e da ZTA são refundidos pelo passe subsequente (KÜCHLER, 2009).

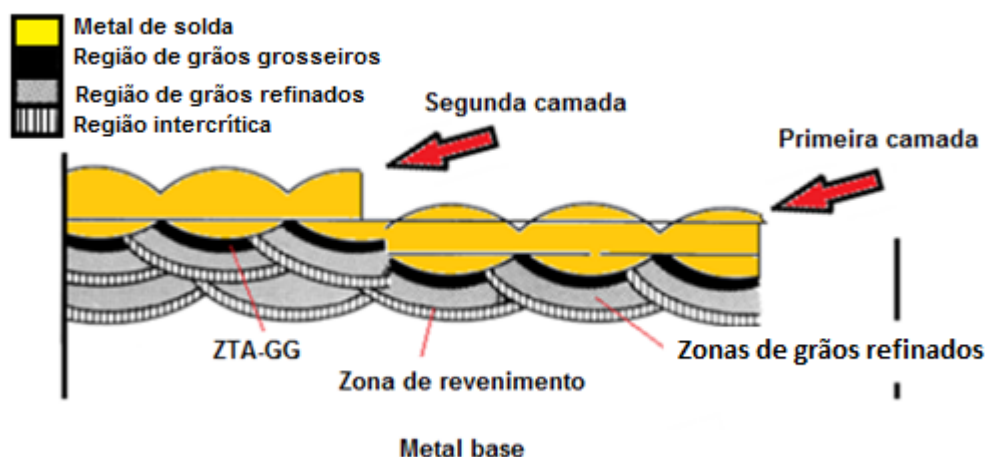


Figura 11 – Deposição de cordões de solda mostrando um procedimento de reparo de duas camadas (deposito da segunda camada (adaptado do ASM – Metals Handbook – vol. 6 – 1993 pag.209).

Usualmente recomenda-se utilizar razões de energia de 1,3 a 1,8 vezes maiores que o primeiro passe, cujo intuito é produzir o refino de grão e o revenimento da ZTA do passe anterior. Estas razões de energia devem ser selecionadas e estudadas para cada material. Este aumento de energia de soldagem de 30 a 70% para cada passe subsequente pode ser conseguido aumentando-se o diâmetro do eletrodo (WTIA, 2006).

Parte do MS e da ZTA são refundidos pela segunda camada de passes, o quanto, depende da energia utilizada e da disposição desta camada de passes, mas tipicamente o valor gira em torno de 50% (WTIA, 2006).

4.2 Aplicação do passe de revenimento

O tratamento do cordão de solda por passe de revenimento foi desenvolvido para eliminar a necessidade de novo TTAT e reduzir a dureza do MS e da ZTA, mas a tensão residual, obviamente permanece se o tratamento não for realizado. Há alegações de que as propriedades mecânicas da ZTA podem ser melhoradas semelhantemente às melhorias obtidas com tratamento térmico convencional. (WTIA, 2006).

A técnica do passe de revenimento tem sua aplicação aos aços ligas e são limitados para aqueles que podem sofrer a perda de tenacidade à fratura na ZTA,

como resultado da soldagem ou áreas que são afetadas pelo calor. Como tal, a técnica é geralmente limitada a aços resistentes à fluência contendo cromo (Cr), molibdênio (Mo) e vanádio (V). (WTIA, 2006).

Esta técnica de soldagem foi desenvolvida especificamente para refinar a microestrutura no metal pelo depósito criterioso de cordões de solda e do controle da energia da soldagem. Este tratamento térmico visa melhorar a tenacidade à fratura e reduzir a dureza elevada da ZTA; entretanto essa técnica não pode ser usada como um substituto para o TTAT em circunstâncias em que as condições operacionais exigem uma redução substancial nos níveis de tensão residual (WTIA, 2006).

A técnica do passe de revenimento foi utilizada por AZEVEDO (2002) que aplicou a técnica da dupla camada nos aços AISI 1045, onde alcançou os resultados de tenacidade semelhantes aos corpos de prova tratados termicamente após a soldagem, empregando várias relações de energia. Esta técnica também foi usada por NIÑO e BUSCHINELLI (1995) que aplicou a técnica de revenimento no reparo de aços 5Cr-0,5Mo utilizados em vasos de pressão para altas temperaturas ($> 500^{\circ}\text{C}$) e altas pressões 6,86 MPa de hidrogênio, onde comprova ter obtido com essa técnica uma melhora na tenacidade deste aço.

Além deles, AGUIAR (2001), aplicou a técnica em aços ABNT 4140, utilizados na fabricação de elementos de máquinas de alta resistência conseguindo melhoras na tenacidade da ZTA e por ARRAES JÚNIOR (2001) que aplicou a técnica nos aços ABNT 4340, também utilizados na fabricação de elementos de máquinas de alta resistência, em que obteve bons resultados de tenacidade utilizando-se uma relação de energia de 2:1

4.3 Princípios metalúrgicos do passe de revenimento

Para entender o que está ocorrendo na ZTA utilizando o passe de revenimento é necessário definir alguns termos, que estão relacionados na figura 12 da página 43, que mostra os pontos de transição para as várias partes desta ZTA correlacionados com o diagrama de equilíbrio de ferro-carbono (SPERKO, 2006).

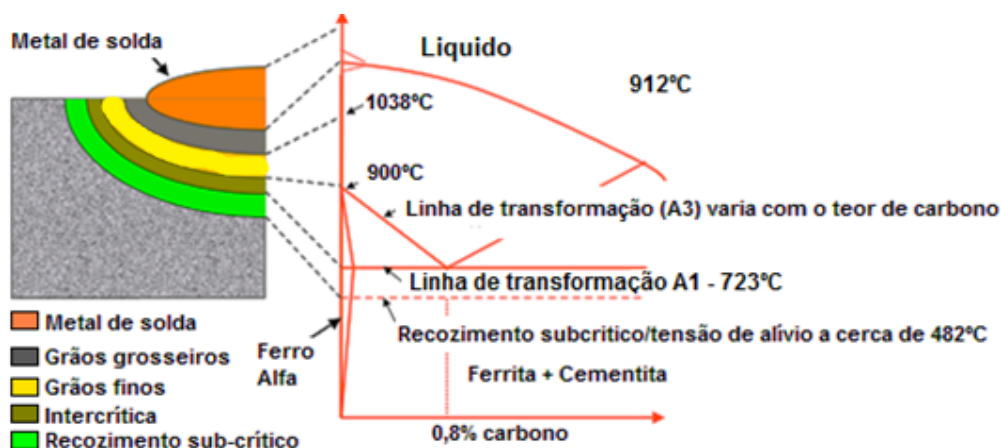


Figura 12 – Pontos da ZTA – pontos de transição para várias partes da ZTA relacionados com o diagrama de ferro-carbono – Exploring temper bead Welding. (Walter J. Sperko – Welding Journal – July – 2005 – pag. 37 to 40).

As linhas pontilhadas que ligam o diagrama de fases do ferro-carbono da esquerda para a direita indicam as faixas de temperatura que podem transformar essa ZTA dependendo das condições de resfriamento (extração de calor pelo metal base) (WTIA, 2006).

Durante a soldagem, pode se encontrar até quatro sub-regiões da ZTA formadas de acordo com a máxima temperatura alcançada e o tempo de duração desta temperatura. A formação destas sub-regiões é determinada pela transformação característica do aço (WTIA, 2006). A seguir estão relacionadas estas sub-regiões:

- Subcrítica: 482 - 727°C;
- Intercrítica: 727 - 900°C;
- Grãos finos: 900 - 1038°C;
- Grãos grosseiros > 1038 a 1496°C - líquido.

Observa-se ainda na figura 10 que a ZF, (região laranja), que está em uma faixa de temperatura acima da linha liquidus, (1038°C), ou seja, durante a soldagem, esta região está na fase líquida. Abaixo da ZF está a região de grãos grosseiros (região cinza), com uma temperatura entre 1038 a 1496°C.

Na região de grãos finos a temperatura da peça compreendida entre 900 a 1038°C (região amarela) apresenta-se durante a soldagem com 100% de austenita formada. A região intercrítica é compreendida na faixa de 723 e 900°C e a última região formada, denomina-se subcrítica, que está em uma temperatura que varia de 482 a 723°C

4.3.1 ZTA – zona termicamente afetada

Como pôde ser visto na figura 12 da página 43, pode haver até quatro sub-regiões da ZTA e que todos têm diferentes microestruturas.

Os principais fatores que determinam as mudanças de microestrutura para os aços são:

- Adição de elementos de liga no aço;
- Taxa de resfriamento;
- Energia de soldagem;
- Período de temperaturas elevadas.

A adição de elementos de liga no aço afeta mudança microestruturais, retardando a transformação da austenita em ferrita e perlita. Quanto mais elementos de liga, maior a possibilidade para formar martensita ou bainita na ZTA (WTIA, 2006).

A taxa de resfriamento tem um efeito similar. Quanto maior a taxa de resfriamento, maior a chance de evitar à transformação de ferrita/perlita e maior a chance de formar martensita indesejada (WTIA, 2006).

A energia de soldagem e o pré-aquecimento também influenciam na taxa de resfriamento e, portanto, na microestrutura da ZTA.

Deve ser feito um controle de temperatura, pois um resfriamento muito rápido pode levar a formação de martensita (WTIA, 2006).

4.3.2 TTPS – tratamento térmico pós soldagem

TTPS é o termo genérico para qualquer tratamento térmico realizado após a soldagem, incluindo: envelhecimento ou endurecimento por precipitação, o recozimento para a difusão do hidrogênio, a normalização e o alívio de tensões (recozimento subcrítico). As principais finalidades do TTPS são:

- a) Reduzir as tensões residuais e melhorar a resistência à fratura frágil, corrosão sob tensão ou em alguns casos, fadiga ou controlar a distorção na usinagem subsequente;
- b) atingir ou restaurar as propriedades dos materiais necessários para o projeto e condições do serviço.

A geração de tensões residuais de soldagem é uma característica intrínseca ao ciclo térmico, não sendo possível evitá-la, embora seja indesejada, pois está associada a diversos problemas metalúrgicos.

Dentre os vários tipos de TTPS, o mais utilizado para serviços executados em campo onde cada junta é tratada individualmente é denominado de alívio de tensões.

4.3.3 TTAT – tratamento térmico de alívio de tensões

Tratamento térmico de alívio de tensões (TTAT) ou recozimento subcrítico é um tratamento onde a solda é reaquecida a uma temperatura abaixo da temperatura de transição "A1", como mostrado na figura 12, da página 43.

Normalmente, o limite superior da temperatura para TTAT é 650°C para aços C-Mn e 740°C para aços Cr-Mo, para o aço ASTM A335 Gr P91 o limite estabelecido está entre 732°C a 744°C, como pode ser verificado na tabela 3, da página 33 (ASME B31.3 - 2012).

O TTAT tem como finalidade a redução das tensões residuais provenientes dos processos de fabricação ou adquiridas durante os serviços. As tensões residuais mais comuns são:

- Tensões residuais de soldagem;
- Tensões residuais de conformação mecânica (por encruamento e por deformação não uniforme);
- Tensões residuais de solidificação (componentes fundidos);
- Tensões de usinagem (operações de torneamento, fresagem ou retificação),

4.4 Técnicas de soldagem

Na soldagem da técnica de revenimento, o controle da energia de calor na soldagem (aporte térmico), o pré-aquecimento e a sequência de deposição do cordão de solda são estreitamente controlados para:

- a) Limitar o aporte térmico e o pré-aquecimento da primeira camada para evitar o crescimento de grãos na região grosseira da ZTA;
- b) Aumentar o aporte térmico de soldagem da segunda camada para promover o refino de grãos da ZTA dos primeiros passes;
- c) Sobrepor passes de forma regular para refinar o grão dos passes adjacentes.

Algumas técnicas do passe de revenimento na soldagem têm sido desenvolvidas nos últimos 20 anos: A técnica da meia camada, técnica da camada

alternada, técnica da camada consistente e a técnica de deposição controlada (KÜCHLER, 2009).

4.4.1 Técnica da meia camada

A técnica foi originalmente desenvolvida para uso na indústria nuclear, mas desde então se tornou amplamente utilizada para reparos em tubulações, vasos de pressão e de turbinas na usina convencional (WTIA, 2006).

A técnica é usada com a soldagem manual de eletrodo revestido (*shielded metal arc welding - SMAW*), utiliza uma série de eletrodos de diâmetros, começando com 2,5 mm, 3,2 mm e, em seguida, terminando com eletrodos de 3,2 mm ou 4,0 mm. O aumento no diâmetro dos eletrodos acrescenta um aumento na energia de soldagem do primeiro ao terceiro passe, o aporte térmico do primeiro até o terceiro passe. Os passos nesta técnica consistem em:

1 - A área a ser reparada é limpa e aquecida a uma temperatura compatível com o material e a espessura ($> 150^{\circ}\text{C}$), e em seguida é feito os passes de revenimento como pode ser observado na figura 13, utilizando eletrodos de 2,5 mm. A utilização de eletrodos de 2,5 mm visa produzir uma pequena ZTA (WTIA, 2006).

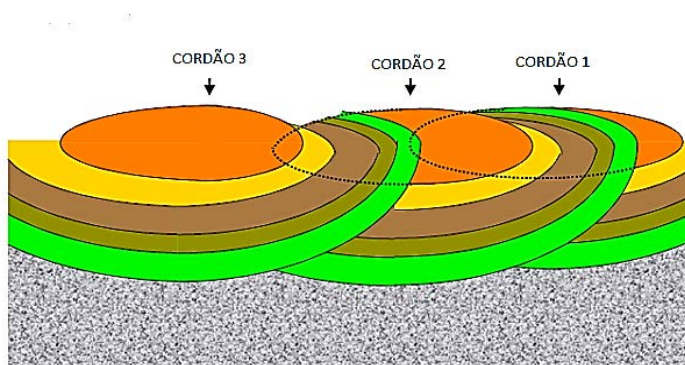


Figura 13 - Representação do efeito da sobreposição de cordões subsequentes na extensão da ZTA pelo cordão de solda depositado previamente. – Exploring temper bead Welding. (Walter J) - Sperko – Welding Journal – July – 2005.

Note que o cordão intermediário sobrepõe aproximadamente 50% a largura do cordão de solda da direita (cordão 1). O cordão da esquerda (cordão 3) sobrepõe o cordão intermediário (cordão 2) em aproximadamente 10%, resultando em um pequeno efeito na ZTA do cordão intermediário (SPERKO,2006).

2 - Logo em seguida utilizando um eletrodo com diâmetro de 3,2 mm, um segundo passe é aplicado sobre os passes depositados anteriormente de modo que

este cubra em aproximadamente a metade do passe executado conforme mostrado na figura 14.

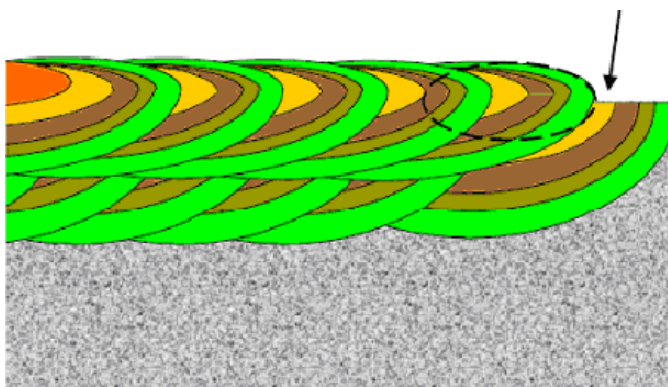


Figura 14 - Efeito da aplicação da segunda camada do metal de solda e na ZTA da primeira camada – Exploring temper bead Welding (Walter J. Sperko – Welding Journal – July – 2005).

A linha tracejada oval identifica o local do primeiro cordão de solda, a técnica para tratamento desta zona é mostrada na figura 13 da página 46.

A distância da margem da solda completa (linha vertical direita) até a margem da superfície tratada reforçando o cordão (linha vertical esquerda) mostrada na figura 15, precisa ser suficientemente pequena para que a ZTA do cordão reforçado trate toda a ZTA no metal base. A superfície tratada reforça o cordão de solda, podendo permanecer no lugar ou pode ser removida por esmerilhamento (SPERKO, 2005).

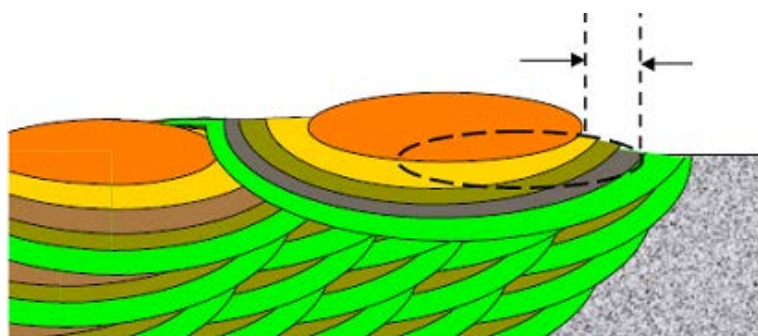


Figura 15 - Superfície revenida reforçando a deposição do cordão de solda – Exploring temper bead Welding (Walter J. Sperko – Welding Journal – July – 2005).

3 - O terceiro passe é depositado sobre a segunda camada, utilizando eletrodos com 3,2 mm. Isso efetivamente transforma o grão grosseiro da ZTA na primeira camada.

4 - As demais etapas são a deposição de camadas usando eletrodos com 4,0 mm. Cada camada subsequente transforma e trata a camada interior.

Uma quarta etapa é novamente executada sobre os passes anteriores e essa camada será removida por esmerilhamento.

4.4.2 Técnica da camada alternada

Esta técnica utiliza o processo TIG (*gás tungstênio arc Welding-GTAW*) e consiste em depositar com um pré-aquecimento de no mínimo 150°C pelo menos seis camadas de “amanteigamento” (passes de solda sobrepostos) com aporte de calor controlado, não podendo diferenciar mais do que 10% da energia utilizada na qualificação do procedimento. A camada de preenchimento é efetuada utilizando se um aporte térmico menor do que da última camada do passe de revenimento. Por fim, é realizado um tratamento térmico a baixas temperaturas (232-288°C) pelo tempo mínimo de 2 horas (VISWANATHAN, GANDY, FINDLAN, 1998).

O intuito da aplicação das diversas camadas é promover através das sobreposições dos perfis térmicos das camadas subsequentes uma microestrutura revenida, além disto, esta técnica se controlada atinge temperaturas acima de AC1 promovendo o refino de grão (KÜCHLER, 2009).

Embora em TTAT's convencionais a temperatura não ultrapasse AC1, não ocorrendo o refino de grão, ambas as técnicas são equivalentes em termos de propriedades (WTIA, 2006).

4.4.3 Técnica da camada consistente

Esta técnica, que pode ser aplicada tanto com o processo *ER* como com o *GTAW*, é semelhante à técnica da camada alternada. A diferença básica é o maior controle da energia de soldagem a fim de evitar uma nova transformação acima de AC1 e conseqüentemente o refino de grão. A técnica da camada consistente tem como objetivo somente obter uma microestrutura revenida, semelhante àquela obtida nos TTPS. O resultado é uma microestrutura com boa tenacidade, basicamente composta de martensita revenida e uma pequena porção de bainita superior (VISWANATHAN, GANDY, FINDLAN, 1998).

4.4.4 Técnica da deposição controlada

Esta técnica surgiu devido aos casos especiais em que a fragilização para a fluência e trincas por rea aquecimento podem ser um problema em potencial durante a soldagem de reparo. Esta técnica foi desenvolvida originalmente para a aplicação em plantas de processamento de derivados de fósseis e consiste em um controle

restrito na razão de energias de soldagem entre um passe e outro utilizando o processo *ER* (WTIA, 2006).

Na tabela 7, são apresentadas resumidamente as características de cada técnica do passe de revenimento.

Tabela 7 – Resumo e aplicação das diversas técnicas de passe de revenimento.

TÉCNICA	UTILIZAÇÃO	CARACTERÍSTICA E APLICAÇÃO	PROCESSO DE SOLDAGEM
MEIA CAMADA	Reparos em tubulações, Vasos de pressão e turbinas.	Cordões de solda se sobrepõem aproximadamente 50% do cordão anterior	SMAW
CAMADA ALTERNADA	Idem meia camada	Deposito dos passes de solda requer pré-aquecimento. Soldagem com baixa energia.	GTAW
CAMADA CONSISTENTE	Idem meia camada	Semelhante à camada alternada. Obtenção de microestrutura revenida	SMAW e/ou GTAW
CAMADA CONTROLADA	Casos especiais em que a fragilidade para a fluência e trincas por rea aquecimento	Refino do grão e revenimento da ZTA	SMAW

Apesar do avanço da técnica do passe de revenimento (dupla camada), ainda existem dificuldades na escolha dos critérios adequados para a realização da soldagem e falta de dados sobre o desempenho em serviço dos componentes reparados (SPERKO,2005).

5 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Nesta seção será apresentada a forma de obtenção dos corpos de prova bem como os tratamentos e ensaios realizados.

Para este estudo será utilizado um tubo de aço ASTM A335 Gr P91 que foi preparado em duas partes, sendo que em cada extremidade da peça foi preparada de forma angular um bisel, segundo a definição na norma AWS A3.0 – 2010, com um ângulo de 45 graus, a serem unidas e posteriormente soldada. A figura 16(a), mostra a preparação da peça de teste e a figura 16(b), a representação gráfica da peça soldada.

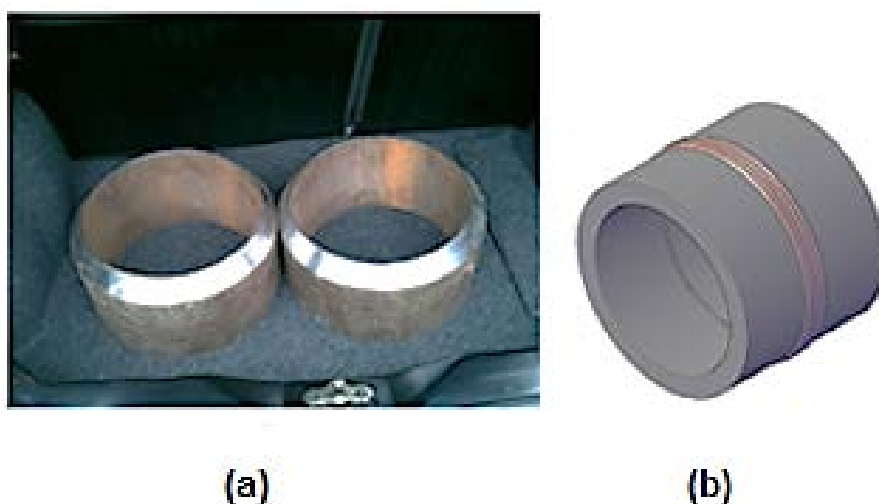


Figura 16 – Peça do aço ASTM A 335 Gr P91 preparada para soldagem.

Para a soldagem serão utilizados os processos TIG (*gás tungsten arc welding* - GTAW) e arame tubular (AT) (*gás metal arc welding* – GMAW), cujos parâmetros estão definidos na especificação de procedimento de soldagem (EPS) encontrados na tabela do apêndice A da página 101.

Após a soldagem da peça de teste será feita uma radiografia da junta a fim de verificar a qualidade da solda realizada. Posteriormente a execução do ensaio radiográfico a junta será submetida a um TTAT.

Após a conclusão dessa etapa, a peça de teste será dividida em quatro partes em forma de arco circular, como mostrada na figura 17 da página 51, cada uma denominada de “meia cana” para a realização dos ensaios.

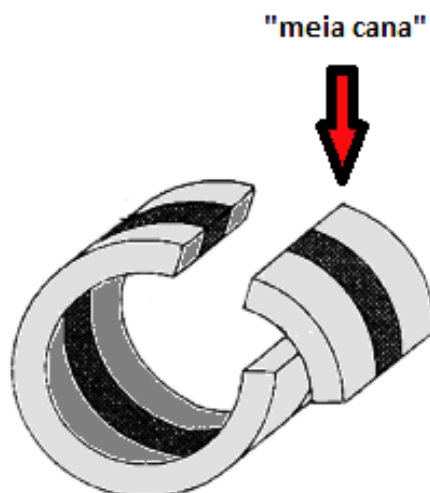


Figura 17 – “Meia cana” de tubo. (ASTM A 335 Gr P91)

De uma das “meias cana” serão removidos quatro corpos de prova (CP), sendo um para avaliação da dureza e os outros três para avaliação da microestrutura formada.

Em outra meia cana, serão depositados passes de soldas utilizando o processo com eletrodo revestido (ER) (*shielded metal arc welding – SMAW*), simulando a aplicação da técnica do passe de revenimento, como pode ser observado na figura 18. No item (a) desta figura é possível observar a técnica de revenimento executada sobre o metal base (MB) com camadas sobrepostas e ao lado, item (b), observa-se a junta soldada.

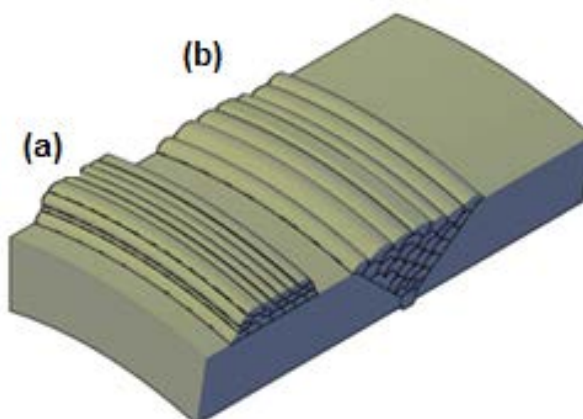


Figura 18 - Aplicação da técnica do passe de revenimento em camadas sobreposta (a) e deposição de solda na junta chanfrada (b) para mapeamento com ensaio de dureza vickers.

As dimensões da junta a ser soldada podem ser verificadas na figura 19 da página 52. Nesta figura, além da junta a ser soldada, é possível observar a solda do

passo de revenimento. A altura “x” da solda do passo de revenimento será obtida com, no mínimo, três camadas de solda.

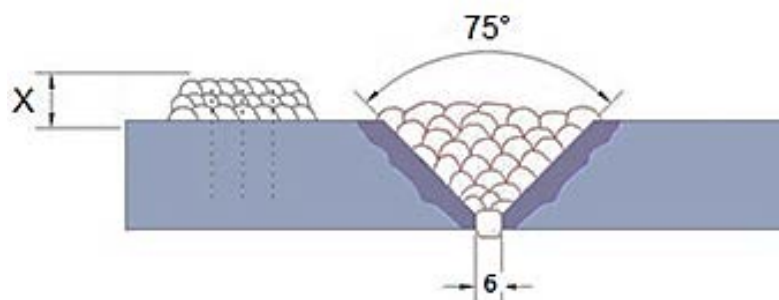


Figura 19 – Dimensões da junta e altura da camada do passo de revenimento

Será utilizada a técnica da meia camada na aplicação do passo de solda de revenimento e no reparo da junta soldada.

Após a conclusão das camadas de revenimento, será medida a dureza e realizada a análise metalográfica para verificar se estas possuem as mesmas características da solda original.

Na terceira “meia cana” será simulado um defeito com 12 mm de profundidade (a partir da superfície externa do tubo), onde posteriormente será feita a “recuperação”, com a aplicação da técnica do passo de revenimento.

A seguir estão descritas as etapas para a recuperação e reparo do defeito

1 – Na solda executada da peça de teste (27 mm de espessura) será preparado um chanfro por esmerilhamento, simulando a abertura de um reparo detectado com as seguintes dimensões: 12 mm de profundidade e 100 mm comprimento, conforme mostrado na figura 20.

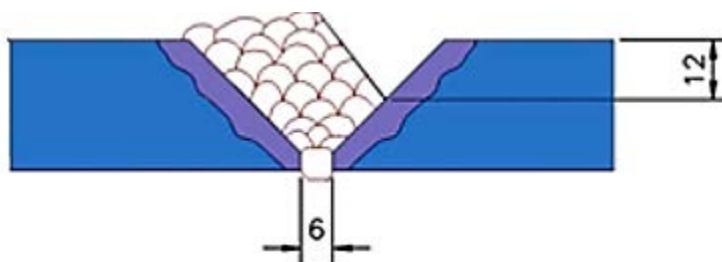


Figura 20 – Preparação da junta após remoção do defeito simulado.

2 – Após a remoção do defeito será executada a soldagem utilizando a técnica do passo de revenimento, como pode ser visto na figura 21 da página 53. Observa-se que para o reparo serão utilizados os mesmos parâmetros do apêndice A da página 101.

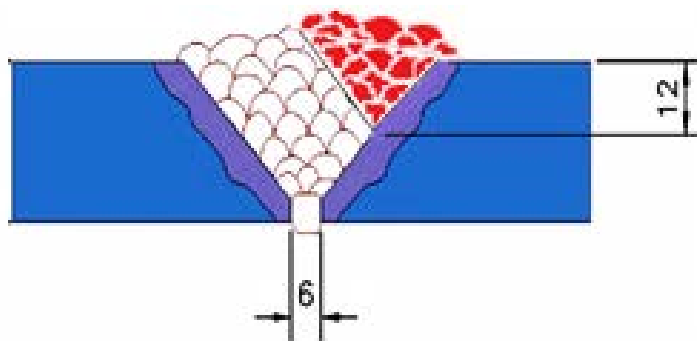


Figura 21 – Execução da soldagem aplicando a técnica da meia camada.

3 – Concluída essa etapa da soldagem, a última camada de solda será removida por esmerilhamento, como pode ser visto na figura 22.

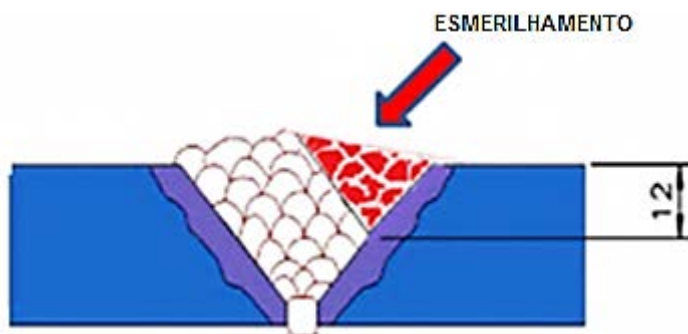


Figura 22 – Junta soldada com a remoção da última camada de solda.

Com a conclusão dessa etapa do reparo, novamente será executado ensaio metalográfico, em todos os corpos de prova, a fim de verificar se houve mudança na microestrutura do material.

A quarta “meia cana” não será utilizada.

5.1 Confecção da peça de teste

Foi confeccionada uma peça de teste, apresentada na figura 23 da página 54, e dela foram retiradas quatro corpos de prova conforme será descrito no item 5.3, que inicia na página 59. O corpo de prova foi executado de acordo com a norma ASME B31.3 – 2012.

O tubo para construção da peça de teste é feito de aço ASTM A335 Gr P91 com um diâmetro externo de 324 mm e 27 mm de espessura de parede.

A figura 23(a) da página 54 mostra um croqui da peça e a figura 22(b) o tubo com o passe de raiz executado.

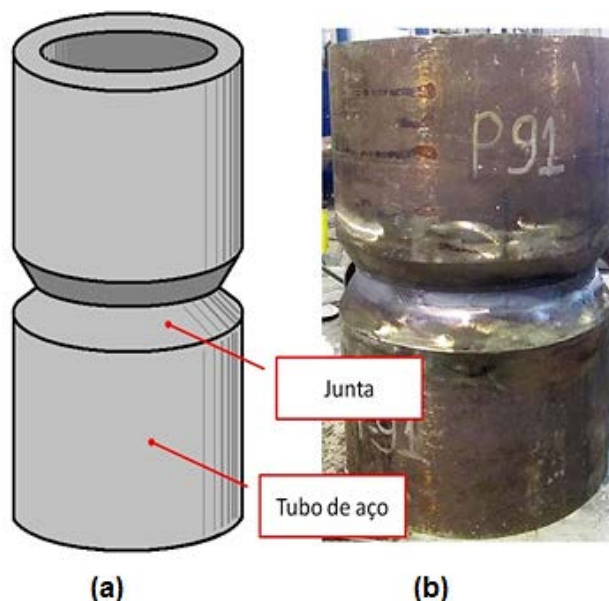


Figura 23 – Peça de teste do aço ASTM A335 Gr P91.

A composição química do aço ASTM A335 Gr P91 é apresentada na tabela 8, com os dados extraídos da norma ASTM A335 - 2011. Nesta tabela também é possível encontrar a composição química dos consumíveis utilizados em todo o processo, extraídos do catálogo dos fabricantes.

Tabela 8 – Composição química do metal de base e consumível de soldagem.

MATERIAL	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Nb	Mo	OUTROS
A335 Gr P91	0,08	0,3	0,002.	0,01.	0,20 0,50.	8,0 9,5	-	-	0,85	V-0,18 0,25
E9015-B9	0,10.	1,0.	-	-	0,25	9,0.	0,80.	0,08	1,0.	V-0,25
Arame Tubular (E90C-B9)	0,10 0,13	0,60 1,20.	0,020.	0,015.	0,50.	8,0 10,0.	0,07.	0,07	0,85 1,20.	V-0,18 0,25
TIG (ER90S-B9)	0,10.	0,50.	-	-	0,30	9,0	0,70.	0,06.	1,0.	V-0,20.

Gás – Star Plus – White Martins.

Fonte – Catálogo de consumíveis da BOEHLER, KESTRA e ASTM A335 - 2011.

Para os dados da composição química da vareta TIG e do AT, foi consultado o catálogo da BOEHLER e do eletrodo revestido foi consultado o catálogo da KESTRA. A soldagem da peça de teste foi executada pelo processo AT/TIG utilizando o consumível MTS-3-MC (marca BOEHLER). Para os passes de revenimento, a soldagem foi feita com eletrodo revestido E9015 B9 (marca KESTRA). Os consumíveis da soldagem da peça e do passe de revenimento foram escolhidos por apresentarem composições químicas semelhantes ao do metal base. Isso pode ser constatado na observação da tabela 8 e atende as recomendações do ASME IX, 2011.

5.2 Soldagem, controle radiografico e tratamento térmico da peça de teste

As dimensões de preparação para a soldagem da peça de teste estão mostradas na figura 24. O ângulo do chanfro para a execução da soldagem ficou igual a 90° . Com relação à figura 19 da página 52, percebe-se que este ângulo do chanfro teve sua dimensão aumentada em 15 graus.

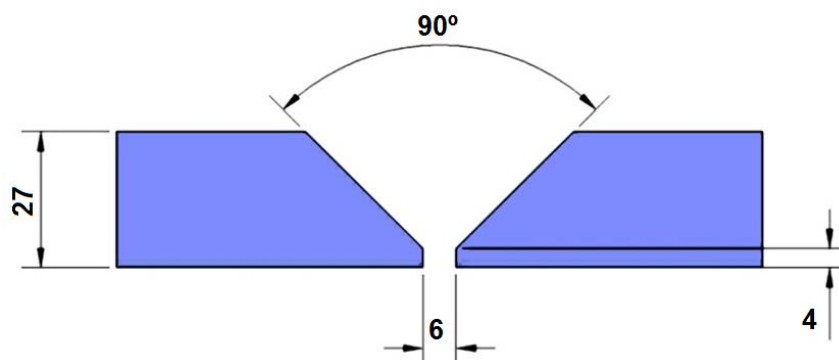


Figura 24 - Dimensões da peça de teste preparada para a execução de soldagem.

De toda espessura foi deixada uma preparação de 4 mm e foi executado um chanfro com 23 mm de altura.

Para a soldagem da peça de teste foi realizada uma etapa de pré-aquecimento, executada por meio de um maçarico tipo chuveiro como pode ser observado na figura 24, à temperatura de pré-aquecimento foi igual a 250°C .

Observe-se ainda na figura 25, na extremidade do tubo, que foi aplicada uma manta refratária para evitar a perda de calor durante a etapa de pré-aquecimento.

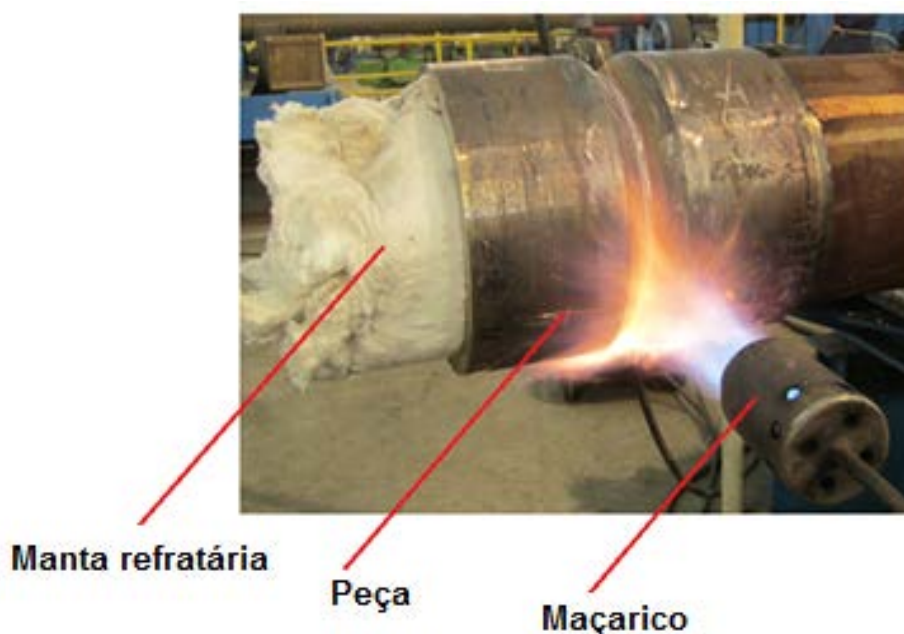


Figura 25 – Pré-aquecimento da peça de teste.

Após o pré-aquecimento foi executada a soldagem. A figura 26 mostra a soldagem em execução.

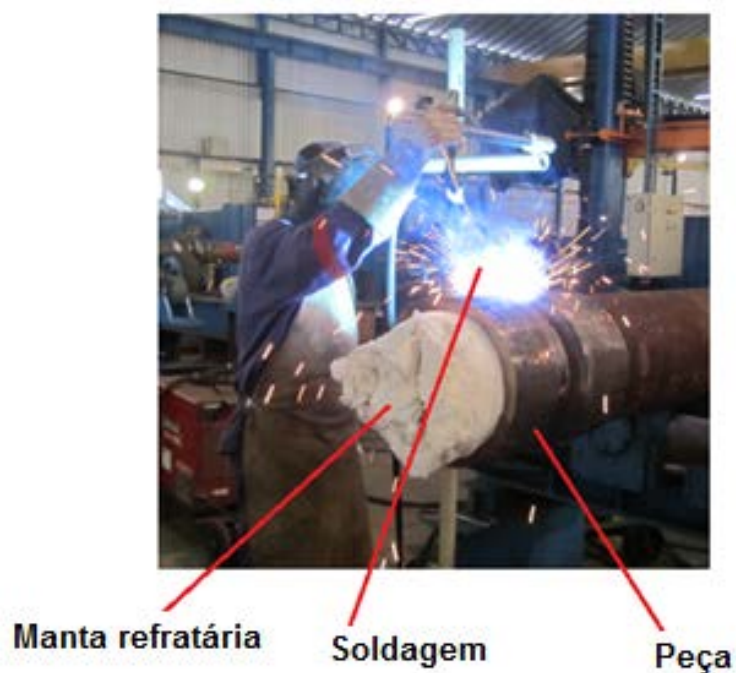


Figura 26 – Soldagem da peça de teste pelo processo AT/TIG.

A sequência de soldagem foi executada conforme pode ser visualizada na figura 27.

Cada cordão possui uma dimensão de $8,5 \pm 1,5$ mm. Foram feitos 51 cordões distribuídos em 9 camadas.

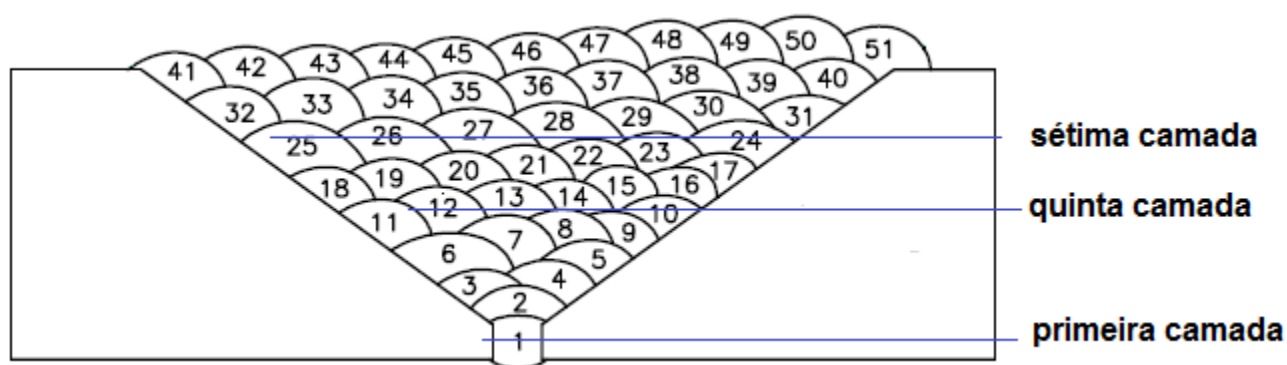


Figura 27 - Sequência da soldagem e distribuição das camadas de solda.

A velocidade de deposição dos cordões variou em função da camada executada. Para os cordões pertencentes entre a camada 1 e a camada 4 a velocidade ficou em torno de 500 mm/min. Para os cordões das demais camadas, próximo a 300 mm/min. Esta variação de velocidade é em função do processo.

Com este modo de operação a temperatura do MB próxima a região da solda, ficou em torno de 300°C.

O detalhamento dos parâmetros de soldagem pode ser encontrado no apêndice A da página 101.

Incluindo o pré-aquecimento, o tempo gasto para a realização dessa soldagem foi de 8 horas de serviço contínuo.

Como explicitado no item 2.3.3, da página 29, após a aplicação da solda, foi executado, em um período de uma hora, um pós-aquecimento da peça de teste a uma temperatura de 300°C. A figura 28 mostra o pós-aquecimento sendo executado.

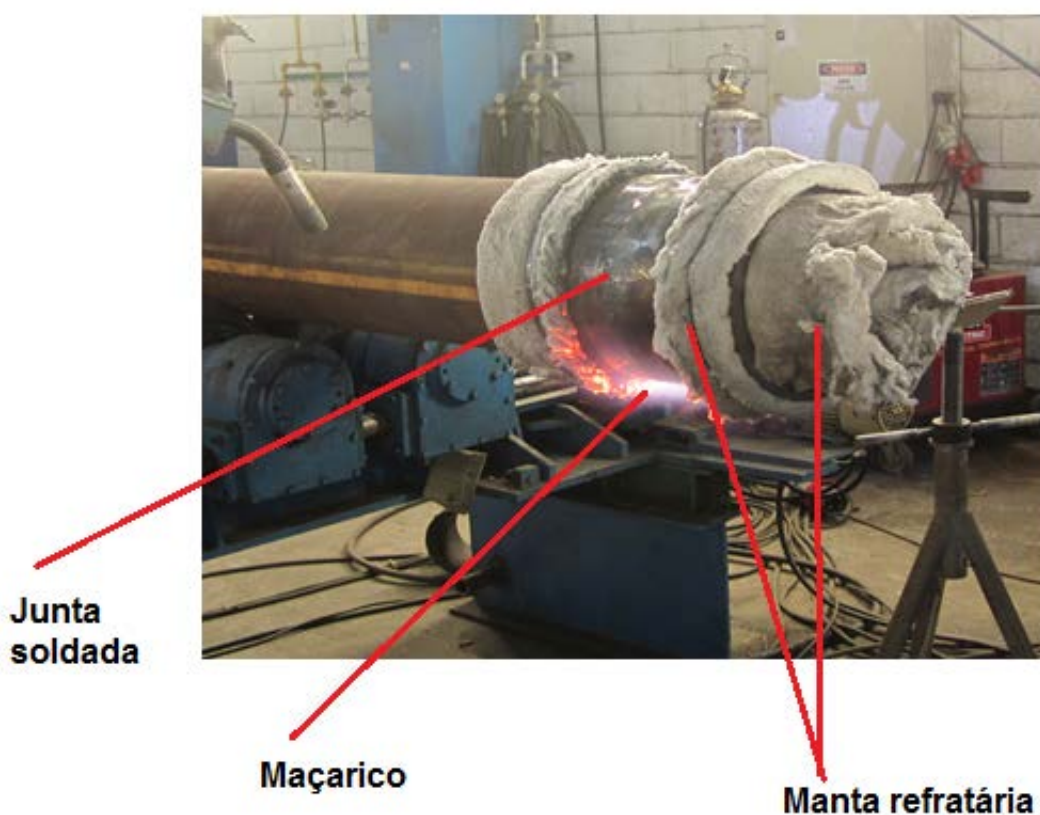


Figura 28 – Conclusão da soldagem da peça de teste e pós-aquecimento.

Para o controle de temperatura do pós-aquecimento, foi utilizado lápis térmico. Esta medição de temperatura foi efetuada pelo mesmo lado de aplicação de calor na região soldada.

Terminado o pós-aquecimento, a junta foi recoberta com manta refratária até o resfriamento a temperatura ambiente.

Antes da realização do TTAT, a junta soldada foi submetida a um ensaio radiográfico para comprovação da integridade da solda e se a mesma estava isenta de defeitos.

Para a verificação da presença, ou não, de defeito oriundo da operação de soldagem foi usado um penetrâmetro de fio de arame semelhante ao da figura 6(b), da página 31.

É possível notar na figura 29, que os fios de arame do penetrâmetro são totalmente visíveis. Observa-se ainda que não existem pontos de descontinuidade na radiografia, indicando que não existem defeitos de soldagem.

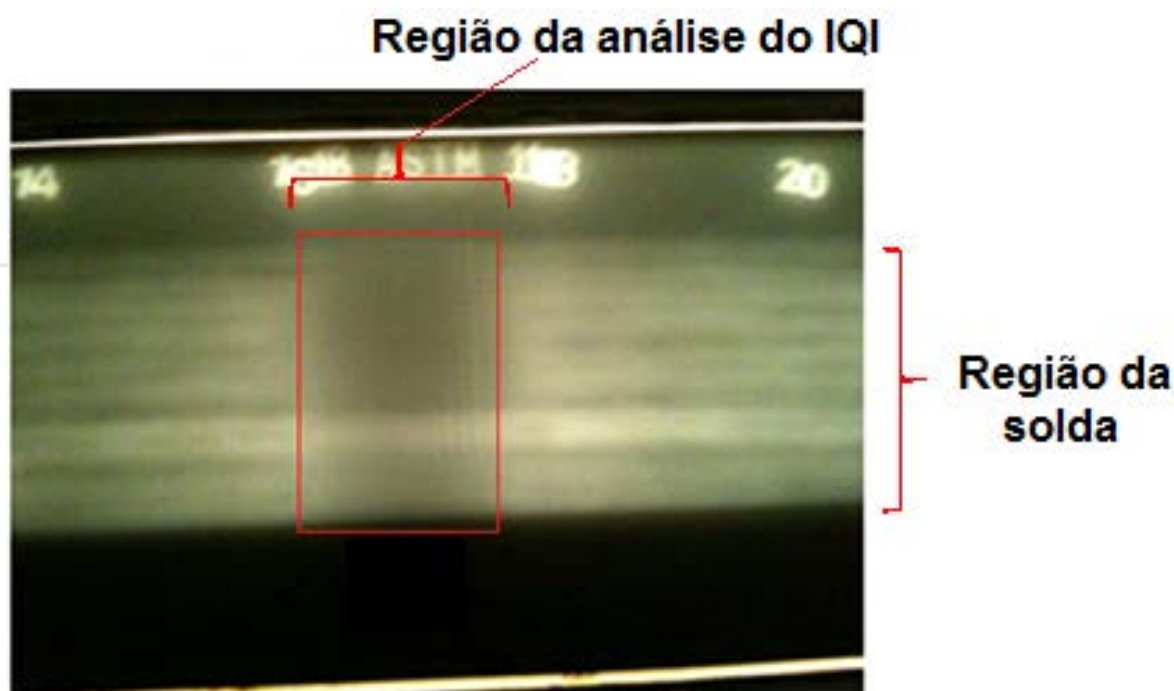


Figura 29 - Imagem radiográfica da peça de teste – Identificação do IQI – fios de arame que identificam a qualidade da imagem radiográfica.

Após o controle radiográfico foi realizado TTAT conforme as recomendações do código ASME B31. 3 - 2012, cujos parâmetros estão mostrados na tabela 9.

Tabela 9 – Parâmetros para TTAT do aço ASTM A335 Gr P91.

METAL BASE	ANÁLISE DO METAL DE SOLDA A-Nº	GRUPO DO METAL BASE	ESPESSURA NOMINAL DA PAREDE (mm)	TENSÃO MÍNIMA DE RESISTÊNCIA, METAL BASE (MPa)	FAIXA DE TEMPERATURA (°C)	ESPESSURA NOMINAL DA PAREDE (mm/min)	TEMPO MÍNIMO, h	DUREZA BRINEL (HB), MAX.
15E	5	AÇOS LIGAS 9Cr-1Mo-V	TODAS	TODAS	732-774	2,4	2	250

Fonte: ASME B31.3 – 2012. – com adaptações.

O ciclo térmico que foi usado para O TTAT possui uma velocidade de aquecimento de 80°C/h, manutenção na temperatura final de tratamento, que foi de 720°C, por 6,5 h e posterior resfriamento ao ar.

O gráfico da figura 30 apresenta o ciclo térmico do tratamento. Neste gráfico é possível observar as três fases deste ciclo.



Figura 30 - Gráfico de TTPS – modelo reduzido – gráfico real de TTPS.

No gráfico é possível observar que o tempo para o aquecimento foi de 5 horas para atingir o patamar de tratamento e que o tempo para o resfriamento até a temperatura final de controle (300°C), foi de 11 horas com uma taxa de resfriamento igual a 50°C/h .

Sendo assim, o tempo total deste tratamento foi de aproximadamente 22 horas do início do aquecimento ao final do resfriamento.

O relatório de TTAT está mostrado no apêndice C da página 103.

5.3 Obtenção dos corpos de prova

Da peça de teste foram retirados quatro parte de meia cana de tubo, como mostra a figura 31, obtendo-se assim quatro corpos de prova. Esta figura é semelhante à figura 17 da página 51.

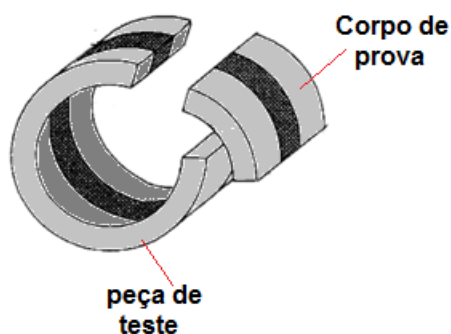


Figura 31 – Localização da remoção do corpo de prova.

A figura 32(a) mostra três corpos de prova obtidos e a figura 32(b) é uma representação gráfica de um corpo de prova onde é destacado o MB, o MS e a ZTA.

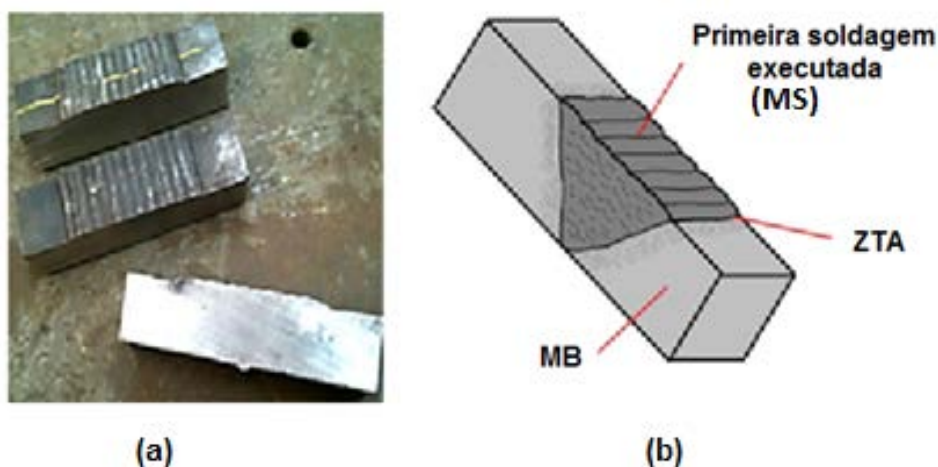


Figura 32 – Corpo de prova obtido da peça de teste.

Os corpos de provas foram encaminhados para análise metalográfica e posterior controle de dureza.

5.4 Análise metalográfica

Para a análise metalográfica e a verificação das estruturas formadas em cada região, os corpos de prova foram preparados de acordo com a NBR 11094, 1990. Esta preparação consiste em lixamento com a sequência de lixas: 60, 180, 240, 320, 400 e 600 seguido de um polimento com pasta de diamante.

5.5 Simulação da técnica do passe de revenimento

Na segunda peça de teste, na região (A), no sentido indicado pela seta, como mostra a figura 33(a) da página 61, foram depositados os cordões de solda simulando a técnica do passe de revenimento, na região (B), é mostrado o local de obtenção da amostra, figura 33(b), para execução da medição de dureza.

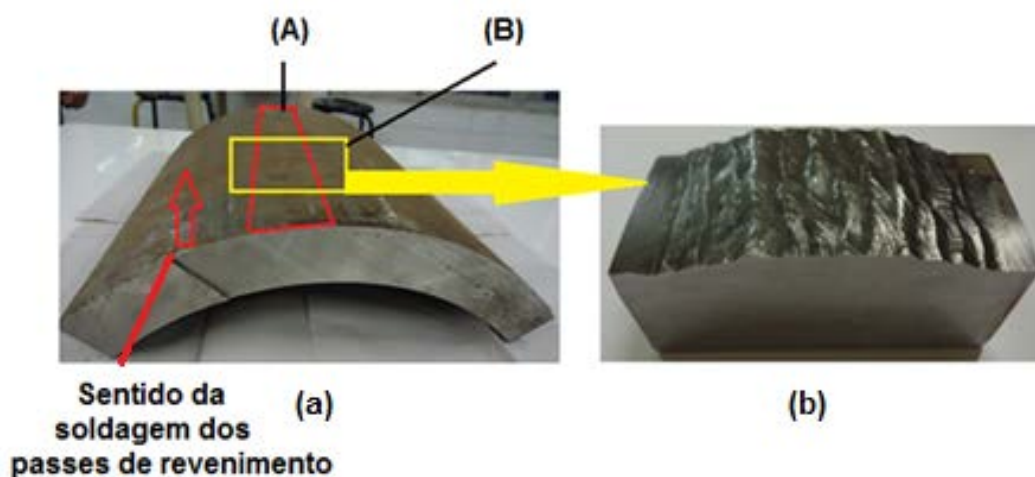


Figura 33 – Sentido da soldagem dos passes de revenimento.

Foi aplicado nesta região, um pré-aquecimento de 200°C para início da soldagem.

A figura 34(a) mostra a representação gráfica do passe de revenimento aplicado e a figura 34(b) a soldagem executada, onde pode ser observada a sequência de passes depositados.

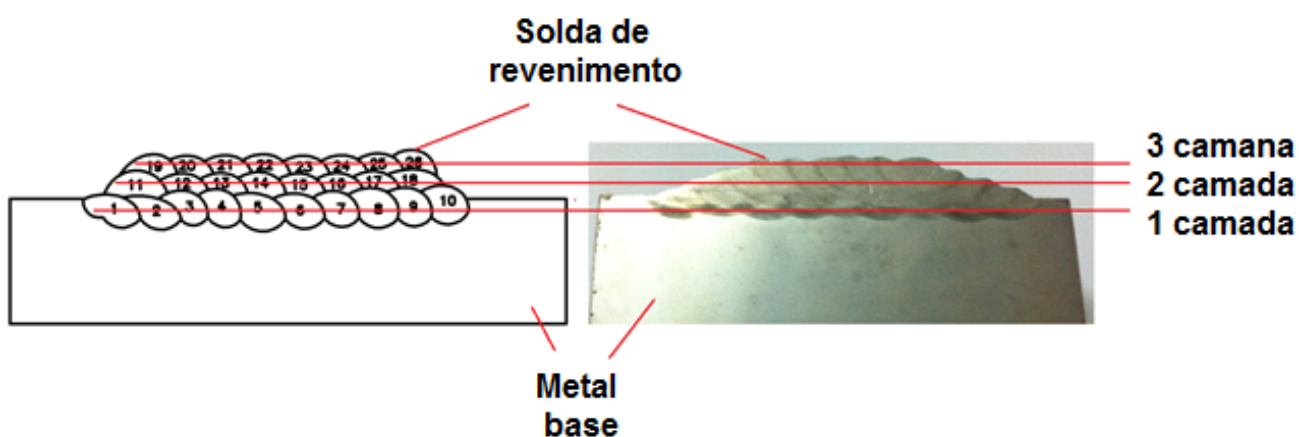


Figura 34 - Soldagem com passe de revenimento – corpo de prova.

Para a soldagem dos passes de revenimento foi utilizado o processo de soldagem com eletrodo revestido de diâmetro de 3,2 mm da marca KESTRA, de acordo com o escrito na página 54.

Os parâmetros utilizados nesta etapa estão registrados na tabela 10 da página 62.

Tabela 10 – Parâmetros de soldagem utilizados para realização do passe de revenimento.

PROCESSO	PASSE Nº	CAMADA Nº	CONSUMÍVEL CLASSE	DIÂMETRO (mm)	TENSÃO (V)	CORRENTE (A)	VELOCIDADE (mm/min)	HEAT INPUT (J/mm)	TEMP. °C	LARGURA PASSE DE SOLDA (mm)
SMAW	1	1	E9015 B9	3,25	26	155	86,70	2.789,01	262	9
SMAW	2	1	E9015 B9	3,25	25	153	455,49	503,86	271	8
SMAW	3	1	E9015 B9	3,25	27	162	500,29	524,58	285	8
SMAW	4	1	E9015 B9	3,25	26	160	492,22	507,09	288	7
SMAW	5	1	E9015 B9	3,25	26	165	504,42	510,29	291	7
SMAW	6	1	E9015 B9	3,25	26	163	500,29	508,27	293	7
SMAW	7	1	E9015 B9	3,25	27	163	496,22	532,14	295	7
SMAW	8	1	E9015 B9	3,25	26	161	504,42	497,92	290	8
SMAW	9	1	E9015 B9	3,25	27	163	303,66	869,60	290	6
SMAW	10	1	E9015 B9	3,25	28	165	338,71	818,41	291	8
SMAW	11	2	E9015 B9	3,25	28	167	302,15	928,53	298	6
SMAW	12	2	E9015 B9	3,25	28	167	303,66	923,94	299	8
SMAW	13	2	E9015 B9	3,25	26	165	303,66	847,67	300	6
SMAW	14	2	E9015 B9	3,25	27	166	303,66	885,61	310	8
SMAW	15	2	E9015 B9	3,25	27	166	303,66	885,61	311	8
SMAW	16	2	E9015 B9	3,25	26	165	303,66	847,67	310	7
SMAW	17	2	E9015 B9	3,25	28	163	303,66	901,81	310	7
SMAW	18	2	E9015 B9	3,25	27	167	303,66	890,94	312	8
SMAW	19	3	E9015 B9	3,25	26	166	303,66	852,81	315	7
SMAW	20	3	E9015 B9	3,25	26	167	303,66	857,94	315	8
SMAW	21	3	E9015 B9	3,25	28	168	303,66	929,47	280	7
SMAW	22	3	E9015 B9	3,25	23	167	303,66	758,95	282	8
SMAW	23	3	E9015 B9	3,25	24	136	303,66	644,94	292	9
SMAW	24	3	E9015 B9	3,25	23	135	303,66	613,52	301	6
SMAW	25	3	E9015 B9	3,25	24	138	303,66	654,42	310	8
SMAW	26	3	E9015 B9	3,25	24	139	303,66	659,17	312	7

Observa-se na tabela 10 que foram feitos 26 cordões com dimensão média de 8 mm.

A velocidade média de deposição dos cordões foi de 440 mm/min para os cordões de 1 a 8 e 303 mm/min para os demais. Esta variação de velocidade ocorreu em função do processo. Com este modo de operação a temperatura do MB próxima à região da solda, ficou em torno de 300°C.

Incluindo o pré-aquecimento, o tempo gasto para a realização dessa soldagem foi de 2 horas de serviço contínuo.

Como explicitado no item 2.3.3, da página 29, também após a conclusão da solda de revenimento, foi executado, em um período de uma hora, um pós-aquecimento da peça de teste com uma temperatura de 300°C.

5.6 Corpo de prova do reparo

No terceiro corpo de prova, em uma dimensão de 30 mm de largura por 100 mm de comprimento, mostrado na figura 35(a) da página 63, foi preparado um chanfro com 12 mm de profundidade, figura 35(b) e na figura 35(c) é mostrada a região do reparo concluída.

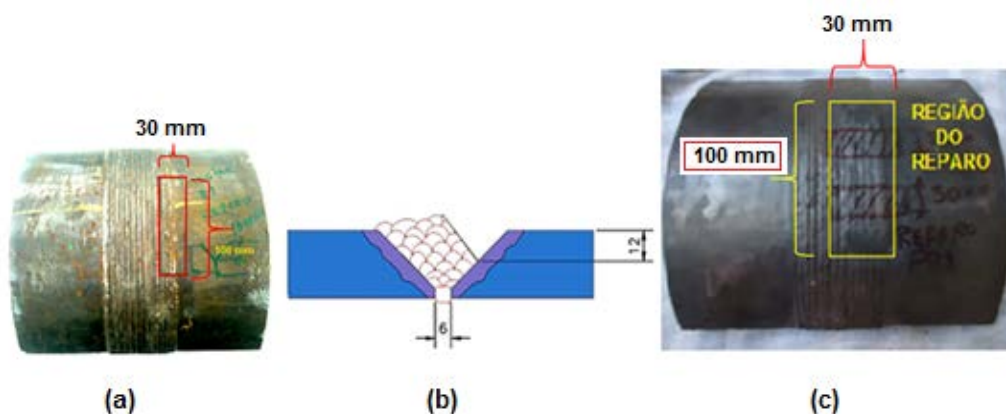


Figura 35 - Dimensões do corpo de prova e reparo executado.

Na execução da soldagem deste reparo, foram utilizados os mesmo parâmetros dos passes descritos na tabela 10 da página 62. Neste reparo foi utilizado eletrodo revestido de diâmetro de 3,2 mm da marca KESTRA.

Na soldagem do reparo como dito anteriormente, o pré-aquecimento aplicado foi de 150°C e a temperatura de interpasse permaneceu em uma faixa de 250°C a 312°C. A figura 36 mostra a primeira camada de revenimento depositada.

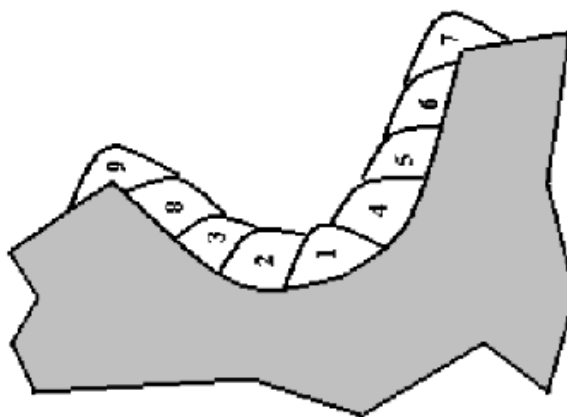


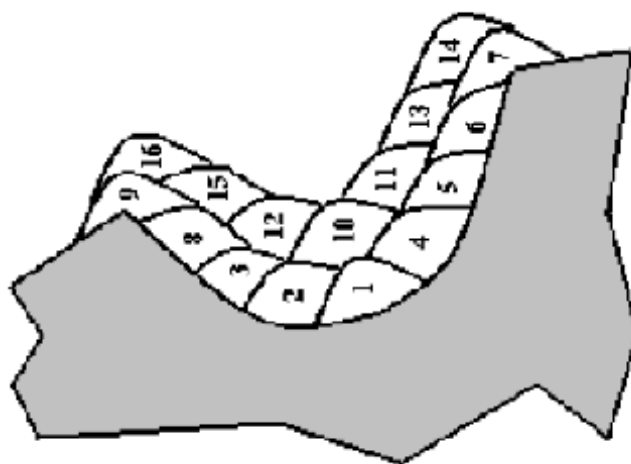
Figura 36 – Execução da primeira camada de revenimento.

Na tabela 11 da página 64, observa-se que a largura média do passe de solda da primeira camada foi de 6 mm com uma velocidade constante de soldagem de 874 mm/min. A temperatura de interpasse variou entre 265°C a 305°C.

Tabela 11 – Parâmetros de soldagem com passe de revenimento – primeira camada.

PROCESSO	PASSE N°	CAMADA N°	CONSUMÍVEL CLASSE	DIÂMETRO (mm)	TENSÃO (V)	CORRENTE (A)	VELOCIDADE (mm/min)	HEAT INPUT (J/mm)	TEMP. °C	LARGURA PASSE DE SOLDA
SMAW	1	1	E9015 B9	3,25	25	127	873,92	217,98	265	6
	2		E9015 B9	3,25	25	127	873,92	217,98	280	5
	3		E9015 B9	3,25	25	127	873,92	217,98	281	6
	4		E9015 B9	3,25	25	127	873,92	217,98	292	5
	5		E9015 B9	3,25	25	127	873,92	217,98	300	7
	6		E9015 B9	3,25	25	127	873,92	217,98	300	5
	7		E9015 B9	3,25	25	127	873,92	217,98	305	6
	8		E9015 B9	3,25	25	127	873,92	217,98	305	6
	9		E9015 B9	3,25	25	127	873,92	217,98	305	7

Concluída essa soldagem, efetuou-se a limpeza dos cordões depositados e em seguida foram depositados os passes da segunda camada de revenimento, conforme mostrada na figura 37.

**Figura 37** – Execução da segunda camada de revenimento.

Na tabela 12, observa-se que a largura do passe de solda teve um aumento, variando entre 6 a 8 mm, a velocidade de soldagem foi de 221 mm/min.

Tabela 12 – Parâmetros de soldagem com passe de revenimento – segunda camada.

PROCESSO	PASSE N°	CAMADA N°	CONSUMÍVEL CLASSE	DIÂMETRO (mm)	TENSÃO (V)	CORRENTE (A)	VELOCIDADE (mm/min)	HEAT INPUT (J/mm)	TEMP. °C	LARGURA PASSE DE SOLDA (mm)
SMAW	10	2	E9015 B9	3,25	26	129	206,20	975,95	295	8
	11		E9015 B9	3,25	24	123	221,93	798,09	250	8
	12		E9015 B9	3,25	24	123	221,93	798,09	265	7
	13		E9015 B9	3,25	24	123	221,93	798,09	288	7
	14		E9015 B9	3,25	24	123	221,93	798,09	290	6
	15		E9015 B9	3,25	24	123	221,93	798,09	292	8
	16		E9015 B9	3,25	24	123	221,93	798,09	295	7

Na figura 38 da página 65 são mostrados os cordões da terceira e quarta camada, os parâmetros utilizados estão demonstrados na tabela 13 da página 65.

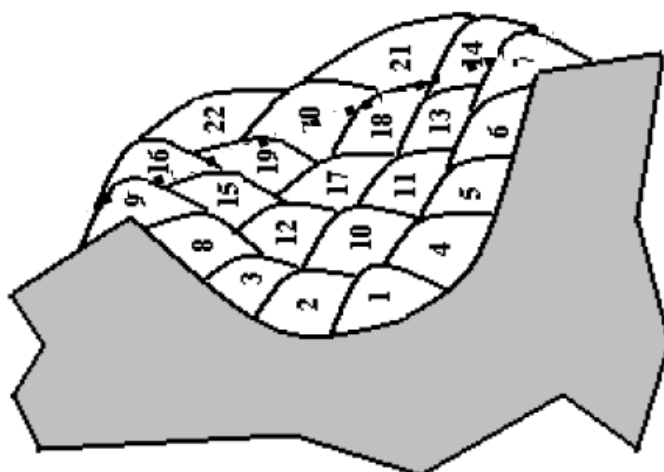


Figura 38 – Execução da terceira e quarta camada de revenimento.

Na tabela 13, observa-se que a largura do passe de solda depositado variou entre 5 a 8 mm, a velocidade de soldagem nos passes 17 e 18 foi de 242 mm/min, nos passes de 19 a 25 ficou em 200 mm/min e nos passes de acabamento a velocidade foi 220 mm/min.

Tabela 13 – Parâmetros de soldagem com passe de revenimento – terceira e quarta camada.

PROCESSO	PASSE Nº	CAMADA Nº	CONSUMÍVEL CLASSE	DIÂMETRO (mm)	TENSÃO (V)	CORRENTE (A)	VELOCIDADE (mm/min)	HEAT INPUT (J/mm)	TEMP. °C	LARGURA PASSE DE SOLDA (mm)
SMAW	17	3	E9015 B9	3,25	24	125	242,20	743,19	310	7
	18		E9015 B9	3,25	24	125	242,20	743,19	312	7
	19		E9015 B9	3,25	24	125	200,77	896,55	315	8
	20		E9015 B9	3,25	24	125	200,77	896,55	310	5
	21		E9015 B9	3,25	24	125	200,77	896,55	280	7
	22	4	E9015 B9	3,25	24	125	200,77	896,55	282	8
	23		E9015 B9	3,25	24	125	200,77	896,55	292	6
	24		E9015 B9	3,25	24	125	200,77	896,55	301	8
	25		E9015 B9	3,25	24	125	200,77	896,55	310	7
	26		E9015 B9	3,25	24	125	217,98	825,76	312	5
	27		E9015 B9	3,25	24	125	217,98	825,76	290	6
	28		E9015 B9	3,25	24	125	217,98	825,76	292	8
	29		E9015 B9	3,25	24	125	217,98	825,76	295	7
	30		E9015 B9	3,25	24	125	217,98	825,76	296	8
	31		E9015 B9	3,25	24	125	217,98	825,76	298	6

6 RESULTADOS

6.1 Ensaio de dureza dos corpos de prova da solda original

Para a análise da dureza foi tomado um dos corpos de prova. Neste corpo de prova foram feitas 85 marcações que constituíram uma malha com aproximadamente 5 mm de aresta horizontal e 2,5 mm de aresta vertical. Estas marcações podem ser observadas na figura 39.

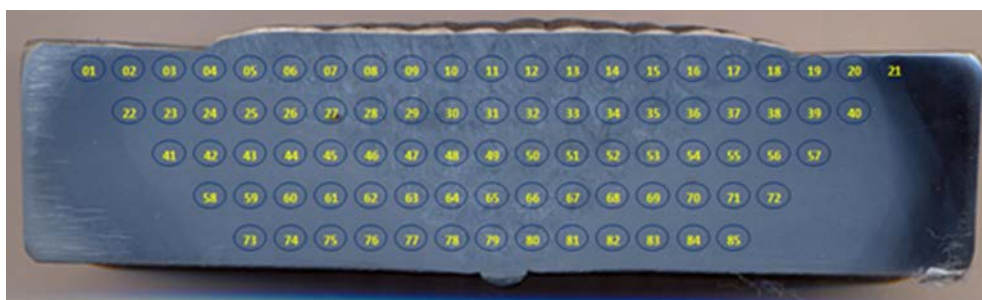


Figura 39 – Pontos de medição da dureza.

A figura 40 é uma representação gráfica do corpo de prova e das marcações efetuadas.

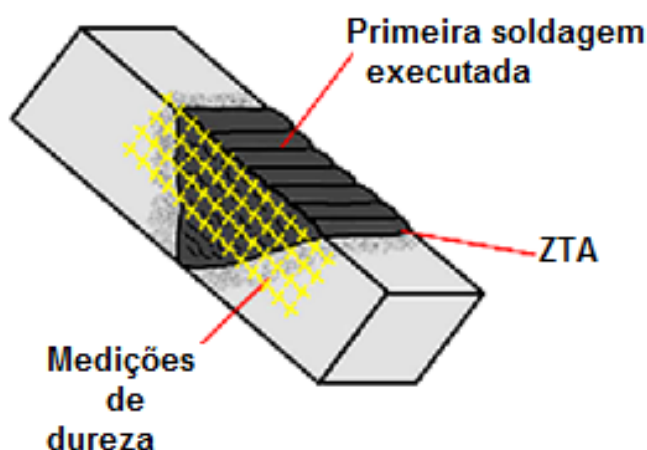


Figura 40 – Representação gráfica dos pontos de medição da dureza.

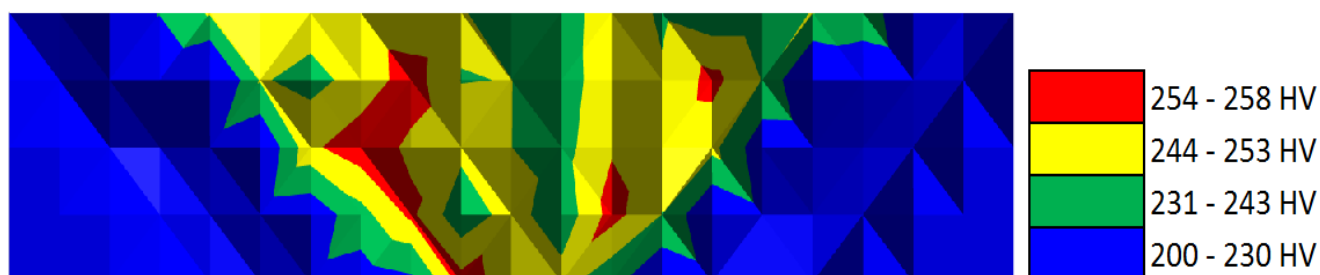
Em cada ponto marcado foi executada uma leitura de dureza vickers e os resultados obtidos estão apresentados na tabela 14 da página 67.

Para determinação da dureza foi utilizado um microdurômetro marca digital *microhardness tester*, modelo MHV- 2000, com uma aplicação de carga de 5 N.

Tabela 14 – Resultados da medição de dureza na peça de teste soldada.

		NÚMERO DA IDENTIFICAÇÃO																						
		(mm)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	
PROFUNDIDADE	5		222,1	219,6	215,0	230,6	244,0	247,6	247,9	247,0	244,9	243,3	237,2	236,1	250,2	240,7	235,4	235,4	243,0	239,4	216,0	220,6	216,5	
	10			223,1	220,4	217,5	210,0	243,5	239,0	246,4	257,2	242,3	242,6	236,8	249,7	243,9	255,7	242,1	211,9	216,9	221,2	222,1		
	15				227,3	228,8	225,1	216,7	250,7	258,3	250,7	245,3	242,6	238,6	251,6	245,0	246,2	221,4	221,8	225,1	225,3			
	20					225,4	225,2	222,7	220,3	238,7	254,7	235,3	247,0	235,5	256,4	242,4	216,5	226,6	227,7	227,0				
	25						224,5	226,0	225,7	222,0	226,7	256,3	248,7	246,8	234,2	216,4	224,4	225,7	226,9					
		DUREZA MEDIDA																						

Com os dados da tabela 14, foi elaborado um gráfico de cores para a representação das durezas obtidas e mostradas na figura 41.

**Figura 41** - Gráfico de dureza vickers (5 N) do corpo de prova soldado com o processo TIG/AT.

No gráfico da figura 41, observa-se que a dureza média encontrada no MB é de 223 HV, na ZTA essa dureza está compreendida entre 210 a 254 HV e na região central da solda estes valores ficaram entre 212 HV e 258HV.

6.2 Análise metalográfica do corpo de prova da solda original

Para a análise metalográfica do corpo de prova foi executada a sequência de lixamento do primeiro corpo de prova. Esta sequência pode ser encontrada no item 5.4 na página 60.

A figura 42, da página 68, mostra essas estruturas e a região do corpo de prova onde elas ocorrem.

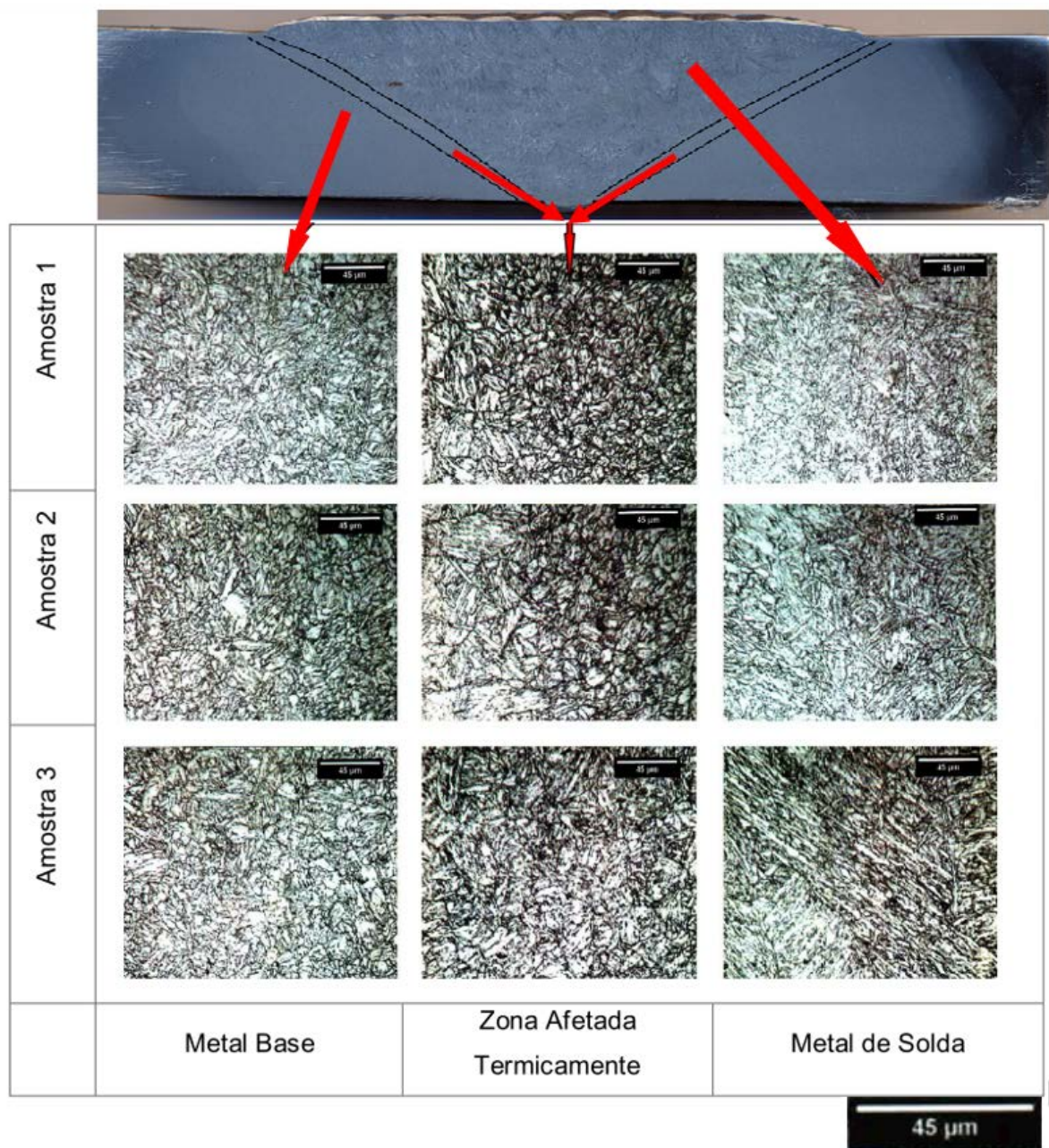


Figura 42 – Metalografia da junta soldada com o processo AT/TIG.

Nos três corpos de prova a microestrutura do MB, apresentou grãos poligonais de ferrita com finos carbonetos dispersos, a ZTA apresentou grãos de ferrita acicular com finos carbonetos e o MS uma microestrutura com carbonetos esferoidais e carbonetos no contorno de grão.

6.3 Mapeamento da dureza do corpo de prova do passe de revenimento

Para a análise da dureza foram feitas 36 marcações que constituíram uma malha de 5 mm de aresta horizontal e 5 mm de aresta vertical. Estas marcações podem ser observadas na figura 43.

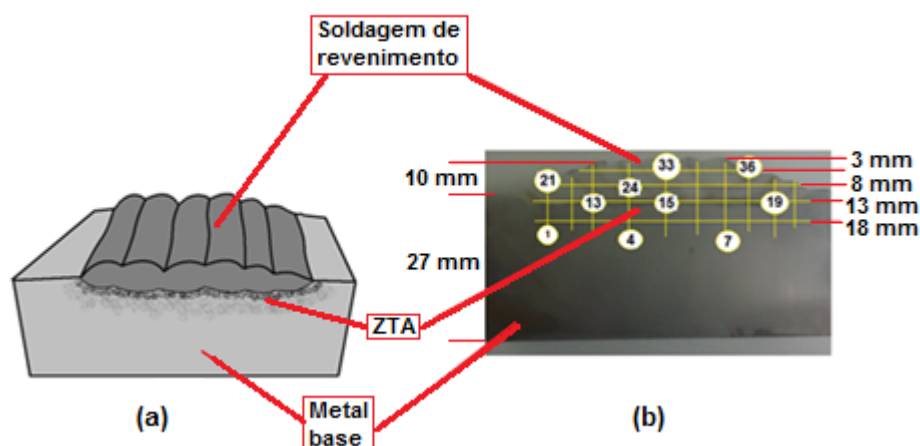


Figura 43 – Mapeamento de dureza no corpo de prova com solda de revenimento.

Na tabela 15, pode se verificar a variação de dureza medida.

Tabela 15 – Resultados medição de dureza do corpo de prova com passe de revenimento.

VARREDURA - TEMPER BEAD				VARREDURA - TEMPER BEAD			
IDENTAÇÃO	D medio (mm)	HV	Prof. (mm)	IDENTAÇÃO	D medio (mm)	HV	Prof. (mm)
1	61,13	237,50	18	20	63,75	228,10	13
2	63,90	235,00	18	21	66,16	212,00	13
3	63,34	234,20	18	22	64,97	219,90	8
4	64,00	232,90	18	23	66,00	212,80	8
5	62,34	238,80	18	24	54,69	310,00	8
6	64,00	232,90	18	25	56,40	291,70	8
7	64,56	231,70	18	26	63,90	227,30	8
8	62,61	235,00	18	27	60,19	243,40	8
9	63,90	227,30	18	28	61,25	237,20	8
10	63,91	227,30	18	29	64,34	224,20	8
11	64,00	226,40	13	30	60,19	243,40	8
12	66,37	210,40	13	31	61,25	237,20	8
13	65,19	218,20	13	32	63,90	235,00	3
14	64,34	224,20	13	33	62,61	235,00	3
15	64,93	219,90	13	34	63,90	227,30	3
16	65,16	218,60	13	35	60,19	243,40	3
17	64,81	220,70	13	36	64,93	219,90	3
18	63,81	227,70	13		65,16	218,60	3
19	63,75	228,10	13				

Com os dados obtidos da tabela 15, foi elaborado um gráfico de cores para a representação das durezas obtidas. Os pontos em que foram encontradas as

maiores durezas (próxima a 300HV) são os pontos 24 e 25 na figura 43 (b) correspondentes a região A e B da figura 44.

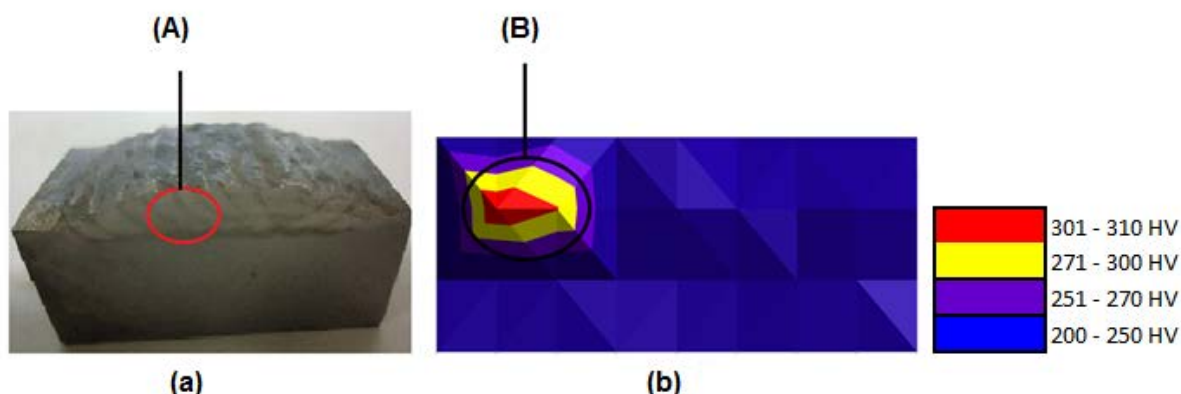


Figura 44 – Gráfico da dureza vickers (5N) do corpo de prova após execução do passe de revenimento soldado com eletrodo revestido.

Pode se observar neste gráfico que foram encontrados em dois pontos uma dureza de aproximadamente 291 e 310HV, e nos demais passes sobrepostos notam-se uma dureza média de 239 HV.

Também foi executada uma varredura de dureza no sentido vertical, conforme mostra a figura 45, onde foi medida a dureza no centro do cordão de solda e na ZTA destes cordões sobrepostos. As linhas verticais na cor vermelho mostram os locais de medição e a variação da dureza ao longo da profundidade.

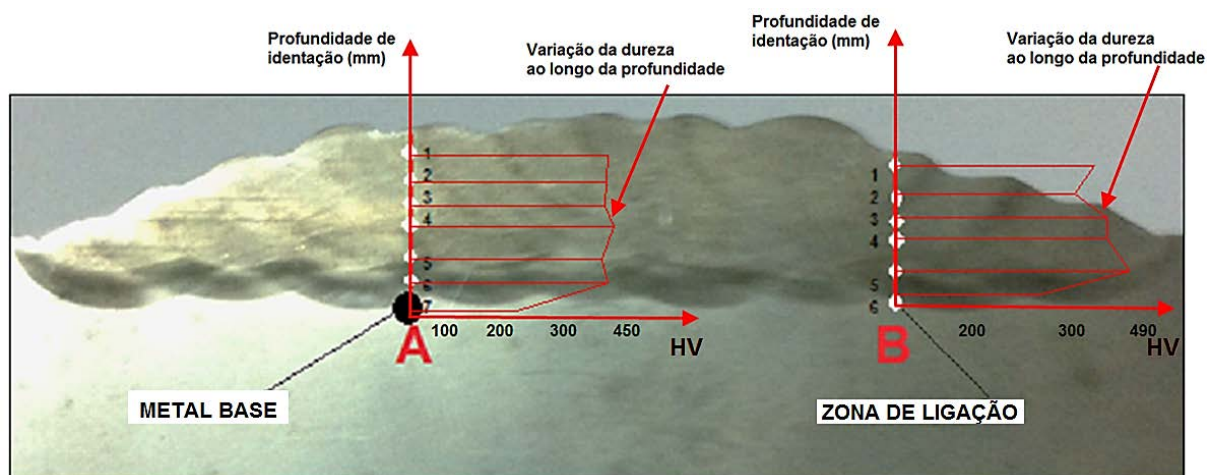


Figura 45 – Gráfico da dureza vickers (5N) do corpo de prova após execução do passe de revenimento soldado com eletrodo revestido.

Com os dados destas medições foi elaborada a tabela 16 da página 71, onde estão anotados os valores e as profundidades de medição executada. As medições executadas tem sua profundidade de medição de 1,5 milímetros de espaçamento entre os pontos medidos.

Tabela 16 – Resultados medição de dureza do corpo de prova com passe de revenimento. Linha vertical A e B

VARREDURA - TEMPER BEAD - LINHA VERTICAL A						
IDENTAÇÃO	D1 (mm)	D 2 (mm)	D médio (mm)	HV	Prof. (mm)	LOCAL
1	46,25	46,25	46,25	433,50	1,5	SOLDA
2	46,31	46,31	46,31	432,30	3	SOLDA
3	46,56	46,56	46,56	427,70	4,5	SOLDA
4	45,44	45,5	45,47	449,10	6	ZTA
5	46,81	46,81	46,81	423,10	7,5	ZTA
6	46,13	46,13	46,13	435,80	9	ZTA
7	62,81	62,81	62,81	235,00	10,5	MB

VARREDURA - TEMPER BEAD - LINHA VERTICAL B						
IDENTAÇÃO	D1 (mm)	D 2 (mm)	D médio (mm)	HV	Prof. (mm)	LOCAL
1	47,56	47,56	47,56	409,90	1,5	SOLDA
2	50,06	50,06	50,06	371,80	3	SOLDA
3	46,06	46,06	46,06	438,20	4,5	ZTA
4	46	46	46,00	438,20	6	ZTA
5	43,81	43,81	43,81	483,00	7,5	ZTA
6	55,81	55,88	55,85	297,00	9	ZL

Como pode ser observado na tabela 16, os pontos de dureza no centro do cordão de solda e na ZTA formada entre eles, a dureza ficou acima de 253 HV, que é o máximo permitido na norma ASME B31.3 - 2012.

6.4 Análise metalográfica do corpo de prova do passe de revenimento

Para a análise metalográfica do corpo de prova foi executada a mesma sequência de lixamento do corpo de prova da solda original. Esta sequência pode ser encontrada no item 5.4 da página 60.

A figura 46 da página 72 mostra essas estruturas e a região do corpo de prova onde elas ocorrem.

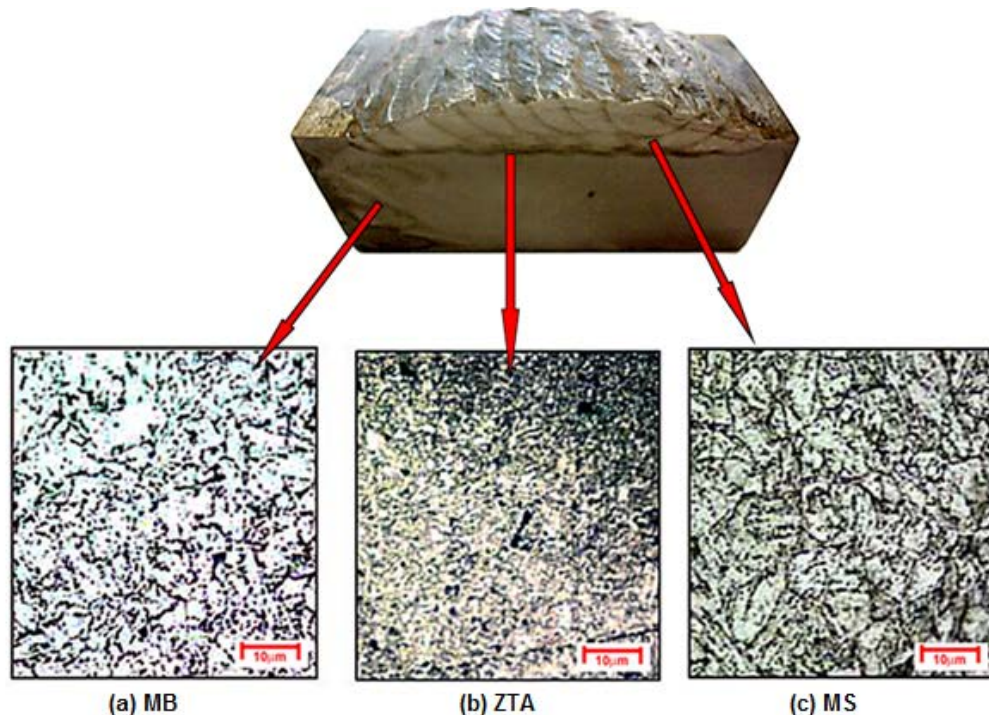


Figura 46 - Soldagem eletrodo revestido – corpo de prova com passe de revenimento: (a) metal base (1000x) (b) ZTA (1000x) e (c) metal de solda (1000x).

Neste segundo corpo de prova a microestrutura do metal base, apresentou grãos poligonais de ferrita com finos carbonetos dispersos, a ZTA apresentou grãos de ferrita acicular com finos carbonetos e o metal de solda uma microestrutura com carbonetos esferoidais e carbonetos no contorno de grão.

Foi feita metalografia na região delimitada pelas linhas verticais A e B da figura 45 da página 70, e estas estruturas podem ser verificadas na figura 47.

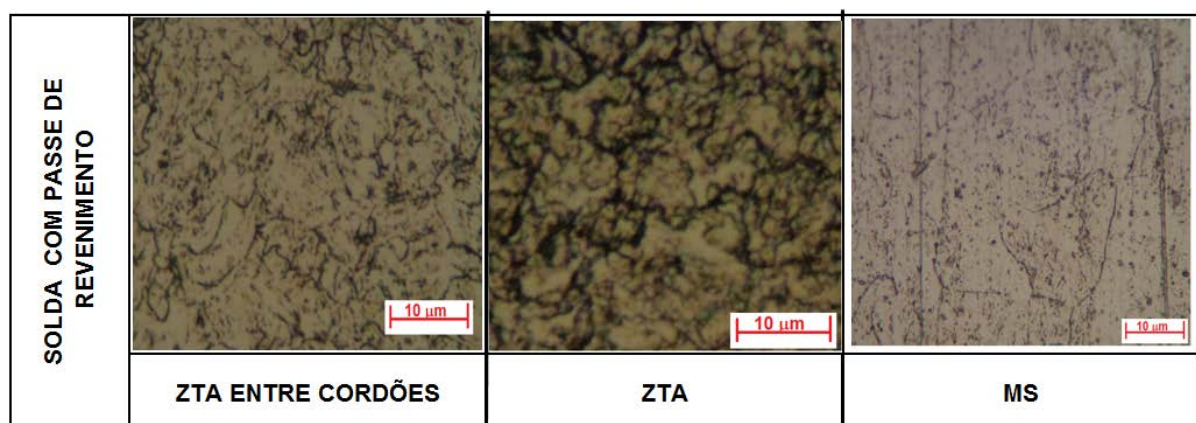


Figura 47 - Soldagem eletrodo revestido – corpo de prova com passe de revenimento: (a) ZTA entre cordões (1000x) (b) ZTA (1000x) e (c) metal de solda (1000x).

Como pôde ser verificado a ZTA apresentou grãos de ferrita acicular com finos carbonetos e o MS apresentou uma microestrutura com carbonetos esferoidais e carbonetos no contorno de grão.

6.5 Medição de dureza do corpo de prova do passe de revenimento

Após a execução dessa soldagem; deste terceiro corpo de prova foram retiradas duas amostras para a execução dos ensaios de dureza e metalografia. Para esta análise da dureza foram feitas 36 marcações que constituíram uma malha de 5 mm de aresta horizontal e 5 mm de aresta vertical como mostra a figura 48.

A figura 48(a), mostra a representação gráfica e a figura 48(b) a localização dos pontos desta medição.

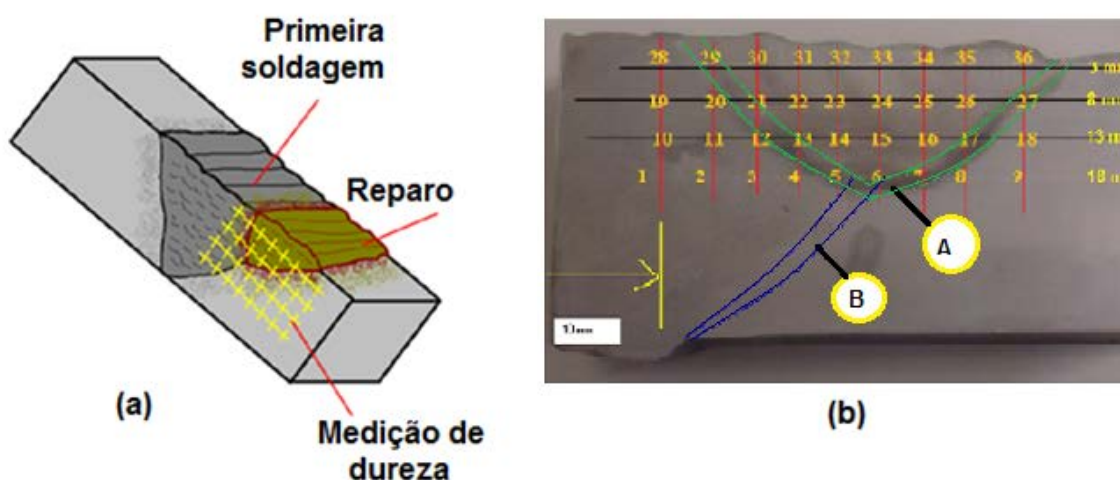


Figura 48 – Mapeamento de dureza na região do reparo.

Na figura 48 é possível observar que os pontos numerados entre 28 e 36, estão sobre uma linha que se encontra 3 mm abaixo da superfície da peça. Observa-se ainda na figura 48(b) nas regiões (A) e (B) a ZTA formada também entre o MS da primeira soldagem com o MS do reparo executado.

Na tabela 17 da página 74, pode se verificar a variação de dureza medida, observa-se que quanto mais próximo a superfície da solda, a dureza aumenta.

Tabela 17 – Resultados da medição de dureza da peça reparada com passe de revenimento.

VARREDURA - REPARO				VARREDURA - REPARO			
IDENTAÇÃO	D medio (mm)	HV (N/mm2)	Prof. (mm)	IDENTAÇÃO	D medio (mm)	HV (N/mm2)	Prof. (mm)
1	64,22	225,00	18	20	63,62	229,00	8
2	65,50	216,10	18	21	46,62	426,50	8
3	68,50	197,60	18	22	47,00	419,70	8
4	58,84	268,10	18	23	46,22	434,60	8
5	45,38	450,30	18	24	48,09	401,40	8
6	51,88	344,50	18	25	46,31	432,30	8
7	56,66	289,20	18	26	47,28	415,30	8
8	66,53	209,70	18	27	48,03	402,40	8
9	68,34	198,70	18	28	48,03	402,40	8
10	65,25	217,80	18	29	46,31	432,30	3
11	68,06	200,10	18	30	47,28	415,30	3
12	50,03	370,90	13	31	48,03	402,40	3
13	50,47	364,50	13	32	45,50	447,90	3
14	53,62	322,40	13	33	45,50	447,90	3
15	52,31	338,80	13	34	47,97	403,90	3
16	53,56	323,20	13	35	51,31	352,10	3
17	69,41	192,60	8	35	49,31	384,20	3
18	65,93	213,30	8	36	50,75	360,00	3
19	65,41	216,90	8				

Com os dados obtidos da tabela 17, foi elaborado um gráfico de cores, figura 49 da página 75, para a representação das durezas obtidas. Neste gráfico observa-se que na região do reparo a dureza atingiu valores até 448HV.

A figura 49(a) da página 75 apresenta graficamente os valores de dureza encontrada. A figura 49(b) a ZTA formada na solda de reparo e os pontos de localização da medição efetuada.

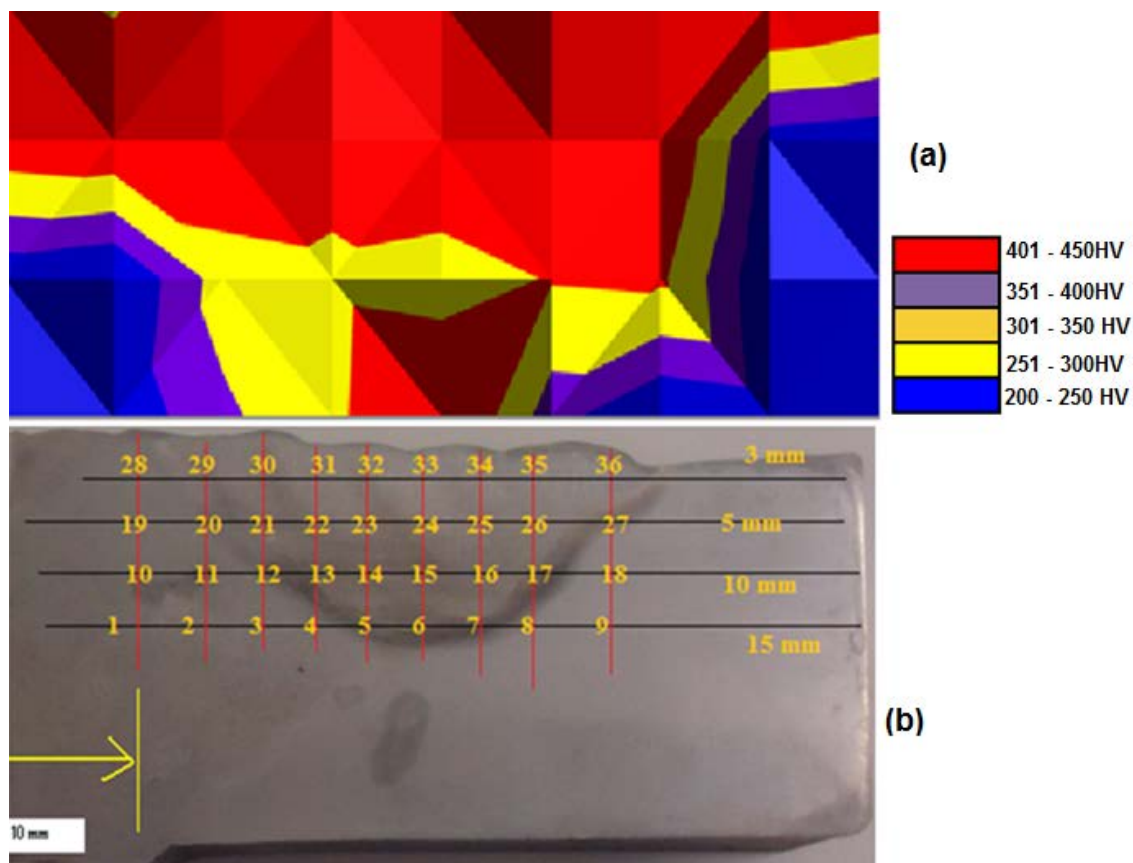


Figura 49 - Gráfico da dureza vickers (5N) do corpo de prova após execução do reparo (a) representação gráfica, (b) localização dos pontos de medição - dureza máxima de 450 HV.

Verifica-se na região onde foi utilizado o reparo que foram encontrados valores de dureza de até 450HV indicados na figura 49(a) com a cor vermelho. Observa-se ainda na figura 49 que a maior variação de dureza foi registrada, nos passes de acabamento da solda.

Como a dureza medida ultrapassou o limite de 253HV permitido na norma ASME B31.3 - 2012, foi executada medições de dureza nos centros dos cordões de solda, entre a ZTA formada nestes cordões.

A linha de cor vermelho vertical da figura 50 da página 76, mostra a localização onde estes pontos foram medidos e a variação da dureza ao longo da profundidade. As medições executadas tem sua profundidade de medição de 1,5 milímetros de espaçamento entre os pontos medidos.

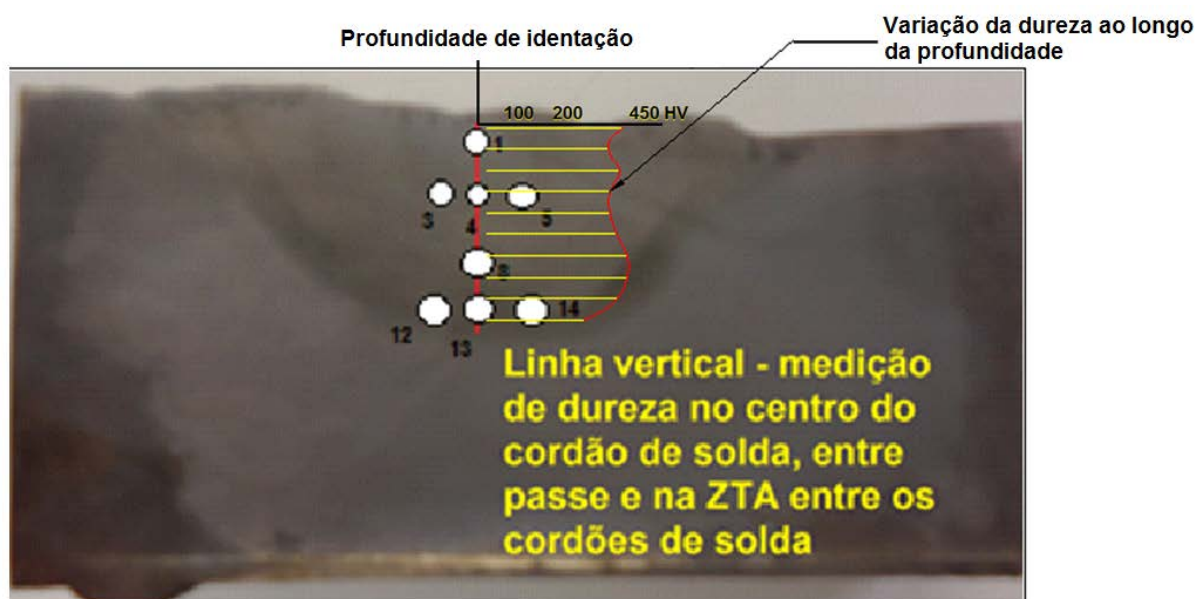


Figura 50 – Medições de dureza vickers entre cordões de soldas e as ZTA's destes cordões.

Com os dados desta medição foi elaborada a tabela 18, onde estão mostradas as durezas encontradas e a profundidade onde elas ocorreram.

Tabela 18 – Resultados da medição de dureza da peça reparada com passe de revenimento. Regiões entre soldas e ZTA entre cordões.

VARREDURA - REPARO						
IDENTAÇÃO	D1 (mm)	D 2 (mm)	D Médio (mm)	HV	Prof. (mm)	LOCAL
1	47,06	47,06	47,06	418,60	1,5	SOLDA
2	47,44	47,44	47,44	412,00	3	SOLDA
3	47	46,44	46,72	425,40	4,5	SOLDA
4	46,56	46,56	46,56	427,70	4,5	SOLDA
5	49,63	49,31	49,47	381,30	4,5	SOLDA
6	49,19	49,19	49,19	383,20	6	SOLDA
7	49	49	49,00	386,20	7,5	SOLDA
8	48,19	48,19	48,19	399,30	9	SOLDA
9	46,19	46,13	46,16	435,80	10,5	SOLDA
10	47	45,56	46,28	433,50	12	SOLDA
11	47,56	47,56	47,56	409,90	13,5	SOLDA
12	55,31	55,44	55,38	302,40	15	ZTA
13	57,88	57,75	57,82	279,80	15	ZTA
14	53,44	53,44	53,44	324,70	15	ZTA

Na figura 50, é possível observar um gráfico que mostra a variação da, dureza ao longo da profundidade da solda. Observa-se neste gráfico que a dureza não sofre grandes variações atingindo seu valor mínimo de 279,80HV na ZTA.

A figura 51, mostra uma indentação da ZTA entre dois cordões de solda e o centro deste cordão. Esta indentação esta localizada entre os pontos 11 e 13 da tabela 18.



Figura 51 – Impressão da dureza vickers (5N) do corpo de prova, na região entre a ZTA e o centro de um cordão de solda.

Pode-se observar na figura 51 as regiões da ZTA (região mais escura) e o nucleo do cordão de solda (região mais clara).

6.6 Metalografia do corpo de prova do reparo

Para a análise metalográfica do corpo de prova foi executada a mesma sequência de lixamento do corpo de prova da solda original. Esta sequência pode ser encontrada no item 5.4 da página 60.

Neste terceiro corpo de prova a microestrutura do MB mostrada na figura 52(a) da página 78, apresentou grãos poligonais de ferrita com finos carbonetos dispersos, a ZTA, na figura 52(b), apresentou grãos de ferrita acicular com finos carbonetos e o MS apresentou uma microestrutura com carbonetos esferoidais e carbonetos no contorno de grão como pode ser visto na figura 52(c).

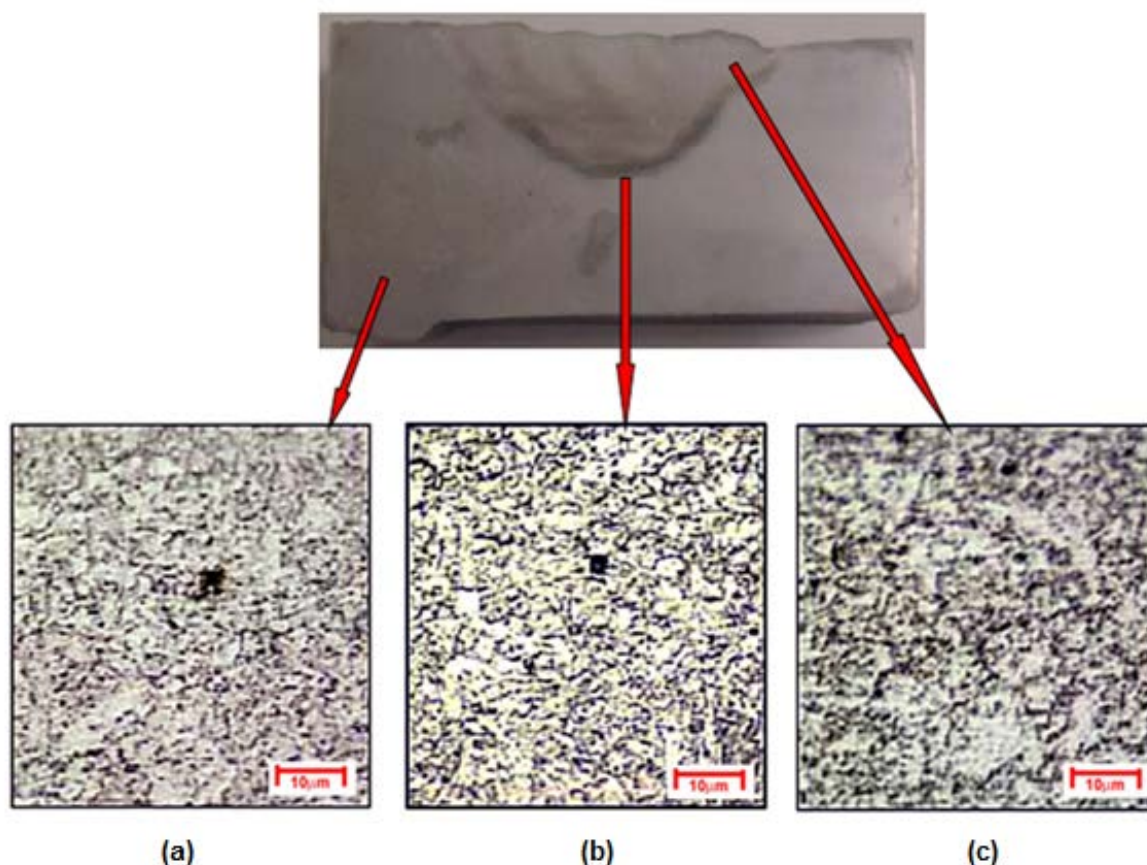


Figura 52 - Soldagem com eletrodo revestido - CP do reparo: (a) metal de base (1000x) (b) ZTA (1000x) e (c) metal de solda (1000x).

As estruturas encontradas no MB, ZTA e MS, foram semelhantes às estruturas da primeira soldagem e na soldagem com os passes de revenimento.

Pode se verificar na figura 52 que não houve mudanças significativas nas microestruturas destas regiões.

Conforme identificado na linha vertical de cor vermelho na figura 50 da página 75, foi executada a avaliação metalográfica entre os cordões, na ZTA entre cordões e na ZTA entre o MS e o MB. Na figura 53 da página 79 estão mostradas estas estruturas metalográfica.

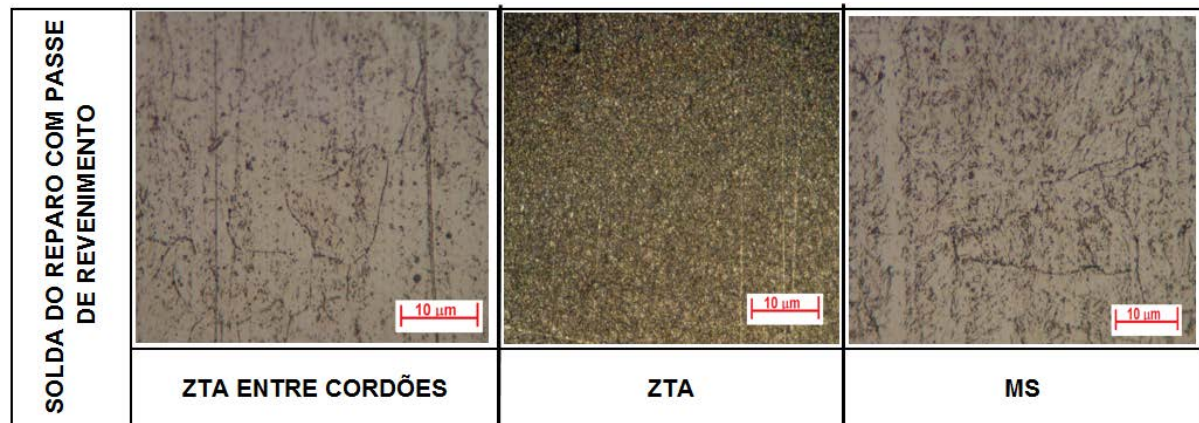


Figura 53 - Soldagem com eletrodo revestido - CP do reparo: (a) ZTA entre cordões (1000x) (b) ZTA (1000x) e (c) metal de solda (1000x).

Como pôde ser verificado a ZTA apresentou grãos de ferrita acicular com finos carbonetos e o MS apresentou uma microestrutura com carbonetos esferoidais e carbonetos no contorno de grão.

7 DISCUSSÃO

Neste capítulo, além de uma discussão dos resultados de dureza obtido em cada corpo de prova, será feita uma comparação entre os resultados de dureza dos três CP's e uma comparação entre os resultados e durezas dos três corpos de prova e a norma ASME B31.3 – 2012.

7.1 Solda original da peça de teste

Com as informações de medição da primeira soldagem e conforme mostrado na tabela 14, da página 67, foram obtidos aproximadamente 85 pontos de dureza.

Verificou-se que a dureza nos pontos 29, 35, 46, 63, 67 e 78, ressaltados na figura 54, variou entre 255 e 258HV.

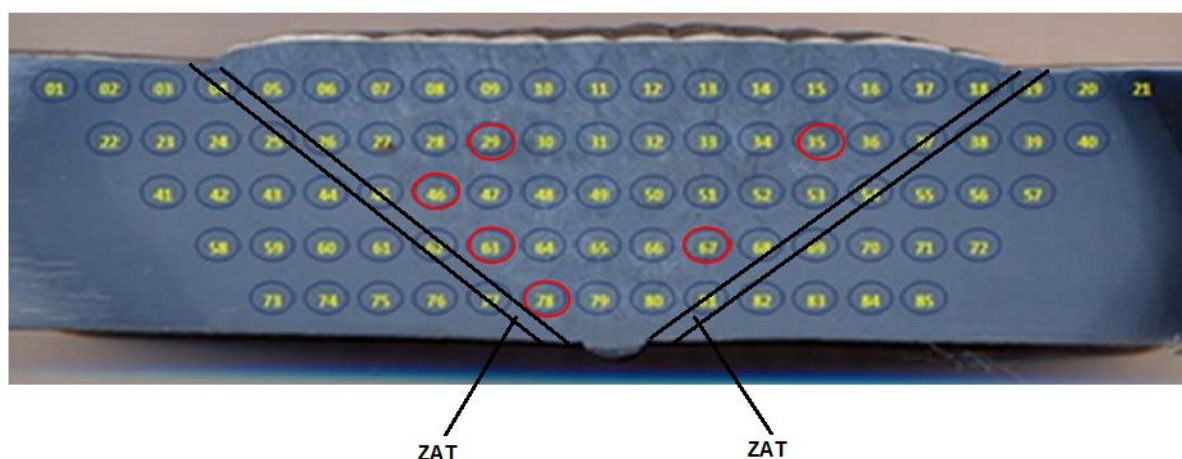


Figura 54 – Pontos de medição de dureza acima do limite estabelecido pelo ASME B31.3 – 2012.

Observa-se ainda na figura 54, que exceto o ponto 29, os demais pontos que possuem dureza acima do especificado pela norma ASME B31.3 - 2012 se encontram no metal de solda, próximos a ZTA.

O gráfico da figura 41 da página 67 cujos pontos estão mostrados na figura 54 mostra como a dureza varia na região da solda da ZTA e do metal base.

Na figura 41 da página 67 observa-se que a maior dureza foi encontrada em pontos pertencentes ao metal de solda adjacente a ZTA. Na mesma figura observa-se também que as menores durezas foram encontradas nos pontos pertencentes ao MB.

A maior dureza encontrada neste CP foi de 258HV que é aproximadamente 2% maior que o máxima permitida na norma ASME B31.3 – 2012.

Vale salientar que o TTAT desse CP foi executado com uma temperatura de encharque de 720°C que é 18°C menor que o recomendado pela norma ASME B31.3 - 2012. Estas indicações do ASME B31.3 - 2012 podem ser encontradas na tabela 3 da página 33.

Com relação à metalografia do MS, da ZTA e do MB, a figura 42 da página 68, mostra que o metal base apresentou grãos poligonais de ferrita, a ZTA apresentou ferrita acicular e o MS apresentou uma microestrutura de carbonetos esferoidais com carbonetos precipitado no contorno de grão.

Uma observação que pode ser feita é que cada uma dessas estruturas apresentou uma faixa de dureza diferente, na estrutura de grãos poligonais de ferrita no MB foi encontrada a faixa de dureza compreendida entre 215 e 229HV com média de 223HV.

À estrutura de grãos de ferrita acicular encontrada na ZTA foi encontrada uma faixa de dureza entre 210 e 234HV. A faixa de dureza encontrada no MS entre 212 e 258 HV foi encontrada à estrutura de carbonetos esferoidais e carbonetos depositados no contorno de grão.

Com relação à velocidade de deposição dos cordões excetuando-se os oito primeiros cordões cuja velocidade foi próxima a 500 mm/min, nos demais a velocidade permaneceu próxima a 300 mm/min. Nesta operação a temperatura no MB permaneceu próxima a 310°C que é próximo a temperatura máxima de interpasse indicada pela norma ASME B31.3 - 2012, conforme nota da tabela 2 da página 28.

7.2 Solda com passe de revenimento

No corpo de prova em que foram executados os passes de revenimento foram medidos 36 pontos. A figura 55 da página 82 é um gráfico tridimensional, feito com os dados da tabela 15 da página 69, que mostra como a dureza varia. Observa-se nessa figura que o ponto de maior dureza é o ponto 24, indicado pela seta de cor preto; neste ponto a dureza vale 310HV.

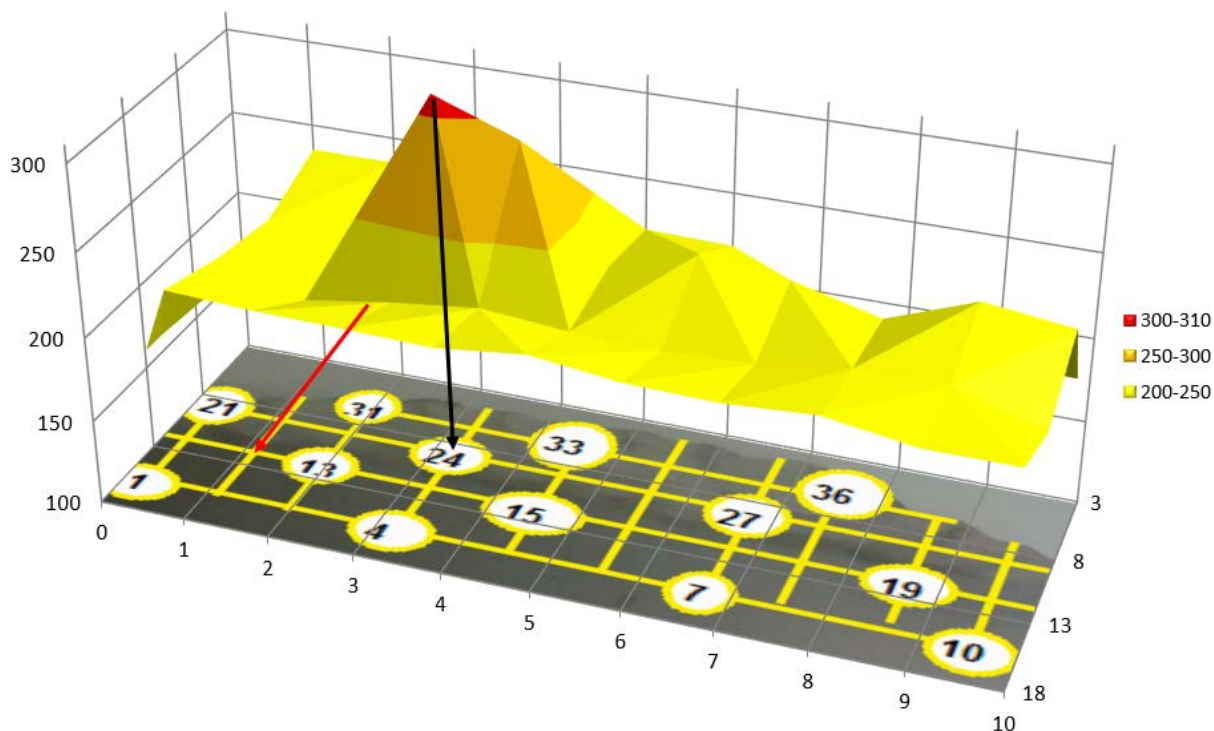


Figura 55 - Gráfico da dureza vickers (5N) - corpo de prova do passe de revenimento – perfil tridimensional.

Observa-se na figura 55 que o menor valor de dureza encontrado nesse passe de revenimento com solda foi de 210HV localizado no ponto 12, indicado pela seta de cor vermelho. Este ponto de menor dureza está no metal de solda adjacente a ZTA.

Ainda é possível verificar pela figura 55 que os pontos cuja dureza é superior a 253HV estão localizados na região do metal de solda próxima a superfície.

As estruturas metalográficas encontradas neste CP são as mesmas do CP da solda original da peça de teste.

Da mesma forma que o CP da solda original da peça de teste. Cada uma dessas estruturas apresentou uma faixa de dureza diferente.

À estrutura composta de ferrita acicular encontrada na ZTA, apresentou faixa de dureza um pouco abaixo que o MB sendo 210HV a mínima e 228HV à máxima.

A faixa de dureza entre 212 e 310HV encontrada no MS pode ser associada à estrutura de carbonetos esferoidais e aos carbonetos depositados no contorno de grão.

Com relação à velocidade de deposição dos cordões, da mesma forma que no CP da solda original da peça de teste, excetuando-se os oito primeiros cordões cuja velocidade foi próxima a 500 mm/min, nos demais a velocidade permaneceu

próxima a 303 mm/min. Nesta operação a temperatura no MB permaneceu em torno de 310 C que é próximo a temperatura máxima de interpasse indicada pela norma ASME B31.3 - 2012, conforme nota na tabela 2 da página 28.

Na tabela 16 da página 71, pode se observar que a média das durezas nos centros dos cordões de solda foi de 415HV e um desvio padrão de 25,98HV e na ZTA 444,57HV com um desvio padrão de 20,57HV.

7.3 Solda do reparo com passe de revenimento

A figura 56 mostra um diagrama tridimensional da variação da dureza no reparo efetuado. Nesta figura, observa-se que a região onde estão as maiores durezas é a localizada, dentro do MS, entre a superfície e o meio da solda.

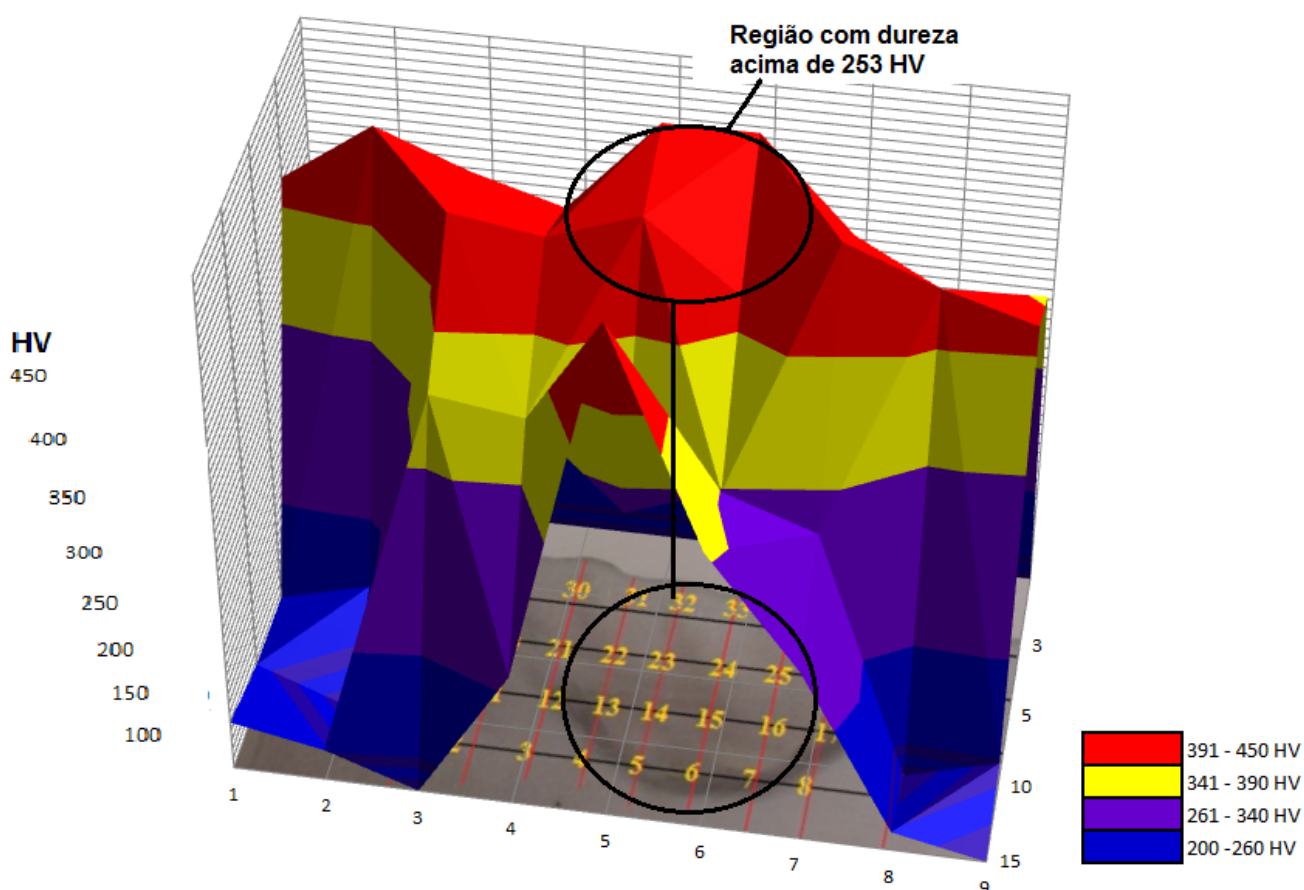


Figura 56 - Gráfico da dureza vickers (5N) - corpo de prova da solda do reparo revenimento – perfil tridimensional.

O polígono destacado na figura 57 da página 84 delimita a região onde a dureza é maior que 400 HV.

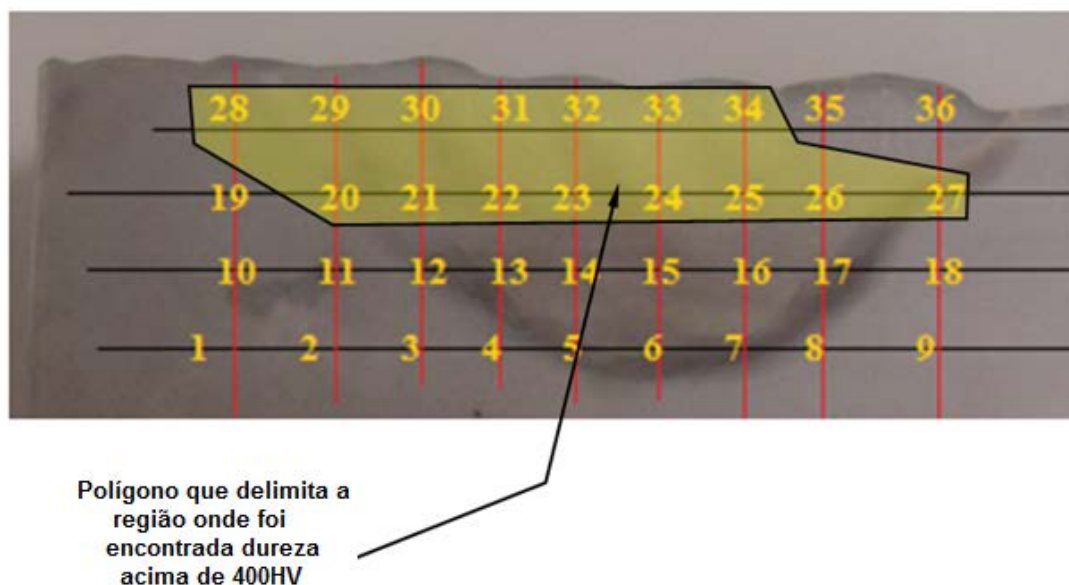


Figura 57 – Polígono delimitando a região de dureza maior do que 400 HV.

A menor dureza detectada nesta região do reparo foi de 192 HV encontrada ponto 17, como apresentado na tabela 17 da página 74, cuja dureza está dentro dos valores permitidos na norma ASME B31.3 - 2012.

Os pontos 1, 2, 3, 8, 9, 10, 11, 17, 18, 19, e 20 apresentam dureza abaixo de 253 HV, esses pontos estão localizados no metal base e na ZTA como pode ser visto na figura 57.

As estruturas metalográficas encontradas neste CP são as mesmas do CP da solda original da peça de teste e da solda com passe de revenimento. Estas estruturas podem ser encontradas na figura 52 da página 78.

Da mesma forma que o CP da solda original da peça de teste e da solda com passe de revenimento, cada uma dessas estruturas apresentou uma faixa de dureza diferente.

À estrutura de grãos de ferrita acicular encontrada na ZTA, apresentou uma faixa de dureza entre 193 e 450HV, exceto pelo ponto 17 cuja dureza é 192 HV.

À faixa de dureza entre 198 e 402 HV encontrada no MS está associada a estrutura de carbonetos esferoidais e aos carbonetos depositados no contorno de grão.

Com relação à velocidade de deposição dos cordões, observa-se que na primeira camada, composta de nove cordões, a velocidade foi próxima a 873 mm/min, fazendo com que a temperatura no metal base ficasse próxima a 310°C.

Observa-se que essa temperatura ainda que menor que dos CP anteriores atende a especificação da norma ASME B31.3 – 2012 indicada na nota da tabela 2 da página 28.

Na segunda camada a velocidade foi próxima a 222 mm/min e a temperatura ficou próxima a 290°C.

Nos cordões da terceira e quarta camada, a velocidade média ficou próxima a 210 mm/min, e a temperatura ficou próxima a 300°C.

Na tabela 18 da página 76, pode se observar que a média das durezas nos centros dos cordões de solda foi de 410,26HV e um desvio padrão de 20,17HV e na ZTA 302,3HV com um desvio padrão de 20,57HV.

7.4 Comparação entre o corpo de prova da solda original, o corpo de prova com passe de revenimento e o corpo de prova da solda de reparo com passe de revenimento.

Com relação à dureza o quadro 1 mostra as faixas de variação no MB, na ZTA e no MS para os três corpos de prova.

Quadro 1 - Comparação da variação de dureza – solda original, solda com passe de revenimento e solda do reparo com passe de revenimento.

CORPO DE PROVA	DUREZA (HV)		
	MB	ZTA	MS
Solda Original	200-230	210-240	212-258
Solda com passe de revenimento	227-239	210-228	212-310
Solda do reparo com passe de revenimento	199-213	193-450	229-448

Observa-se no quadro 1 que para o corpo de prova da solda original, na região da ZTA a dureza ficou entre 210 e 240HV e no MS a variação foi de 212 a 258HV.

No mesmo quadro o corpo de prova da solda com passe de revenimento apresenta variação entre 210 a 228HV na ZTA e variação de 212 a 310HV no MS.

Finalmente pode se observar que a dureza encontrada na ZTA está entre 193 e 450HV no MS entre 229 a 448HV.

No corpo de prova do reparo foram feitas medidas de dureza, na zona próxima a ZTA, da solda anteriormente efetuada. Os valores das durezas ficaram compreendidos entre 198 e 402HV com uma média igual a 243HV e desvio padrão de 68HV.

Pelo quadro 1, as durezas encontradas no MB dos três corpos de prova não apresentam variação significativa, permanecendo na faixa compreendida entre 199 e 239 HV, faixa esta que está abaixo do limite estabelecido na norma ASME B31.3 – 2012.

Com relação à região da ZTA, a solda original e a solda com passe de revenimento apresentam durezas que estão na faixa de 210 a 234 HV. Na ZTA do corpo de prova da solda do reparo o valor da dureza foi maior que nos outros, apresentando valores entre 193 e 450 HV. Neste último corpo de prova, excetuando-se os pontos 1, 2, 3, 8, 9, 10, 11, 17, 18, 19, e 20 que apresentam durezas 225; 216; 197,6; 209,7; 198,7; 217,8; 200,1; 192,6; 213,30; 216,9 e 229HV, respectivamente, os demais possuem durezas acima do limite estabelecido na norma ASME B31.3 – 2012.

No quadro 1 da página 85, comparando as durezas obtidas no MS na solda original com a do passe de revenimento, verifica-se que na solda original a dureza média é de 244HV com desvio padrão de 8,1HV e na solda com passe de revenimento é de 239HV com desvio padrão de 26HV, o que representa uma redução de 2,0 %, aproximadamente. Na solda de reparo com passe de revenimento a dureza média foi de 384HV com desvio padrão de 57,2HV, o que representa um aumento aproximado de 63,5% em relação à solda original.

Observa-se aqui que no MS a solda original e a solda com passe de revenimento apresentam durezas abaixo do limite estabelecido na norma ASME B31.3- 2012.

Com relação à dureza, o quadro 2 da página 87, mostra o valor máximo e o mínimo obtido no MB, na ZTA e no MS para os três corpos de prova. No corpo de prova do reparo também foram tomadas medidas de dureza na solda original que no quadro 2 da página 87 foi indicada por SA.

Quadro 2 – Média das durezas – solda original, solda com passe de revenimento e solda do reparo com passe de revenimento.

DUREZA (HV)		MB	ZTA	MS	SA
Solda Original	MÁX	229	234	258	-x-
	MIN	215	210	212	-x-
Solda com passe de revenimento	MÁX	239	228	310	-x-
	MIN	227	210	212	-x-
Solda do reparo com passe de revenimento	MÁX	213	450	448	402
	MIN	199	193	229	198

Da observação do quadro 2, é possível verificar que em todos os corpos de prova as maiores durezas são sempre encontradas no MS. Observa-se neste quadro que a dureza máxima no metal de solda do corpo de prova original é de 258 HV, na solda com passe de revenimento é de 310HV e na solda do corpo de prova do reparo é de 448HV. Percebe-se ainda que, no corpo de prova da solda do reparo a dureza máxima encontrada no MS da solda do corpo de prova original apresentou um aumento, alcançando um valor de 415HV.

Com os dados obtidos do quadro 2 foi possível determinar a média das durezas e o desvio padrão para o MB, a ZTA e o MS de cada corpo de prova soldado. O quadro 3 mostra estas médias das durezas e os desvios padrão nos três corpos de prova.

Quadro 3 – Desvio padrão das durezas – solda original, solda com passe de revenimento e solda do reparo com passe de revenimento.

DUREZA (HV)		MB	ZTA	MS	SA
Solda Original	Média	223	220	244	-x-
	Desv. Padrão	3,4	7,6	8,1	-x-
Solda com passe de revenimento	Média	233	220	239	-x-
	Desv. Padrão	3,8	6,2	26	-x-
Solda do reparo com passe de revenimento	Média	206	347	384	243
	Desv. Padrão	10,3	96	57,2	73

Pode se observar no quadro 3 que o desvio padrão encontrado no MB do corpo de prova original foi de 3,4 HV, na ZTA este desvio foi de 7,6HV e no MS 8,1HV. Esses valores de desvio padrão mostram que as durezas são homogêneas nestas três áreas.

No corpo de prova com passe de revenimento o desvio encontrado para o MB foi de 3,8HV, a ZTA apresentou um desvio de 6,2HV e no MS atingiu o valor de 26

HV. É possível concluir que as durezas no MB e na ZTA estão mais homogêneas, que no MS.

Percebe-se, ainda, pelo quadro 3 da página 87 que na solda de reparo com o passe de revenimento o desvio padrão no MB é de 10,3HV, na ZTA este desvio é de 96 HV e no MS de 57, 2HV. Observa-se que em relação aos demais corpos de prova não houve um aumento significativo no desvio padrão para o MB. Quando se olha a ZTA o desvio padrão ficou sete vezes maior. No metal de solda é possível verificar que este desvio padrão dobrou em relação ao do corpo de prova de revenimento, que por sua vez, é três vezes o da solda original.

Sendo assim, o que se observa com relação à dureza ao MB dos três corpos de prova é que elas são homogêneas e próximas a 220HV. Quando se estuda a ZTA, no corpo de prova da solda original e no corpo de prova da solda com passe de revenimento, as durezas são homogêneas e próximas a 220HV. Para o corpo de prova da solda do reparo com passe de revenimento a dureza média é cerca de 58% maior que a dos outros dois. Observa-se também que houve um expressivo aumento no desvio padrão para esta zona, quando comparado com os demais.

Também no quadro 3, em relação a SA do corpo de prova da solda do reparo com passe de revenimento a média das durezas ficou em 243HV, que é igual a obtida no MS no corpo de prova da solda original. Com relação ao desvio padrão, este aumentou, sendo 8,4 vezes o encontrado no corpo de prova da solda original.

No mesmo quadro observa-se que as médias das durezas encontradas no MB, na ZTA e no MS do corpo de prova original e no corpo de prova com passe de revenimento estão abaixo do limite estabelecido na norma ASME B.31.3 – 2012. No corpo de prova do reparo com passe de revenimento à dureza na ZTA e no MS ultrapassou o limite de 253HV estabelecido na norma em cerca de 52%.

7.5 Comparação entre as ZTA's dos cordões de solda e centro do cordão de solda do corpo de prova com passe de revenimento e o corpo de prova da solda de reparo com passe de revenimento.

Com relação à dureza o quadro 4 da página 89, mostra as faixas de variação na ZTA entre os cordões de solda e a dureza no centro do cordão de solda para os dois corpos de prova.

Quadro 4 - Comparação da variação de dureza – solda com passe de revenimento e solda do reparo com passe de revenimento.

CORPO DE PROVA	DUREZA (HV)	
	ZTA ENTRE CORDÕES DE SOLDA	CENTRO DO CORDÃO DE SOLDA
Solda com passe de revenimento	423,10 - 483	371,8 – 433,5
Solda do reparo com passe de revenimento	279,8 – 324,7	381,3 - 435,8

Observa-se no quadro 4 que para o corpo de prova da solda com passe de revenimento apresenta variação entre 423,10 a 483HV na ZTA entre cordões e variação de 371,8 a 433,5HV no centro do cordão de solda.

No mesmo quadro o corpo de prova da solda de reparo com passe de revenimento apresenta variação entre 279,8 a 324,7HV na ZTA entre cordões e variação de 381,3 a 435,8HV no centro do cordão de solda.

Pelo quadro 4, as durezas encontradas na ZTA dos cordões de solda e no centro do cordão de solda apresentam variação significativa, permanecendo na faixa compreendida entre 279,8 e 483HV, faixa esta que está acima do limite estabelecido na norma ASME B31.3 – 2012.

Com relação à dureza, o quadro 5, mostra o valor máximo e o mínimo obtido na ZTA entre os cordões de solda e no centro dos cordões de solda para os dois corpos de prova.

Quadro 5 - Média das durezas – solda com passe de revenimento e solda do reparo com passe de revenimento.

DUREZA (HV)		ZTA ENTRE CORDÕES DE SOLDA	CENTRO DO CORDÃO DE SOLDA
Solda com passe de revenimento	MÁX	483	433,5
	MIN	423,10	371,8
Solda do reparo com passe de revenimento	MÁX	324,7	435,8
	MIN	279,8	381,3

Observa-se neste quadro que na solda com passe de revenimento a dureza máxima na ZTA entre os cordões de solda é de 483HV e no centro dos cordões de solda é de 433,5HV. Na solda do reparo com passe de revenimento a dureza máxima encontrada na ZTA entre estes cordões é 324,7HV e no centro dos cordões de solda é de 435,8HV.

Com os dados obtidos do quadro 5 da página 89, foi possível determinar a média das durezas e o desvio padrão na ZTA entre os cordões de solda e a dureza no centro dos cordões de cada corpo de prova soldado. O quadro 6 mostra estas médias das durezas e os desvios padrão nos dois corpos de prova.

Quadro 6 – Desvio padrão das durezas – solda com passe de revenimento e solda do reparo com passe de revenimento.

DUREZA (HV)		ZTA ENTRE CORDÕES DE SOLDA	CENTRO DO CORDÃO DE SOLDA
Solda com passe de revenimento	Média	444,57	415
	Desv. Padrão	20,57	25,98
Solda do reparo com passe de revenimento	Média	302,3	410,26
	Desv. Padrão	22,45	20,17

Pode se observar no quadro 6 que o desvio padrão entre as ZTA's dos cordões de solda foi de 20,57HV para a solda com passe de revenimento, nos centros dos cordões para esta mesma solda este desvio foi de 25,98HV.

Percebe-se, ainda, pelo quadro 6 que na solda do reparo com o passe de revenimento na ZTA entre os cordões de solda o desvio padrão é de 22,45 HV e no centro destes cordões de 20,17HV.

Sendo assim, quando se estuda a ZTA entre os cordões de solda, no corpo de prova solda com passe de revenimento e no corpo de prova da solda de reparo com passe de revenimento, as durezas estão acima do limite estabelecido pela norma ASME B31.3 - 2012, que é de 253HV.

8 CONCLUSÕES

Com relação à obtenção dos corpos de prova, a solda efetuada na peça de teste foi feita com 51 cordões com largura entre 7 e 11 mm, tendo como dimensão média 8,5 mm, distribuídos em nove camadas. As duas primeiras foram feitas com o processo TIG e as demais com arame tubular

A velocidade de deposição para as primeiras quatro camadas foi de 500 mm/min e para as demais 300 mm/min.

A temperatura do MB ficou próxima a 300°C.

Após tratamento térmico a dureza média do MB foi de 223HV, da ZTA 220HV e do MS 244HV, todas abaixo de 253HV que é o limite máximo estabelecido na norma ASME B31.3 – 2012.

A solda com passe de revenimento foi feita com 26 cordões com largura entre 7 e 9 mm tendo como dimensão média 8 mm distribuídas em três camadas

A velocidade de deposição para os primeiros cordões foi de 442 mm/min e para as demais 303 mm/min.

A temperatura do MB ficou próxima a 300°C.

A dureza média do MB foi de 233HV, da ZTA 220HV e do MS 239HV, todas abaixo de 253HV que é o limite máximo estabelecido na norma ASME B31.3 – 2012.

A solda do reparo com passe de revenimento foi feita com 31 cordões com largura entre 5 e 8 mm tendo como dimensão média 7 mm distribuídas em quatro camadas

A velocidade de deposição para a primeira camada foi de 874 mm/min e para as demais camadas 220 mm/min.

A temperatura do MB ficou próxima a 300°C.

Dos três corpos de prova o que apresentou uma dureza mais uniforme foi o corpo de prova da solda original, com uma dureza entre 200 e 250HV.

Dos três corpos de prova o que apresentou a dureza mais elevada foi o corpo de prova do reparo com passe de revenimento, cujo valor é 450HV.

Nos três corpos de prova, a dureza do MB ficou abaixo de 250HV. O corpo de prova do reparo com passe de revenimento é o que apresenta a dureza mais baixa com 199HV.

Em todos os corpos de prova o ponto de maior dureza ocorreu no metal de solda. No corpo de prova da solda original o ponto de maior dureza foi o ponto 46, como pode ser verificado na tabela 14 da página 67 com 258HV. No corpo de prova com passe de revenimento o ponto de maior dureza foi o ponto 24 com 310HV conforme pode ser observado na tabela 15 da página 69. Para o corpo de prova do reparo com passe de revenimento, conforme pode ser examinado na tabela 17 da página 74, o ponto 5, que pertence a ZTA, é o que apresenta a maior dureza. Ocorre, entretanto que este é o único ponto pertencente ao polígono da figura 57 da página 85, que delimita a região onde a dureza é superior a 400HV, que não é do MS.

Excetuando-se o ponto 5 e os pontos 32 e 33 no polígono da figura 57 da página 84, os demais pontos estão em uma faixa de dureza entre 402 a 432HV

A dureza média do MB foi de 206HV, da ZTA 347HV e do MS 384HV. Para o MB a dureza ficou abaixo de 253HV que é o limite máximo estabelecido na norma ASME B31.3 – 2012 e para a ZTA e o MS, o valor da dureza ultrapassou este limite.

Em todos os corpos de prova a maior média de dureza ocorreu no metal de solda. No corpo de prova da solda original ela foi de 244HV; no corpo de prova com passe de revenimento foi de 239HV e no corpo de prova do reparo com passe de revenimento de 384HV.

Com relação às medições do quadro 4 da página 89, pode se observar que as durezas encontradas na ZTA entre cordões de solda e no centro do cordão de solda estão acima do limite estabelecido na norma ASME B31.3 – 2012, que é de 253HV.

No quadro 5 da página 89, a dureza máxima encontrada foi no passe de revenimento, cujo valor é de 483HV e está localizada na ZTA entre os cordões de solda.

Na solda de reparo com o passe de revenimento a maior dureza encontrada está localizada no centro do cordão de solda e seu valor é de 435,8HV.

Na observação do quadro 6 da página 90, a média de maior dureza encontrada ocorre na ZTA entre os cordões da solda com o passe de revenimento cujo valor é de 444,57HV, apresentando um desvio padrão de 20,57HV, entretanto, observa-se que o maior desvio padrão ocorre no centro do cordão de solda e o seu valor é de 25,98HV.

Considerando que a máxima dureza permitida pela norma ASME B31.3 – 2012 é de 253HV, e a dureza encontrada na ZTA entre os cordões de solda é de 483HV, pode se observar que este valor ultrapassou o limite estabelecido na norma

em cerca de 52,38% e na solda de reparo com passe de revenimento o valor de dureza encontrado é de 435,8HV, pode observar também que este valor é 58,05% acima do limite de 253HV estabelecido pela norma ASME B31.3 – 2012, portanto, conclui-se que a técnica do passe de revenimento em substituição ao TTPS para este material, que as durezas encontradas não ficaram dentro do limite estabelecido pela norma ASME B31.3 - 2012.

Com relação à estrutura metalográfica formada nas três áreas dos três CP's observa-se que não houve mudanças, pois elas apresentaram o mesmo tipo de estrutura. O MB apresentou grãos poligonais de ferrita com finos carbonetos dispersos, a ZTA, apresentou grãos acicular de ferrita com finos carbonetos e o MS apresentou uma microestrutura com carbonetos esferoidais e carbonetos.

Com relação à estrutura metalográfica formada nas duas áreas dos dois corpos de prova, pode se observar na figura 47 da página 72 e na figura 53 da página 79 que não houve mudanças, pois elas apresentaram o mesmo tipo de estrutura. Na ZTA com o MB e ZTA entre cordões de solda, apresentou grãos acicular de ferrita com finos carbonetos e o centro dos cordões de solda apresentou uma microestrutura com carbonetos esferoidais e carbonetos.

9 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Novos estudos baseados nesta técnica podem ser desenvolvidos, por meio da alteração de alguns parâmetros, que no presente estudo foram fixos. Assim é possível:

- a) Aumentar a carga térmica, para aumentar a área de revenimento;
- b) Alterar a energia de soldagem para provocar um aumento de calor na junta soldada e com isso reduzir a dureza no MS;
- c) Variar a velocidade de soldagem para aumentar a temperatura na junta;
- d) Utilizar eletrodos com diâmetro maiores que 3,2 mm para aumentar a área de depósito de solda promovendo uma região maior de revenimento;
- e) Fazer um estudo da estrutura deste material após longos períodos de utilização, para verificar como ficam as tensões residuais.

10 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, W.M. - **Soldagem do aço ABNT 4140 sem Tratamento Térmico posterior**. Fortaleza, UFC, 2001, 96p. Dissertação (mestrado). Programa de Engenharia e Ciências de Materiais, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2001.

ARRAES JÚNIOR, R. M. - **Avaliação da Tenacidade da ZAC na Soldagem do Aço ABNT 4340 sem Tratamento Térmico Posterior**. Fortaleza, 2001, 76 p. Dissertação (mestrado). Programa de Engenharia e Ciências de Materiais, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2001.

ASM Metals Handbook - **Volume 06 -Welding, Brazing and Soldering**, TA459.M43 1990 620.1'6 90-115; ISBN 0-87170-377-7(V.1), SAN 204-7586 ISBN 0-87170-382-3, Printed in THE UNITED STATES OF AMERICA, 1993.

ASME – AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS – **Mission, Vision-and-strategic** - https://www.asme.org/about-asme/who-we-are/mission-vision-and-strategic-focus?cm_re=Who%20We%20Are-_-Left%20Navigation-_-Mission%20Vision%20and%20Strategic%20Priorities acesso em 16/03/2013.

ASME B31.1 - **Power Piping**, Edition 2012.

ASME B31.3 - **Process Piping**, Edition - 2012.

ASME Seção I - **Rules for Construction of power Boiler**, Edition July 2011.

ASME Seção III - **Alternative Rules for Construction of High power Boiler**, Edition July 1, 2011.

ASME Seção V – **Nondestructive Examination**, Edition – July 2011.

ASME Seção VIII – Div1 - **Rules for Construction of Pressure Vessels**, Edition – July 2011.

ASME Seção IX – **Qualification standard for welding and brazing procedures, welders, brazers, and welding and brazing operators** - Edition - July 1, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS – ABNT - NBR 11094: 1990 – **Grãos abrasivos aplicados em lixas – Ensaio – Método de Ensaio**.

ASTM A335 / A335M – 11 - **Standard Specifications for Seamless Ferritic Alloy-Steel Pipe for High Temperature Service** (2011).

AWS A3.0 – **Standard Welding Terms and Definitions** – Edition 2011.

AWS D10.8 - **Recommended Practices for Welding of Chromium-Molybdenum Steel Piping and Tubing**; 1996.

AWS D10.10 - **Recommended Practices for local Heating of Welds in Piping and Tubing**; 2009.

AZEVEDO, A. G. L de - **Aplicação da Técnica da Dupla Camada na soldagem do aço ABNT 1045**—Fortaleza, UFC: 2002.

108 p. Dissertação (mestrado) Programa de pós-graduação em Engenharia e Ciências de Materiais, Universidade Federal do Ceara, Fortaleza, 2002.

CARDOSO, M. D. – **Comportamento e Mecanismos de falhas à fluência em aços P91 e juntas soldadas**. Lisboa, 2009. Dissertação (mestrado). Instituto superior de Engenharia de Lisboa. Lisboa, Portugal, 2009.

CUNHA, B. R. M. da. - **Soldabilidade da nova geração de aços ferríticos Cr-W resistentes a altas temperaturas**. UFRJ, 2006, 123 p. Dissertação (mestrado) Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE, Rio de Janeiro – RJ, 2006.

DANIELSEN, H. K; HALD, J. **Energy Materials**, 1, 1, 49 (2006).
http://www.nxtbook.com/nxtbooks/aws/wj_201203/index.php?startid=75-s#/112 Welding journal march-12 - acesso em 16/03/2013.

DAVIDSON, J. L., 1995, - **“Hydrogen-induced cracking of low carbon – Low alloy steel weldments”**, Materials Forum, 19, pp. 35-51. Development Activities, EPRI, Charlotte, NC: 2003. 1002943. Developments, Technical Report, December 2003.

FERREIRA, Daniel Correia Freire, **Efeitos de diferentes tratamento térmicos na microestrutura e nas propriedades mecânicas de um aço 9CrMoWVNb – 2010 – UFRJ/ Escola Politécnica/ Curso de Engenharia Metalúrgica – 2010.**

HALD, J.; VISWANATHAN, V. and ABE, F. - **Energy Materials, Creep Resistant 9-12% Cr Steels – Long-Term Testing, Microstructure Stability and Development Potentials**, Elsam/Energy E2/IPL-MPT TU Denmark, 2006.

HUYSMANS, J; VEKEMAN, J – **A Challenging Weld Repair of Grade 91 Tubbing Avoiding PWTH – EPRI – 2009 – Laboretec y BWI (Belgian Welding Institute) Energy Materials: 4-2;76-83 – ISSN – 17489237.**

JUNIOR, S. F. da S.; MARQUES, P. V. – **Ensaaios não destrutivos – 2006 – Apostila Técnica – Belo Horizonte – MG.**

KÜCHLER, M. M. – **Aplicação da Técnica da Dupla Camada na Soldagem de Dutos em Operação – Porto Alegre: UFRGS, 2009. 95 pg. Dissertação (mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGEM – Porto Alegre, RS – 2009.**

LISBOA, M. B. - **Nova geração de aços ferríticos Fe-Cr-W(V) Analise da evolução microestrutural e comportamento mecânico sob condições de fluência - Rio de Janeiro, 2007”.** 221 pg. Tese (doutorado). Programa de pós-graduação em Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro – Rio de Janeiro, RJ – 2007.

LUNDIN, C.D; LIU,P And CUI, Y; **A Literature Review on Characteristics of High Temperature Ferritic Cr-Mo steels and weldments**, WRC Bulletin n 454, pp. 1-36 – 2000.

MARQUES, P V; MODENESI, P J; BRACARENSE, A Q; **Soldagem Fundamentos e Tecnologia**; MG; Editora UFMG; 2007.

MASUYAMA, F., 2001 – **“History of Power Plants and Progress in Heat Resistant Steels”**, ISIJ International, Vol. 41, No. 6, pp. 612–625.

NIÑO, C. E. B., BUSCHINELLI, A. J. A - **Análise de Alternativas de Reparo por Soldagem de Aços Cr – Mo**. XXI. Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem. Caxias do Sul, jun./1995.

OLIVEIRA, T. P. - **Estudo da Soldagem dissimilar entre os aços ASTM P91 e DIN 14MOV6. 3 para componentes sujeitos a fluência**. Florianópolis, UFSC, 2010. Dissertação (mestrado). Programa de pós-graduação em engenharia mecânica. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

ROCHA, A. Miguel C. da - **Estudo do Tratamento Térmico de Juntas soldadas em aço X10CrVNb 9-1** - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2012, Mestrado Integrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

ROTH, M. - **Welding chromium-molybdenum steel pipe for power plants - Induction Heating Becomes an Options for Preheat, Post weld Heat Treatment Department of mathematics and statistics**; Queen’s Univerty; Kingston, Ontario, July 2002.
<http://www.thefabricator.com/article/tubepipefabrication/welding-chromium-molybdenum-steel-pipe-for-power-plants> - Acesso em 03/04/2013.

SILVA, C. C. - **Avaliação das Tensões residuais de soldagem em tubulações de pequeno diâmetro usadas em refinaria de petróleo**, Fortaleza, UFC, 2007, 194 p. Programa de pós-graduação em engenharia e ciência de materiais. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2007.

SPERKO, W. J. – **Exploring Revenimento Welding** – Welding Journal – July 2005 – pag. 37 to 40.

VISWANATHAN,R; GANDY, D.W; FINDLAN, S.J – **Temper bead welding of PN° 4 and 5 materials**, EPRI, Palo Alto, CA, 1998 – Tr 111757.

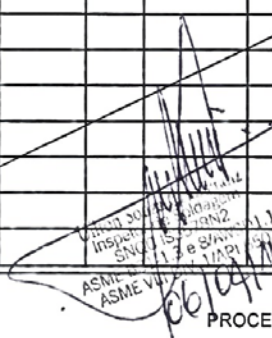
WTIA – Welding Technology Institute Australian - **Temper Bead Welding**; ABN 69003696526, March 2006.

11 APÊNDICE

APÊNDICE A - PARÂMETROS DE SOLDAGEM – UTILIZADO PARA A SOLDAGEM DA PEÇA DE TESTE.

PROCESSO SOLDAGEM	PASSE Nº	CAMADA Nº	CONSUMÍVEL CLASSE	DIÂMETRO (mm)	TENSÃO (V)	CORRENTE (A)	VELOCIDADE (mm/min)	HEAT INPUT (J/mm)	TEMP. °C	LARGURA PASSE DE SOLDA (mm)	VAZÃO GÁS	TIPO GÁS	VAZÃO PURGA
TIG	1	1	ER 90S B9	3,25	9	94	86,7	585,48	250	7	15l/min	ER 90S B9	30l/min
TIG	2	2	ER 90S B9	3,25	11	182	455,49	263,72	275	8			30l/min
GMAW	3	3	E 90C B9	1,2	25	210	500,29	629,64	280	9	20 l/min Ar + CO2	Ar	-
GMAW	4	3	E 90C B9	1,2	25	212	492,22	646,06	295	8			-
GMAW	5	3	E 90C B9	1,2	25	210	504,42	624,48	298	7			-
GMAW	6	4	E 90C B9	1,2	27	255	500,29	825,73	289	8			-
GMAW	7	4	E 90C B9	1,2	27	260	496,22	848,82	275	9			-
GMAW	8	4	E 90C B9	1,2	27	260	504,42	835,02	285	8			-
GMAW	9	4	E 90C B9	1,2	27	260	303,66	1.387,09	282	10			-
GMAW	10	4	E 90C B9	1,2	27	260	338,71	1.243,55	295	9			-
GMAW	11	5	E 90C B9	1,2	27	260	302,15	1.393,99	298	9			-
GMAW	12	5	E 90C B9	1,2	27	260	303,66	1.387,09	301	9			-
GMAW	13	5	E 90C B9	1,2	27	260	303,66	1.387,09	301	8			-
GMAW	14	5	E 90C B9	1,2	27	260	303,66	1.387,09	312	10			-
GMAW	15	5	E 90C B9	1,2	27	260	303,66	1.387,09	315	9			-
GMAW	16	5	E 90C B9	1,2	27	260	303,66	1.387,09	320	8			-
GMAW	17	5	E 90C B9	1,2	27	260	303,66	1.387,09	298	9			-
GMAW	18	6	E 90C B9	1,2	27	260	303,66	1.387,09	299	9			-
GMAW	19	6	E 90C B9	1,2	27	260	303,66	1.387,09	295	9			-
GMAW	20	6	E 90C B9	1,2	27	260	303,66	1.387,09	315	8			-
GMAW	21	6	E 90C B9	1,2	27	260	303,66	1.387,09	314	10			-
GMAW	22	6	E 90C B9	1,2	27	260	303,66	1.387,09	321	9			-
GMAW	23	6	E 90C B9	1,2	27	260	303,66	1.387,09	312	8			-
GMAW	24	6	E 90C B9	1,2	27	260	303,66	1.387,09	319	10			-
GMAW	25	7	E 90C B9	1,2	27	260	303,66	1.387,09	305	9			-
GMAW	26	7	E 90C B9	1,2	27	260	303,66	1.387,09	304	9			-
GMAW	27	7	E 90C B9	1,2	27	260	303,66	1.387,09	306	10			-
GMAW	28	7	E 90C B9	1,2	27	260	303,66	1.387,09	305	9			-
GMAW	29	7	E 90C B9	1,2	27	260	303,66	1.387,09	311	9			-
GMAW	30	7	E 90C B9	1,2	27	94	303,09	502,43	315	7			-
GMAW	31	7	E 90C B9	1,2	27	182	302,52	974,61	320	8			-
GMAW	32	7	E 90C B9	1,2	27	280	301,96	1.502,17	321	9			-
GMAW	33	8	E 90C B9	1,2	27	280	301,41	1.504,93	310	8			-
GMAW	34	8	E 90C B9	1,2	27	280	300,86	1.507,67	305	10			-
GMAW	35	8	E 90C B9	1,2	27	280	300,32	1.510,40	298	9			-
GMAW	36	8	E 90C B9	1,2	27	280	299,78	1.513,10	315	11			-
GMAW	37	8	E 90C B9	1,2	27	280	299,25	1.515,80	312	10			-
GMAW	38	8	E 90C B9	1,2	27	280	298,72	1.518,47	315	9			-
GMAW	39	8	E 90C B9	1,2	27	280	298,2	1.521,13	320	9			-
GMAW	40	8	E 90C B9	1,2	27	280	297,68	1.523,78	301	8			-
GMAW	41	8	E 90C B9	1,2	27	280	297,17	1.526,41	295	7			-
GMAW	42	9	E 90C B9	1,2	26	210	296,66	1.104,29	298	7			-
GMAW	43	9	E 90C B9	1,2	26	215	296,16	1.132,50	295	7			-
GMAW	44	9	E 90C B9	1,2	26	212	295,66	1.118,58	310	8			-
GMAW	45	9	E 90C B9	1,2	26	210	295,17	1.109,89	305	8			-
GMAW	46	9	E 90C B9	1,2	26	218	294,68	1.154,08	315	9			-
GMAW	47	9	E 90C B9	1,2	26	215	294,19	1.140,07	320	7			-
GMAW	48	9	E 90C B9	1,2	26	210	293,71	1.115,38	291	8			-
GMAW	49	9	E 90C B9	1,2	26	210	293,23	1.117,19	295	9			-
GMAW	50	9	E 90C B9	1,2	26	215	292,76	1.145,64	301	8			-
GMAW	51	9	E 90C B9	1,2	26	218	292,3	1.163,48	315	7			-

APÊNDICE B - ENSAIO RADIOGRÁFICO – LAUDO.

RELATÓRIO DE REGISTRO DE RESULTADOS DE ENSAIO		Nº CAT-RG-0009/11 DATA: 06/04/2011 FOLHA: 01 de 01									
RADIOGRAFIA											
Cliente		OS 0407/08	Procedimento de Ensaio / Revisão I-RG-7.5.1-01 REV. 16								
Obra / Local	Fabricante / Montadora A MESMA	Norma de Referência-Edição / Critério de Aceitação ASME B31.3 ED.2008									
Identificação do Equipamento ESTUDO PARA MESTRADO		Componente CORPO DE PROVA									
Material / Classe / Grupo ASTM A-335 Gr P91	Técnica Radiográfica ☐ PS-VS ☐ PS-VS (PAN) ☒ PD-VS ☐ PD-VD ☐ PD-VD (SOBR.)										
Tipo de Fonte ☐ Raio-X ☒ IR-192 ☐ CO-60 ☐ SE-75	N.º Fonte/Dimensões (mm) IrS 6148 / 2,70 x 1,5		Atividade (Ci) / kVxmA 42,48 Ci								
Equipamento/ Componente	Junta	Posição	Espessura Mat. Base + Reforço (mm)	Diâmetro Ø	Distância Fonte-Peça (mm)	Distância Peça-Filme (mm)	Tipo de Filme	Soldador	Desconti- nuidade	Laudo Apr. Rep.	
1 CORPO DE PROVA	CP-01	1	28,6+3,0	12"	320	31,6	02	----	E-P	X	
2 CORPO DE PROVA	CP-01	2	28,6+3,0	12"	320	31,6	02	----	P	X	
3 CORPO DE PROVA	CP-01	3	28,6+3,0	12"	320	31,6	02	----	P	X	
4 CORPO DE PROVA	CP-01	4	28,6+3,0	12"	320	31,6	02	----	P	X	
5											
6											
7											
8											
9											
10											
11											
12											
13											
14											
15											
16											
17											
18											
19											
20											
Observações/Notas:  PROCESSO DE SOLDAGEM (TIG+AT)											
Códigos: RB - Repetir o Filme T - Trinca P - Porosidade IM - Inclusão Metálica CR - Cratera EC - Exame Complementar FF - Falta de Fusão E - Inclusão de Escória M - Mordedura PO - Passe Oco - Sem Descontinuidade FP - Falta de Penetração OX - Inclusão de Óxido CO - Concavidade EP - Pen. Excessiva											
Nome: CHARLES JOSÉ ALVES TAVARES N.º IDENT.: SNQC/ERD-0799-ER-N2-S-RG Assinatura: 				CLIENTE Nome: _____ Assinatura: _____ DATA: ____/____/____				FISCALIZAÇÃO Nome: _____ Assinatura: _____ DATA: ____/____/____			

APÊNDICE C - REGISTRO DE TRATAMENTO TÉRMICO E GRÁFICOS.

REGISTRO DE TRATAMENTO TÉRMICO:001						
RTT:001		NORMA:ASME B 31.3/N-133 Rev.J		DATA:01/04/2011		
EQUIPAMENTO:TUBULAÇÃO		MÉTODO DE EXECUÇÃO:TRATAMENTO TÉRMICO LOCALIZADO		PROCEDIMENTO:IT.SCQ-001		
GRAFICO:001		TIPO DE TRATAMENTO:ALIVIO DE TENSÕES		IEIS:-----		
EQUIPE:ROBSON.DIOGO		MÉTODO DE AQUECIMENTO:RESISTÊNCIA ELÉTRICA		Nº DA MAQUINA:01		
MÉTODO DE FIXAÇÃO:CURTO CIRCUITO						
Termopar:TIPO K	Cert. Aferição:0003/11	Validade:02/2012	Certificadora:MAXXTRONIC			
Registrador nº:JC040	Cert. Aferição:02/234/11	Validade:02/2012	Certificadora:ISOMETRO			
Controlador nº:JC010	Cert. Aferição:02/204/11	Validade:02/2012	Certificadora:ISOMETRO			
Controlador nº:JC011	Cert. Aferição:02/205/11	Validade:02/2012	Certificadora:ISOMETRO			
Controlador nº:JC012	Cert. Aferição:02/206/11	Validade:02/2012	Certificadora:ISOMETRO			
Controlador nº:JC013	Cert. Aferição:02/207/11	Validade:02/2012	Certificadora:ISOMETRO			
Controlador nº:JC014	Cert. Aferição:02/208/11	Validade:02/2012	Certificadora:ISOMETRO			
Controlador nº:JC015	Cert. Aferição:02/209/11	Validade:02/2012	Certificadora:ISOMETRO			
PARÂMETROS P/ TRATAMENTO TÉRMICO			CROQUIS TÍPICO DA JUNTA			
Início do Ciclo:17:50 Término do Ciclo:16:21 Controle de Temperatura:300°C Taxa de Resfriamento (°C/H): ≤150°C Taxa de Aquecimento (°C/H): ≤150°C Tempo de Patamar (Hs): ≥2h Temperatura de Patamar (°C): 704°C a 760°C Diferença entre Termopares: 50°						
IDENTIFICAÇÃO DE CORES	PÚRPURA	VERMELHO	VERDE	AZUL	MARRON	PRETO
CANAIS	1	2	3	4	5	6
ISOM.	C P	C P				
JUNTAS	-----	-----				
DIAM.	12"	12"				
ESP.						
MATERIAL	A.L	A.L				
HORA	TEMPERATURA					
17:50	226	219				
18:50	325	320				
19:50	426	421				
20:50	522	518				
21:50	623	617				
22:50	720	716				
23:50	718	719				
00:50	720	717				
01:50	724	723				
02:50	720	720				
03:50	720	720				
04:50	720	720				
05:50	714	712				
06:50	637	632				
07:50	580	576				
08:50	536	532				
09:50	487	481				
10:50	451	447				
11:50	413	408				
12:50	377	372				
13:50	352	347				
14:50	320	316				
15:50	295	291				
16:21	288	282				
APROVAÇÃO DO ACOMPANHAMENTO						
Responsável:	Inspetor:	Coordenador de CQ:	Cliente:			
 JAMBEIRO CALDEIRARIA E USINAGEM LTDA Roriano P.S. Amorim Enc. Tratamento Térmico (12) 8814-1241	 Uilton Souza Costa Inspetor de Qualidade ASME B31.1 ASME VIII DIV. 1 01/04/11					

12 ANEXO FOTOGRÁFICO

Neste anexo estão mostradas as metalografias feitas nas ZTA's entre os cordões da solda de reparo com passe de revenimento.



Aumento de 100x



Aumento de 200x



Aumento de 500x



Aumento de 1000x