

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

ALDO JOÃO ALBERTO

**COMPARAÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS EM SOLDAS DE REPARO NO AÇO
ASTM A 335 – GR P 91 SUBMETIDAS AOS TRATAMENTOS DE ALÍVIO DE
TENSÃO POR TRATAMENTO TÉRMICO E
POR VIBRAÇÃO SUB-RESSONANTE**

SANTOS – SP

2016

ALDO JOÃO ALBERTO

**COMPARAÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS EM SOLDAS DE REPARO NO AÇO
ASTM A 335 – GR P 91 SUBMETIDAS AOS TRATAMENTOS DE ALÍVIO DE
TENSÃO POR TRATAMENTO TÉRMICO E
POR VIBRAÇÃO SUB-RESSONANTE**

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.

SANTOS/SP

2016

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

ALBERTO, Aldo João.
Comparação das tensões residuais em soldas de reparo no aço
ASTM A 335 Gr P 91 submetidas aos tratamentos de alívio de tensão
por tratamento térmico e por vibração sub-ressonante
Aldo João Alberto
2016.
88p.

Orientador: Dr. José Carlos Morilla.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Santa Cecília,
Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA MECÂNICA, Santos,
SP, 2016.
1. Soldagem. 2. Dureza. 3. Aço liga 4. Vibração sub-ressonante.
I. Morilla, José Carlos
II. Comparação das tensões residuais em soldas de reparo no aço
ASTM A 335 Gr P 91 submetidas aos tratamentos de alívio de tensão
por tratamento térmico e por vibração sub-ressonante

“Dedico esse trabalho à minha esposa Sonia e aos meus filhos Ana Carolina, Filipe e Lucas, pelo incentivo na luta por mais um ideal”.

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

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

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.

À empresa **TRAMONTINA ELETRIK S.A.**, (**Sr. Juliano Rodrigo Supptitz**) pelo apoio na realização dos ensaios de alívio de tensões por vibração sub-ressonante .

Agradeço ao CENTRO UNIVERSITÁRIO da FEI, representado pelo Prof. Dr. Sergio Delijaicov, pelo apoio na realização dos ensaios de furo cego e dureza nos corpos de prova, necessários para a análise das tensões residuais, objeto deste trabalho.

Aos técnicos de laboratório:

Airton Luiz Morassi;

Nilton Cesar Barbosa;

William Pereira dos Santos;

Wilson Roberto de Oliveira Santos;

Fabrcio Piedade.

Agradeço ao amigo **Me Engº Natal de Jesus Gaspar**, pelo apoio incansável na conclusão do trabalho.

Agradeço ao amigo **Me Engº Carlos Augusto Pereira Martins**, pelas dicas no que se refere a vibrações sub-ressonantes.

“A vitória não pertence aos mais fortes, mas sim aos que a perseguem
por mais tempo!”

Napoleão Bonaparte

RESUMO

Tubulações de aços ligados que trabalham com pressão e são construídas a partir de juntas soldadas com reparos subsequentes devem ser submetidas a tratamento térmico pós-soldagem, esse tratamento térmico, que dependendo do local, tipo de instalação, nem sempre se torna fácil à execução. Assim, faz-se necessário encontrar novas formas de se reparar tubulações sem a aplicação de um tratamento térmico adicional pós-reparo. Neste trabalho é realizado um estudo sobre a possível substituição do tratamento térmico por tratamento por vibração sub-ressonante em solda de reparo. Neste estudo foi feita uma abordagem sobre as técnicas de vibração sub-ressonante, utilizadas para aliviar tensão em soldas de reparos comparando ao tratamento térmico, de acordo com as especificações da norma ASME B31.3 - 2012 , e também, por uma comparação entre as durezas encontradas na zona termicamente afetada e no metal de adição na solda de reparo. O reparo foi executado com cordões de solda depositados em um chanfro que simulou um defeito existente. O tipo de dureza escolhido para comparação foi à dureza Vickers e o método usado para determinação das tensões residuais foi o método do furo cego, que é uma técnica em que são utilizados extensômetros elétricos (*strain gages*).

Palavras-chave: Soldagem. Dureza. Aço liga. Vibração sub-ressonante.

ABSTRACT

Bonded steel pipes that work under pressure and are built from welded joints along with subsequent repairs must be undergone a post weld heat treatment. This heat treatment, depending on the local, type of facility, is not always easy to be done. Thus, it's necessary to find new ways to repair pipes without the application of an additional post repair heat treatment. At this paper, a study has been carried out about the possible replacement of the heat treatment to a sub resonant vibration treatment on weld repair as well as an approach about the sub resonant techniques of vibration, used to relieve tension within the weld repair comparing to the heat treatment, according to the specifications of ASME B31.3-2012 , also, through a comparison between the hardness found in the heat-affected zone (HAZ) and at the filler metal in the weld repair. The repair was made with weld beads which were deposited on a chamfer that simulated an existing defect. The type of hardness chosen for the comparison was Vickers and the method used to determine the residual tensions was the blind-hole, a technique that electrical extensometers (strain gages) are used.

Keywords:Welding. Hardness. Alloy steel. Sub-resonant vibration

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Curva CCT de um aço P91 – microestrutura e dureza- HV10 (HUYSMANS e VEKEMAN, 2009).	21
Figura 2 – (a) Conjunto de barras presas nas extremidades, (b) Barra central sendo aquecida. (Modenesi et al., 2012).	25
Figura 3 – Comparação entre as tensões residuais desenvolvidas na montagem de três barras (a) e as tensões residuais longitudinais ao longo da direção transversal (y) a uma solda de topo (b) (Modenesi et al., 2012).	26
Figura 4 – Variação da tensão (σ_c) com a temperatura na barra central. (Modenesi et al., 2012).	27
Figura 5 – Desenvolvimento de tensões residuais longitudinais durante a soldagem (Modenesi et al., 2012).	28
Figura 6 – Tempo e temperatura de TTAT de um aço ASTM A 335 Gr P91 (Adaptado de GASPAR, 2013).	33
Figura 7 – Localização da zona sub-harmônica ou sub-ressonante (Martins, 2004).	34
Figura 8 – Estudo do efeito das vibrações na dissipação de energia – (Adaptado de MARTINS, 2014 et al., Skinner – 1987).	35
Figura 9 – Curva de ressonância da peça obtida através do equipamento Meta-lax (Fonte: Meta-lax-2013).	37
Figura 10 – Segunda leitura da curva de alívio de tensões após o tratamento.	38
Figura 11 – Alteração e estabilização da curva de ressonância após a aplicação da frequência sub-harmônica de alívio de tensões Fonte: Meta-lax (2013).	39
Figura 12 – Exemplos de Extensômetros. (a) Roseta Delta (b) representação gráfica em 3D (Fonte: Nunes (2006).	40
Figura 13 – Ângulo das tangentes à esfera, para a relação $d/D = 0,375$ na dureza Brinell (adaptado - Souza, 2004).	43
Figura 14 - “Setor circular” de tubo (a) representação gráfica (b) peça soldada. (ASTM A 335 Gr P91) – Com adaptação	46
Figura 15 – Passes de soldas de reparo aplicados na solda existente (Elaborada pelo autor).	47
Figura 16 - Máquina de corte com jato de água.(Elaborada pelo autor).	48
Figura 17 – Posicionamento do bico para execução do corte do corpo de prova. (Elaborada pelo autor).	49

Figura 18 – Corte corpo de prova. (Elaborada pelo autor).	49
Figura 19 – Local de retirada e identificação dos corpos de prova.	50
Figura 20 – Puncionamento dos corpos de provas. (Elaborada pelo autor).....	50
Figura 21 – Lixamento do corpo de prova. (Elaborada pelo autor).	51
Figura 22 – Gráfico com os parâmetros utilizados no TTAT. (Elaborado pelo autor).	52
Figura 23 – Gráfico com os parâmetros utilizados no ATVS. (Relatório Tramontina – Apêndice B).....	53
Figura 24 – Posição do furo em relação a roseta após a medição das tensões residuais pelo método do furo cego. (Elaborada pelo autor).	54
Figura 25 – Identificação e posição dos eixos da roseta em relação ao cordão de solda. (Elaborada pelo autor).	54
Figura 26 – Varredura de medição de dureza Vickers. (Elaborada pelo autor).....	55
Figura 27 – Gráfico tensão versus profundidade obtido pelo processo do furo cego – (a) CP 1 e (b) CP 2, sem tratamento de alívio de tensões residuais.	56
Figura 28 – Gráfico tensão versus profundidade obtido pelo processo do furo cego – (a) CP 3 e (b) CP 4, com TTAT.	59
Figura 29 – Gráfico tensão versus profundidade obtido pelo processo do furo cego –	61
Figura 30 – Tendência das tensões residuais no CP 1 (a) e CP2(b) sem tratamento de alívio.	65
Figura 31 – Tendência das tensões residuais no CP 3 (a) e CP4(b) com TTAT.....	65
Figura 32 – Tendência das tensões residuais no CP 5 (a) e CP 6(b) com ATVS.	66

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Valores do coeficiente de dilatação térmica (a 20°C) de alguns metais e ligas – (Modenesi et al., 2012).	24
Quadro 2 – Principais processos de soldagem: aporte térmico e aplicações (adaptado de Ferrante – 2002).....	30
Quadro 3 - Métodos para aliviar tensões residuais (Okimura & Taniguchi, 1982). (Adaptado de MARTINS, 2014).....	31
Quadro 4 – Tempos necessários para alívio de tensões.	38
Quadro 5 – Parâmetros de soldagem utilizados para o reparo.(elaborada pelo autor).	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química de aço ASTM A 335 Gr P91 (Adaptado de GASPAR – 2013).....	17
Tabela 2 – Propriedades mecânicas à temperatura ambiente de um aço ASTM A335Gr P91. (Adaptado de GASPAR. 2013)	17
Tabela 3 – Parâmetros para execução do pré-aquecimento e controle da temperatura de interpasse (ASME B31. 3 - 2014 – adaptado de GASPAR, 2013)...	23
Tabela 4 – Parâmetros para execução de tratamento térmico de alívio de tensões e dureza máxima permitida (ASME B31. 3-2014 com adaptação).....	32
Tabela 5 – Composição química do metal base e consumível de soldagem (adaptado de GASPAR, 2013).	46
Tabela 6 – Durezas medidas nos corpos de prova sem alívio de tensões – CP1.....	57
Tabela 7 – Durezas medidas nos corpos de prova sem alívio de tensões – CP2.....	58
Tabela 8 – Durezas medidas nos corpos de prova com TTAT – CP 3.....	60
Tabela 9 – Durezas medidas nos corpos de prova com TTAT – CP 4.....	60
Tabela 10 – Durezas medidas nos corpos de prova com ATVS – CP 5.	62
Tabela 11 – Durezas medidas nos corpos de prova com ATVS – CP 6.	63
Tabela 12 – Média das durezas e das tensões residuais – SEM TRATAMENTO, COM TTAT e ATVS.....	66

LISTA DE ABREVIATURAS

A – Intensidade de Corrente Elétrica (amper)
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*
CCT - “*Continuous Cooling Transformation*” - Transformação de resfriamento contínuo
CFC – Cúbico de Face Centrada
CP – Corpo de Prova
END – Ensaio Não Destrutivo
EPS – Especificação do Procedimento de Soldagem
h - Hora
HB – Dureza Brinell
HV – Dureza Vickers
J – Joule – unidade de energia [N.m]
MB – Metal Base
MPa – Megapascal – unidade de pressão [Pa] [N/m²]
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.
vol. – Volume
Vo – Tensão elétrica [V]
ZTA – Zona Termicamente Afetada

LISTA DE SÍMBOLOS

°C – Grau Celsius

°F – Grau Fahrenheit

μm - Micrômetro

σ_1 – Tensão máxima admissível (Smax);

σ_2 – Tensões mínimas admissíveis (Smin);

σ_{eq} - Tensão equivalente Von Mises - (MPa);

x - Profundidade da medida do furo cego, mm.

C – Carbono

Cr - Cromo

Mn - Manganês

Mo – Molibdênio

N - Nitrogênio

Nb – Nióbio

V – Vanádio

W - Tungstênio

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO-----	17
2	AÇO LIGA ASTM A335 Gr P91 -----	19
	2.1 Histórico da evolução dos aços ferríticos Cr-Mo para aplicação em altas temperaturas -----	19
	2.2 A Especificação do aço ASTM A 335 Gr P91 -----	20
	2.3 Curva CCT de um aço ASTM A 335 Gr P91 -----	20
3	A NORMA ASME B31.3-----	22
	3.1 Cuidados a serem tomados na soldagem do aço ASTM A 335 Gr P 91 22	
	3.2 Pré-aquecimento-----	22
	NOTA: A temperatura de interpasse deve estar entre 175°C - 230°C-----	23
	3.3 Temperatura de interpasse-----	23
	3.4 Pós-aquecimento -----	23
	3.5 Resfriamento -----	23
4	TENSÕES RESIDUAIS -----	24
	4.1 Controle e Alívio de Tensões Residuais-----	29
	4.2 Conceito de Aporte Térmico (H)-----	29
5	ALÍVIO DE TENSÕES POR TRATAMENTO TÉRMICO (TTAT)-----	31
6	ALÍVIO DE TENSÕES POR VIBRAÇÕES SUB-RESSONANTES (ATVS) ---	34
	6.1 Aplicações do ATVS-----	37
7	MEDIÇÕES DE TENSÕES PELO MÉTODO DO “FURO CEGO” -----	40
8	ENSAIO DE DUREZA VICKERS -----	43
	8.1 Histórico-----	43
	8.2 Vickers-----	43
9	MATERIAIS E MÉTODOS-----	46
	9.1 Confecção da peça de teste -----	46
	9.2 Obtenção dos corpos de provas-----	48
	9.3 Preparação dos corpos de provas-----	51
	9.4 Procedimento do alívio de tensões residuais por tratamento térmico usado nos corpos de prova 3 e 4-----	51
	9.5 Procedimento do alívio de tensões residuais por vibrações sub- ressonantes usado nos corpos 5 e 6-----	52
	9.6 Ensaio de tensões residuais pelo método do furo cego -----	53
	9.7 Ensaio de dureza Vickers-----	55

10	RESULTADOS-----	56
10.1	Corpos de prova 1 e 2 (sem tratamento para alívio de tensões) -----	56
10.1.1	Tensões residuais (furo cego) -----	56
10.1.2	Dureza Vickers -----	57
10.2	Corpos de prova 3 e 4 (com TTAT) -----	58
10.2.1	Tensões residuais (furo cego) -----	59
10.2.2	Dureza Vickers -----	60
10.3	Corpos de prova 5 e 6 (com ATVS)-----	61
10.3.1	Tensões residuais (furo cego) -----	61
10.3.2	Dureza Vickers -----	62
11	DISCUSSÃO -----	64
12	CONCLUSÕES-----	68
13	PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS -----	70
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS -----	71
	APÊNDICE-----	75

1 INTRODUÇÃO

Os aços ASTM A335 Gr P91, também conhecidos como P91 ou T91, pertencem ao grupo dos aços Cr-Mo resistentes à alta temperatura (>500°C). Este grupo de aços é bem abrangente, compreendendo aços de menor teor de liga, como por exemplo, o Grau 11 com apenas 1,25% de Cr e 0,5% de Mo, até aços com elevado teor de liga, como o próprio Grau 91 com 9% de Cr, 1% de Mo e ainda adições de Nb, V e N (BRANDI; GARCIA, 2011).

Na tabela 1 é apresentada em destaque na cor vermelho a composição química um aço ASTM A335 Gr P91.

Tabela 1 - Composição química de aço ASTM A 335 Gr P91 (Adaptado de GASPAR – 2013).

GRAU	COMPOSIÇÃO %							OUTROS
	C	Mn	P (max)	S (max)	Si	Cr	Mo	
P91	0,08-0,12	0,30 a 0,60	0,020	0,010	0,20 a 0,50	8,00 a 9,50	0,85 a 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.

O aço ASTM A335 Gr P91 foi desenvolvido nos anos 70, para aplicação na indústria nuclear. Suas propriedades mecânicas o qualificaram para aplicações em vasos de pressão e tubulações em instalações termoelétricas e petroquímicas (BRANDI; GARCIA, 2011).

Na tabela 2, estão mostradas as propriedades mecânicas para o aço ASTM A335 Gr P91 à temperatura ambiente.

Tabela 2 – Propriedades mecânicas à temperatura ambiente de um aço ASTM A335Gr P91. (Adaptado de GASPAR. 2013).

AÇO	LIMITE RESISTÊNCIA (MPa) faixa.	LIMITE ESCOAMENTO (MPa) min.	ALONGAMENTO (%) min.	TENACIDADE (J) min.	DUREZA (máx.) HV
A335 P91	585-760	415	20	35	253

Em comparação com os aços carbonos, o aço ASTM A335 Gr P91 apresenta maior resistência à fluência, elevada resistência à corrosão e à oxidação em alta temperatura (>500°C):

Sabe-se que estas propriedades são altamente dependentes de um adequado controle microestrutural do aço, conferido pela composição química e sequência de tratamentos térmicos efetuados durante a fabricação do mesmo.

Em 1983 o aço ASTM A335 Gr P91 foi aprovado para aplicação em tubos de caldeiras, para construção (BRANDI; GARCIA, 2011).

Tubos deste tipo de aço são fabricados sem costuras, posteriormente expostos a pressões e temperaturas entre 500°C e 600°C. Esses tubos são aplicados em componentes diversos, tais como superaquecedores de caldeiras de centrais termoelétricas (ROCHA, 2012).

Com relação à soldagem do aço ASTM A335 Gr P91, a norma ASME B31.3-2014 (que determina os parâmetros de projeto, fabricação e montagens de tubulações) é recomendado que seja executado um tratamento térmico de alívio de tensões (TTAT), que está detalhado no capítulo 5 deste estudo.

Outra técnica usada para o alívio de tensões que foi descrita por Skinner em 1987 é o alívio de tensões por vibração sub-ressonante (ATVS), que segundo Martins (2012), é realizada por vibração sub-ressonante e, teve início como um teste de fadiga na Segunda Guerra Mundial. Na época, a Alemanha aplicava teste de fadiga nos cascos dos navios e, os Estados Unidos, nas asas dos aviões. O uso da vibração ressonante nesses testes levou os cientistas e os engenheiros a concluir que poderiam usar as vibrações para eliminar as tensões residuais de peças soldadas e fundidas, como uma opção ao tratamento térmico convencional.

Observa-se, então, que é possível executar uma redução de tensão em peças soldadas por meio de tratamento térmico e por meio de aplicação de vibrações sub-ressonantes.

O objetivo deste trabalho é comparar as tensões residuais e a dureza em corpos de prova de aço ASTM A335 Gr 91, com solda de reparo que sofreram TTAT e ATVS, o objetivo secundário verificar-se-á se o ATVS atende as recomendações da norma ASME B31. 3 – 2012.

Para tal investigação foram confeccionados corpos de prova soldados, numerados de um a seis, sendo dois sem tratamentos de alívio de tensões, dois com TTAT e dois com ATVS.

Após o TTAT e o ATVS, foram medidas as tensões residuais e as durezas na região da solda e na zona termicamente afetada (ZTA) do reparo.

2 AÇO LIGA ASTM A335 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 (GASPAR, 2013).

A partir do ano de 2000, os aços Cr-Mo convencionais passaram a ser utilizados em condições críticas de temperatura e pressão. Na última década, aços ferríticos com composição química modificada 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).

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 termoelétricas. O P22 foi usado extensivamente a temperaturas de até 538°C (1000°F). Ao longo dos anos, houve uma ênfase na aplicação desses aços, que permitiam às usinas de energia operar em temperaturas superiores e, assim, obterem uma maior eficiência energética e menor impacto ambiental (OLIVEIRA, 2010).

2.1 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 (1000°F) e 30 MPa de pressão. A 650°C (1200°F) o ganho em eficiência situa-se em 8% (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 A335 Gr P91 poderia 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, e mais tradicionalmente conhecido como aço Gr P91 ou P91 (HALD, VISWANATHAN, ABE, 2006).

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

2.2 A Especificação do aço ASTM A 335 Gr P91

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 1 da página 17.

Nesta tabela, pode se observar os elementos de liga para o aço ASTM A335 Gr P91 e, ainda é possível verificar outros elementos de ligas que são adicionados neste aço.

Os tubos de aço ASTM A335 Gr P91 são fabricados sem costura e, são usados em situações onde a temperatura de trabalho está entre 500°C e 650°C.

2.3 Curva CCT 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. Conforme a curva CCT (*“continuous cooling transformation”*) transformação de resfriamento contínuo, este aço, apresenta esta característica diferenciada. Na figura 1 da página 21 é mostrado um diagrama tempo, temperatura e transformação (CCT) para o aço ASTM A335 Gr P91 (FERREIRA, 2010).

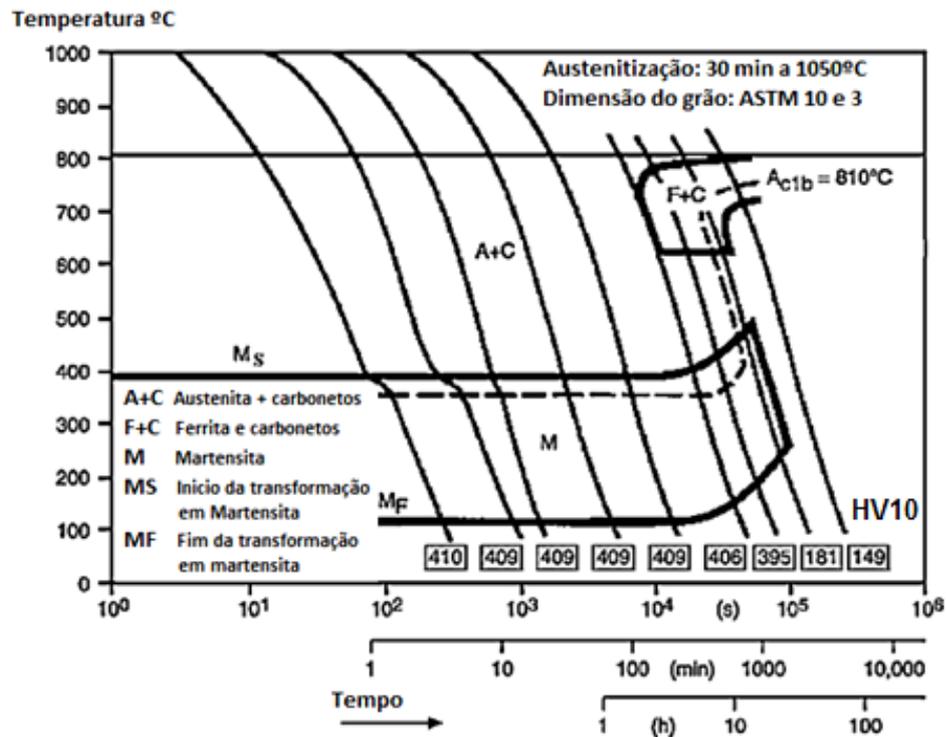


Figura 1 – Curva CCT de um aço P91 – microestrutura e dureza- HV10 (HUYSMANS e VEKEMAN, 2009).

Na figura 1 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 dureza e resistência mecânica elevadas, e valor de tenacidade maior ou igual a 35J (HUYSMANS e VEKEMAN, 2009).

3 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 (GASPAR, 2013). Para o projeto, fabricação e montagens de tubulações o código ASME recomenda as seguintes normas:

- ASME B31.1- *Power Piping*, 2014;
- ASME B31.3 - *Process Piping*, 2014;

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. (GASPAR, 2013). Será utilizada a norma ASME B31. 3 – 2014, também denominada de B31. 3 como referência para os critérios adotados e descritos a seguir.

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

Segundo Gaspar (2013), as recomendações prescritas na norma ASME B31.3 – 2012 (revisada em 2014), alguns cuidados devem ser tomados para a soldagem do aço ASTM A 335 Gr P91, e dentre essas recomendações, algumas são exemplificadas a seguir.

3.2 Pré-aquecimento

Um controle do pré-aquecimento (aplicação controlada de calor no metal base (MB), é essencial nas regiões adjacentes a 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 - 2014 (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 (GASPAR, 2013).

Na tabela 3 da página 23, é apresentado em destaque, a temperatura mínima de pré-aquecimento de 200°C recomendado para o aço ASTM A 335 Gr P91

Tabela 3 – Parâmetros para execução do pré-aquecimento e controle da temperatura de interpasse (ASME B31. 3 - 2014 – adaptado de GASPAR, 2013).

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)	TEMPERATURA MÍNIMA REQUERIDA (°C)
15E	5	Aços ligas 9Cr-1Mo-V	Todas	Todas	200

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

A faixa de temperatura recomendada para o controle de temperatura entre os passes executados deve estar entre 175 °C a 230 °C

3.3 Temperatura de interpasse

Conforme estabelecido na norma ASME B31. 3 - 2014 a 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 °C e 230°C, conforme mostrada na nota da tabela 3 (GASPAR, 2013).

3.4 Pós-aquecimento

A norma AWS D10. 10 - 2009 determina uma faixa de pós-aquecimento variando de 149 a 316°C aplicado no período mínimo de duas horas para cada 25 mm de espessura, esta recomendação é para permitir a difusão do hidrogênio retido durante a soldagem, com a finalidade de reduzir o teor de hidrogênio introduzido na operação de soldagem, uma vez que sua presença favorece o aparecimento de fissuração a frio.

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, espera-se que toda a austenita formada (ferro com estrutura cúbica de face centrada – CFC) seja transformada para martensita, que então, é revenida no tratamento térmico sub-sequente (GASPAR, 2013).

4 TENSÕES RESIDUAIS

Devido à sua importância para a soldagem, as tensões residuais associadas com a ocorrência de deformação plástica não uniforme por efeitos térmicos, devem ser consideradas nesta aplicação.

Quando um material é aquecido, suas dimensões aumentam proporcionalmente à variação da temperatura ($\Delta T = T_f - T_i$), o que é descrito pela equação da dilatação térmica linear, equação 1 (MODENESI et al., 2012)

$$\Delta l = l_f - l_i = l_i \cdot \alpha \Delta T \quad (1)$$

Sendo: (Δl) a variação do comprimento, que é o comprimento final (l_f), menos o comprimento inicial (l_i) e (α), é o coeficiente de dilatação térmica linear.

Para pequenos intervalos de temperatura, α pode ser considerado como constante conforme mostra o quadro 1.

Quadro 1 – Valores do coeficiente de dilatação térmica (a 20°C) de alguns metais e ligas – (Modenesi et al., 2012).

MATERIAL	α ($10^{-6}/K$)
ALUMÍNIO	23
AÇO CARBONO	12
AÇO INOXIDÁVEL (AISI 304)	17,3
COBRE	17,0
NÍQUEL	13
TUNGSTÊNIO	4,5

Se um objeto for aquecido e resfriado de modo uniforme e não existirem restrições às suas variações dimensionais, estas não resultam em efeitos mecânicos importantes no objeto, isto é, após o ciclo térmico, o objeto não deve apresentar nem tensões residuais nem distorções. Contudo, se a variação de temperatura não for uniforme ao longo da peça ou, se esta não puder se expandir ou, contrair livremente durante o ciclo térmico, tensões residuais e/ou distorções podem se desenvolver (MODENESI et al., 2012).

Como um exemplo inicial, considere três barras de um aço de baixo carbono de mesmo comprimento e seção que estão unidas em suas extremidades por duas

bases, idealmente rígidas e indeformáveis de forma que nenhuma pode se alongar ou contrair independentemente das outras (figura 2).

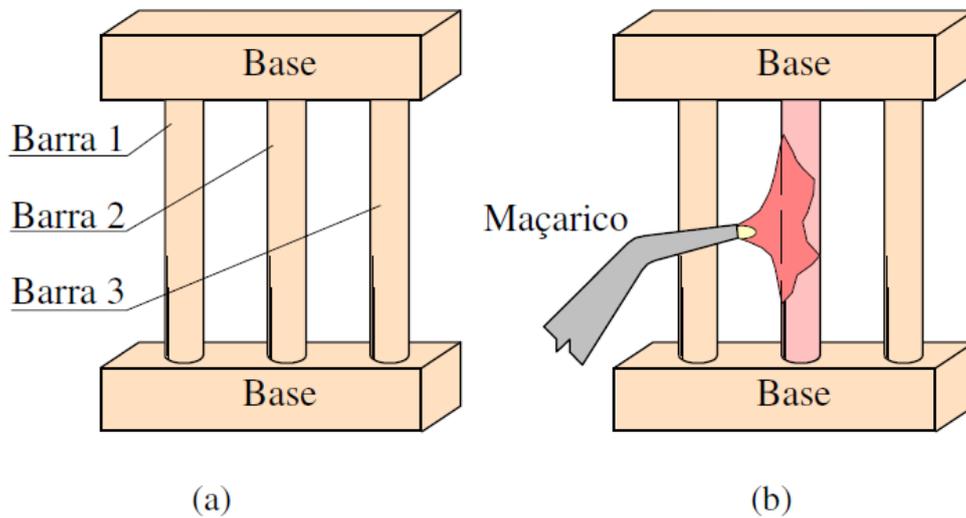


Figura 2 – (a) Conjunto de barras presas nas extremidades, (b) Barra central sendo aquecida. (Modenesi et al., 2012).

Se a barra central (barra 2) for aquecida enquanto as externas forem mantidas a temperatura ambiente, essa tende a se dilatar, mas é impedida pelas outras através das bases. Assim, tensões de compressão se desenvolvem na barra central e, nas barras externas, tensões de tração de magnitude igual à metade do valor na barra central, pois, pela equação 2, tem-se:

$$\sigma_1 A_1 + \sigma_2 A_2 + \sigma_3 A_3 = 0 \quad (2)$$

Em que σ_1 , σ_2 , σ_3 e A_1 , A_2 , A_3 são, respectivamente, a tensão média e a área da seção transversal de cada barra. Considerando que as áreas das seções das barras são iguais ($A_1 = A_2 = A_3$) e que o mesmo ocorre com a tensão nas barras externas ($\sigma_1 = \sigma_3$), pela equação 3, tem-se 3:

$$\sigma_1 = -\frac{\sigma_2}{2} \quad (3)$$

Na figura 3 da página 26 mostra a comparação entre as tensões residuais desenvolvida nas três barras e uma solda de topo.

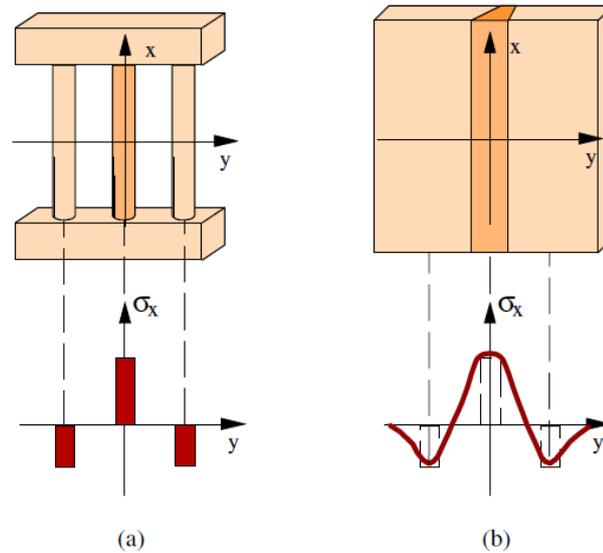


Figura 3 – Comparação entre as tensões residuais desenvolvidas na montagem de três barras (a) e as tensões residuais longitudinais ao longo da direção transversal (y) a uma solda de topo (b) (Modenesi et al., 2012).

Na figura 3 é ilustrada a evolução da tensão longitudinal média na barra central em função de sua temperatura. No início do aquecimento (figura 3, a-b), as tensões e deformações resultantes da dilatação da barra central serão elásticas. Como as barras mantêm o mesmo comprimento aproximado, a dilatação térmica tem que ser compensada por deformações elásticas, conforme equação 4.

$$\frac{\sigma_c}{Et} = \alpha\Delta T + \frac{\sigma_l}{E} \quad (4)$$

Sendo que:

E e Et são, respectivamente, os módulos de elasticidade do material à temperatura ambiente e à temperatura (T) da barra central, e (σ_c) e (σ_l) são os valores de tensão na barra central e nas barras laterais. Como as barras têm a mesma seção, $\sigma_l = -0,5\sigma_c$, e, assim se obtém a equação 5:

$$\sigma_c = \alpha\Delta T \frac{2E}{1 + 2E/Et} \quad (5)$$

Quando a tensão na barra central (σ_c) atinge o limite de escoamento, esta barra passa a se deformar plasticamente (ponto B, figura 4 da página 27). Considerando um aço com um limite de escoamento de 250 MPa, $E = Et = 210$ GPa e $\alpha = 12 \times 10^{-6} \text{m}/(\text{m } ^\circ\text{C})$, a temperatura na barra central para o início de sua deformação plástica pode ser estimada, com a equação 5, em cerca de 175°C (considerando $T_0 = 25^\circ\text{C}$) (MODENESI et al., 2012).

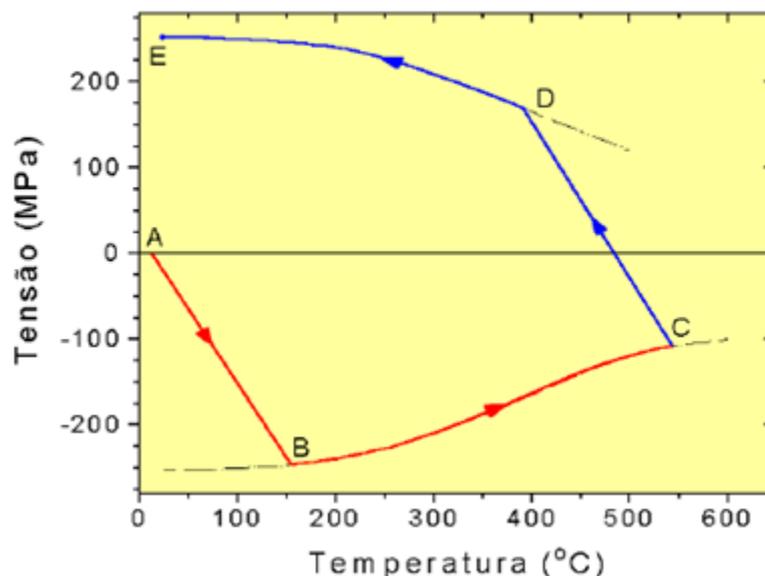


Figura 4 – Variação da tensão (σ_c) com a temperatura na barra central. (Modenesi et al., 2012).

Nesta temperatura, a tensão na barra central atinge o seu limite de escoamento e, acima desta temperatura, ela passa a se deformar plasticamente, isto é, de forma irreversível.

Como o limite de escoamento tende a diminuir com a temperatura, o valor da tensão na barra central tende a cair a medida que a sua temperatura aumenta, e a barra sofre uma maior deformação plástica (curva BC, figura 4). Se o aquecimento é interrompido no ponto C, a barra central se contrai com a queda da temperatura. Devido às restrições impostas pelas barras externas, as tensões de compressão na barra central são reduzidas e tornam-se nulas acima da temperatura ambiente (pois, devido à sua deformação plástica, a barra se tornou mais curta do que as externas). Com a continuação do resfriamento, tensões de tração passam a atuar nela até que o limite de escoamento (agora sob condições de tração) seja atingido no ponto D. A partir desta temperatura, a barra central passa a deformar plasticamente até atingir a temperatura ambiente (MODENESI et al., 2012).

Ao final do processo, à temperatura ambiente, como resultado de sua deformação plástica, a barra central ainda tem um comprimento menor do que as externas. Assim, como as barras estão unidas pelas bases, as diferenças de comprimento entre elas são acomodadas por deformações elásticas que geram tensões residuais. Na barra central, estas tensões são de tração e de valor próximo ao do limite de escoamento do material (figura 4, ponto E). Nas barras externas, para se manter o equilíbrio de forças, existem tensões de compressão de valor igual

à metade da tensão na barra central (supondo-se que as seções transversais das barras ainda tenham a mesma área) (MODENESI et al., 2012).

Uma situação similar pode ser considerada para uma junta soldada, associando-se a região da solda com a barra central e as regiões mais afastadas do metal de base, com as barras externas. Por este raciocínio, pode-se esperar como consequência da operação de soldagem, o desenvolvimento de tensões residuais de tração na região da solda e de tensões de compressão no metal de base. Na figura 5 é comparada, esquematicamente, a distribuição de tensões residuais na montagem das barras com as tensões residuais da solda (MODENESI et al., 2012).

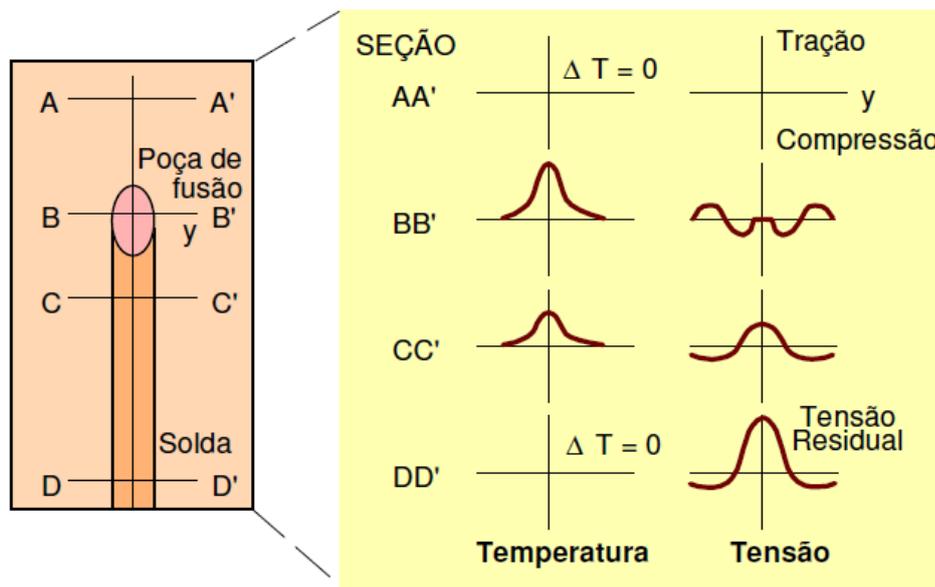


Figura 5 – Desenvolvimento de tensões residuais longitudinais durante a soldagem (Modenesi et al., 2012).

Nesta figura, está ilustrado o desenvolvimento de tensões devido ao aquecimento não uniforme de uma junta soldada.

Na **seção AA'**, muito distantes da poça de fusão e ainda não aquecidos pela fonte de calor, não existem variações de temperatura, e o material ainda está isento de tensões. (MODENESI et al., 2012).

Na **seção BB'**, junto à poça de fusão, o material aquecido tende a se expandir sendo, contudo, restringido pelas regiões mais frias da peça, gerando, assim, tensões de compressão em regiões próximas à zona fundida (ZF) e tensões de tração nas regiões um pouco mais afastadas. Quando o seu limite de escoamento é atingido, o material aquecido deforma-se plasticamente em compressão.

Na poça de fusão, como o material está no estado líquido, as tensões são nulas. Com o resfriamento e após a solidificação da solda, o material passa a se contrair, sendo novamente impedido pelas regiões mais frias e afastadas da solda.

Assim, na **seção CC'** surgem tensões de tração junto ao cordão e de compressão nas regiões mais afastadas. Estas tensões aumentam de intensidade levando ao escoamento da região aquecida.

Após o resfriamento completo, **seção DD'**, as tensões residuais no centro da solda chegam a níveis próximos ao limite de escoamento do material e existe uma distribuição de tensão similar à mostrada na figura 5 da página 28 (MODENESI et al., 2012).

4.1 Controle e Alívio de Tensões Residuais

O nível de tensões residuais em uma junta soldada pode ser diminuído reduzindo-se a quantidade de calor fornecido à junta ou o peso de metal depositado. Na prática, isto pode ser feito otimizando-se o desenho do chanfro (reduzindo-se o ângulo do chanfro ou usando-se preparações simétricas, por exemplo) e evitando-se depositar material em excesso (evitando-se reforço excessivo em soldas de topo ou, minimizando-se o tamanho de soldas de filete). (MODENESI et al., 2012).

A seleção de processos de maior eficiência térmica (fonte de maior intensidade) é uma possível alternativa de controle, mas difícil de ser justificável economicamente na maioria dos casos. Tensões residuais também podem ser reduzidas pelo uso de metal de adição com a menor resistência permissível no projeto, assim como uma redução dos vínculos externos da junta soldada (minimizando-se, assim, as tensões de reação). (MODENESI et al., 2012).

4.2 Conceito de Aporte Térmico (H)

O aporte térmico, ou insumo de calor quantifica a energia gerada pelo processo de soldagem. Sua equação é:

$$H = \frac{V * I}{v} n \quad (6)$$

Sendo V a tensão, I é a corrente e v é a velocidade de avanço do eletrodo e n a eficiência do processo de soldagem. O método de soldagem utilizado para referência do cálculo do aporte térmico é o arco submerso, pois sua eficiência é aproximadamente 1, ou seja, a máxima eficiência. A questão do aporte térmico é

uma das mais importantes na adequação ao material escolhido ao processo e aos parâmetros de soldagem. No quadro 2 são mostradas as faixas de insumo de calor para os principais processos de soldagem por fusão e indicando a adequação dos processos ao tipo de material (MODENESI et al. 2012).

Quadro 2 – Principais processos de soldagem: aporte térmico e aplicações (adaptado de Ferrante – 2002).

PROCESSO	H (kJ/mm)	METAIS E LIGAS
ELETRODO REVESTIDO	0,5 - 3,0	Aços carbono, baixa liga, inoxidável e resistentes ao calor. Ferro fundido, aços de alta resistência.
ARCO SUBMERSO	1,0 - 10,0	Aços estruturais, inoxidáveis, de baixa liga e microligados
TIG	0,3 - 1,5	Todos os aços ligas de Al, Ti, Be, Cu, Mg, Ni e Zr.
MIG	0,5 - 3,0	Aços carbono, baixa liga, inoxidável e resistentes ao calor. Ligas de Al tipo 1xxx, 3xxx, 5xxx e 6xxx, ligas e Cu (baixo Zn) e de Mg.
ELETROESCÓRIA	5,0 - 50,0	Aços estruturais, inoxidáveis. Recobrimento.
FEIXE DE ELÉTRONS	0,1 - 0,6	Titânio, metais refratários, aços especiais.

Observa se neste quadro que o aporte térmico para o processo de soldagem com eletrodo revestido varia entre 0,5 a 3,0 kJ/mm.

5 ALÍVIO DE TENSÕES POR TRATAMENTO TÉRMICO (TTAT)

O método mais conhecido e utilizado para reduzir as tensões residuais é o tratamento térmico para alívio de tensões (TTAT) pós-soldagem. Há muitas opções de tratamentos térmicos que podem ser aplicadas à junta soldada com o objetivo de reduzir os níveis de tensão residual, sendo o mais comum, o recozimento para alívio de tensões, destacado e mostrado no quadro 3. Tal recozimento consiste no aquecimento da peça de maneira uniforme em um intervalo de temperatura, por um período específico de tempo, seguido de resfriamento ao ar à temperatura ambiente (MARTINS 2014 apud FUNDERBUCK,1998).

Quadro 3 - Métodos para aliviar tensões residuais (Okimura & Taniguchi, 1982). (Adaptado de MARTINS, 2014).

PROCEDIMENTO	DESCRICAÇÃO	CARACTERÍSTICAS	LIMITAÇÕES	
(a)	Martelamento	Martelamento do metal depositado e de suas adjacências durante ou após soldagem.	Método simples, pode causar refino de grão.	Inadequado para materiais de baixa ductilidade
	Encruamento	A junta soldada é deformada plasticamente pela aplicação de cargas de tração.	Bastante eficiente para tanques esféricos e tubulações.	Inadequado para estruturas complicadas pela dificuldade de aplicar tensões uniformes.
	Vibração	Vibrações são aplicadas na estrutura causando uma ressonância baixa o que ocasiona deformação plástica parcial da estrutura e alívio de tensões.	Operação simples.	Inadequado para chapas grossas ou grandes estruturas. Alívio de tensões não é uniforme.
(b)	Recozimento para alívio de tensões	Aquecimento a 600 - 700°C (aços ferríticos) ou 900°C (aços austeníticos) seguido de resfriamento lento. Pode ser local ou total.	Muito utilizado e bastante eficiente	Inaplicável para grandes estruturas e difícil de ser executado no campo. Custo elevado.
	Recozimento a alta temperatura	Aquecimento a 900-950°C (aços ferríticos) seguido de resfriamento lento. Pode ser local ou total.	Podem eliminar completamente as tensões residuais.	Inaplicável para grandes estruturas e difícil de ser executado no campo. Custo muito elevado.
	Alívio de tensões a baixas temperaturas	Aquecimento do local da solda a 150-200°C em uma largura total de 60 a 130 mm.	Adequado para grandes estruturas.	O alívio de tensões é baixo.

(a) Processos mecânicos (b) Processos térmicos

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 - 2014 descreve algumas recomendações para o aço ASTM A 335 GrP91.

A temperatura de TTAT, conforme destacada na tabela 4, está compreendida na faixa de 730 a 775°C devendo ser respeitada e bem monitorada. Observa-se nesta tabela, o tempo mínimo para tratamento em função da espessura soldada.

Tabela 4 – Parâmetros para execução de tratamento térmico de alívio de tensões e dureza máxima permitida (ASME B31. 3-2014 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 (h/mm)	TEMPO MÍNIMO, h	DUREZA BRINEL (HB), MAX.
15E	5	Aços ligas 9Cr-1Mo-V	Todas	Todas	730 - 775	1 / 25	2	250

Fonte – ASME B31. 3 – 2014.

O tratamento é composto de uma taxa de aquecimento com velocidades entre 80°C/h a 150°C/h. Ao atingir a temperatura de tratamento deve-se permanecer no intervalo de temperatura de 730° a 775°C por um período mínimo de duas horas. Em seguida é controlada a taxa de resfriamento com uma velocidade entre 100°C/h a 120°C/h, até atingir uma temperatura de aproximadamente 315°C. Abaixo desta temperatura, o aço é resfriando até a temperatura ambiente sem a necessidade do controle da temperatura.

De acordo com as especificações da ASTM, o aço ASTM A335 Gr P91 é normalizado a 1038°C e revenido a 732°C.

Na Figura 6 da página 33 é apresentado o esquema do procedimento de tratamento térmico para o aço ASTM A335 Gr P91(GASPAR, 2013).

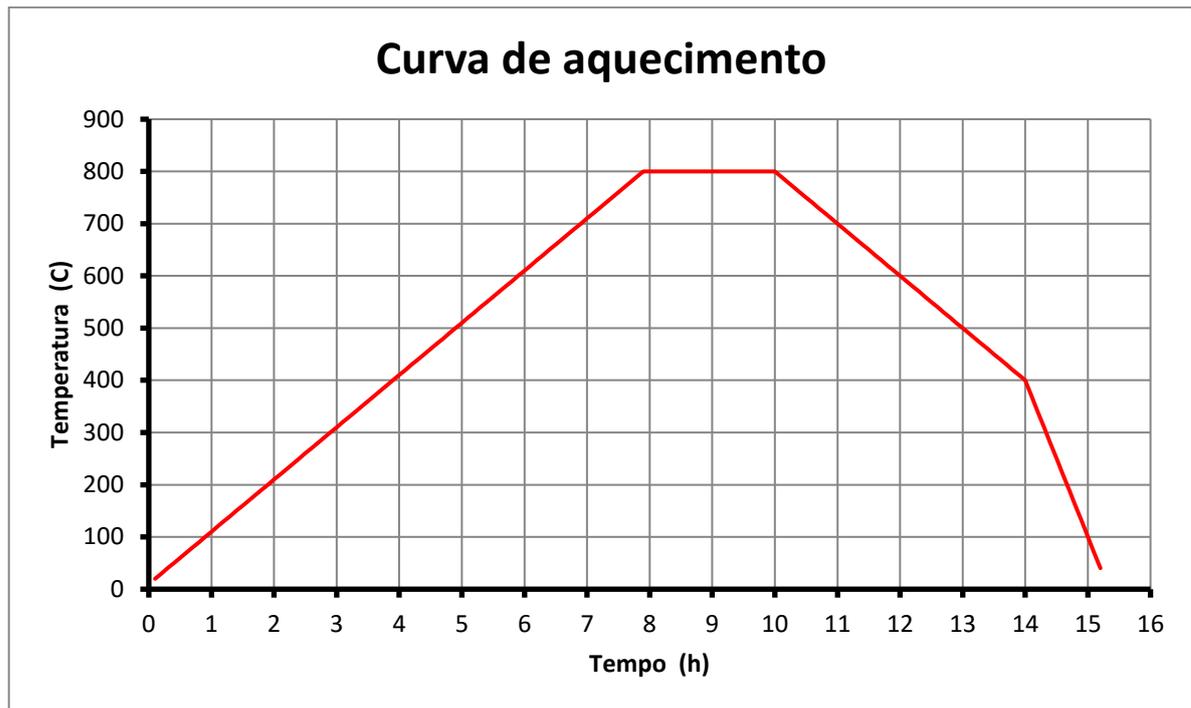


Figura 6 – Tempo e temperatura de TTAT de um aço ASTM A 335 Gr P91 (Adaptado de GASPAR, 2013).

É obrigatória a realização do TTAT nesse material, independente da espessura a ser soldada. Nesse tratamento, toda a martensita é revenida, com a peça tendo níveis de dureza e de tenacidade ideais à aplicação (GASPAR, 2013).

Segundo a norma ASME B31.3 – 2014, exceder a temperatura máxima pode comprometer a resistência à fluência do material, enquanto temperaturas abaixo da mínima estabelecida ocasiona durezas elevadas e baixa tenacidade.

Após a realização deste tratamento deve se executar a medição de dureza, que deve ser reduzida a valores entre 211 e 263 HV, e a tenacidade deve superar os 35J requeridos por norma (GASPAR, 2013).

Na tabela 4 da página 32 também está em destaque a dureza máxima permitida para o aço ASTM A 335 Gr P91 que é de 250HB (263HV) (ASTM E140-12)

6 ALÍVIO DE TENSÕES POR VIBRAÇÕES SUB-RESSONANTES (ATVS)

O tratamento por Vibrações Sub-ressonantes ou Sub-Harmônicas é a indução de movimento molecular acelerado em um material para a remoção de tensões internas. Esta técnica pode ser comparada ao "Envelhecimento Natural" (tratamento de alívio de tensões por oxidação ao tempo por longo período), pois, em ambas, não ocorrem os efeitos nocivos da aplicação de calor, como a escamação, a perda de dureza ou a redução das propriedades mecânicas, ocorridos nos tratamentos térmicos convencionais (MARTINS, 2012).

Em 1970, os pesquisadores conseguiram isolar os fatores críticos dos testes e formaram a base do uso efetivo da vibração para executar um alívio de tensões com resultado consistente. O primeiro fator crítico era a frequência de ressonância e, o segundo, era a estabilização da curva de ressonância. Descobriram que a frequência ideal para este propósito estava abaixo da frequência de ressonância e a batizaram com o nome de zona Sub-harmônica ou Sub-ressonante. A figura 7 mostra a localização desta zona no gráfico (MARTINS, 2012).

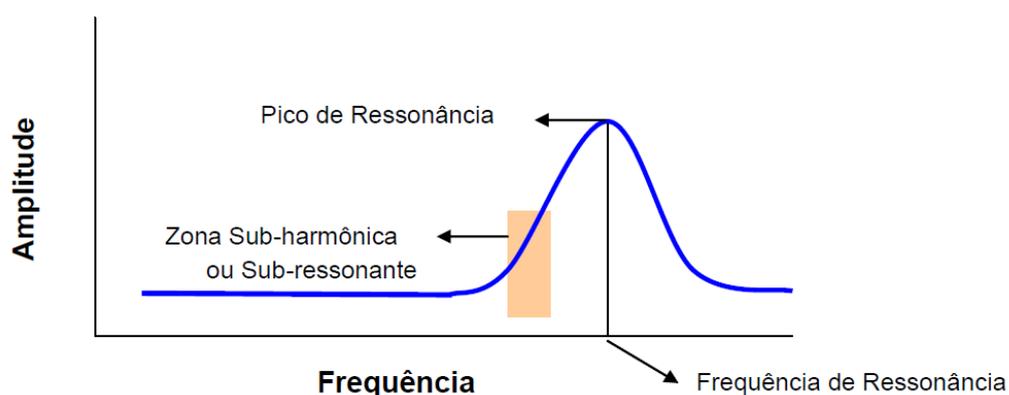


Figura 7 – Localização da zona sub-harmônica ou sub-ressonante (Martins, 2004).

O aprofundamento teórico desta nova tecnologia se iniciou em 1987 com o estudo de Richard Skinner, apresentado no artigo "*An Investigation into the Theory Behind Subresonant Stress Relieve*" - Um Estudo sobre a Teoria do Alívio de Tensões Sub-ressonantes. Skinner trabalhava na *Lockheed Missiles and Aerospace* e buscava o desenvolvimento da vibração como forma de alívio de tensões em peças de aço, alumínio e titânio.

Neste estudo foi avaliado detalhadamente, como ocorre a dissipação da energia em função da frequência aplicada em cada parte da curva de ressonância ilustrada na figura 8 da página 35.

A energia dissipada é entendida como a quantidade de tensões internas contidas na peça que pode ser removida. Sendo assim, a região sub-harmônica utilizada nesta tecnologia é a que possui maior capacidade de atuação neste sentido.

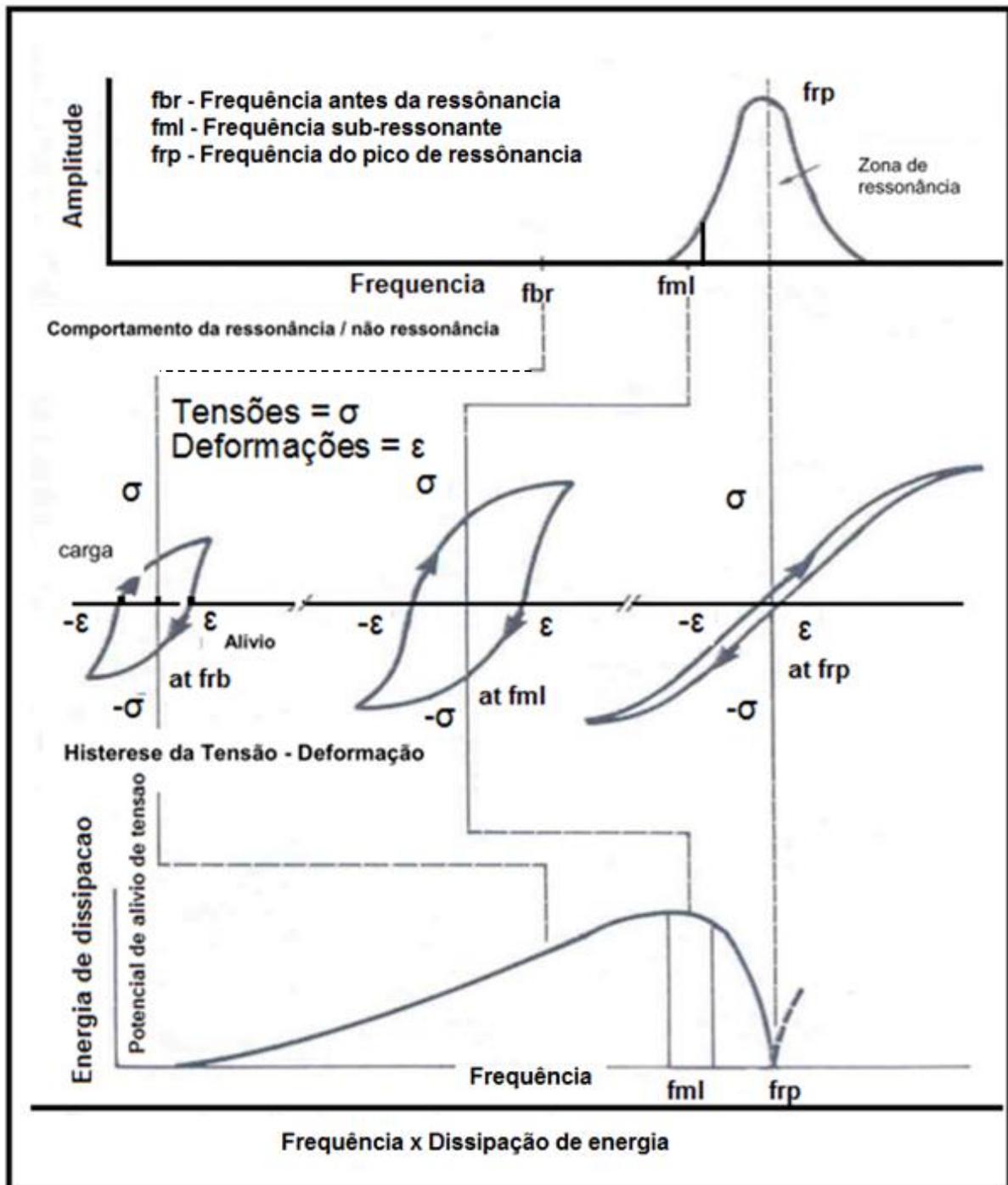


Figura 8 – Estudo do efeito das vibrações na dissipação de energia – (Adaptado de MARTINS, 2014 et al., Skinner – 1987).

Pode ser observado no gráfico da figura 8, que quanto maior a área formada entre as curvas de carga e sua respectiva histerese (curva de dissipação de energia mecânica), maior é a quantidade de energia dissipada (SKINNER, 1987).

Através deste estudo, Skinner verificou e comprovou, matematicamente, que a energia da vibração Sub-Harmônica possuía a condição mais eficaz para absorção, redução e eliminação das tensões térmicas e mecânicas.

Na prática, o estudo de Skinner veio confirmar que quando se aplica a frequência de ressonância no intuito de remover as tensões internas de uma peça, seu resultado é praticamente nulo, se comparado à região sub-harmônica.

Esta comparação pode ser observada no gráfico da figura 8 da página 35, através das áreas em "fml" e "frp" (MARTINS, 2012).

Ainda em 1987, o estudo "*Ultrasonic Evaluation of the Non-linearity of Metals from a Design Perspective*" - Avaliação Ultrassônica da Não Linearidade dos Metais a partir de um Projeto Perspectivo, de Wong e Johnson, Universidade de Berkeley – Califórnia, Estados Unidos, demonstrou as características da frequência ressonante ou harmônica dos sistemas metálicos.

Os autores relataram que a frequência de ressonância natural se altera com a presença de tensões residuais. Ainda demonstraram com este estudo, que quanto maior for a quantidade de tensões internas contidas em peças soldadas, maior é a frequência do pico de ressonância (HEBEL, 1989).

Esse estudo forneceu o embasamento necessário para estabelecer quando os níveis de tensões estão completamente removidos de uma peça. Na prática, aplicando-se esta análise, sabe-se que quando não existem mais tensões residuais na peça, sua curva de ressonância, além de não se alterar, possui a menor frequência do pico de ressonância (MARTINS, 2014).

Esta tecnologia oferece, portanto, uma substituição prática e econômica para os tratamentos térmicos convencionais de alívio de tensões, sem os inconvenientes das alterações das propriedades metalúrgicas e mecânicas dos materiais.

Os processos térmicos produzem inconvenientes indesejáveis nos materiais. O envelhecimento, por exemplo, com seu resfriamento muito lento, reduz em até 50% a resistência original do metal. A normalização, com seu resfriamento controlado, induzem tensões térmicas. O revenimento, com suas temperaturas brandas, resulta em um alívio de tensões parcial (MARTINS, 2004).

Os objetivos do alívio de tensões, na maioria dos casos, não requerem mudanças nas propriedades mecânicas, nas dimensões e muito menos, na estrutura cristalina dos grãos dos metais a serem tratados. Neste propósito, o processo de alívio de tensões por vibrações sub-ressonantes mostra-se uma técnica eficaz,

comprovadamente testada, para remover as tensões internas dos materiais sem afetar suas características físico-químicas, como ocorre nos tratamentos térmicos convencionais (HEBEL, 1989).

6.1 Aplicações do ATVS

Segundo Martins (2014), para iniciar qualquer processo de alívio de tensões por vibração é necessário, primeiramente, traçar a curva de ressonância da peça, conforme a mostra a figura 9.

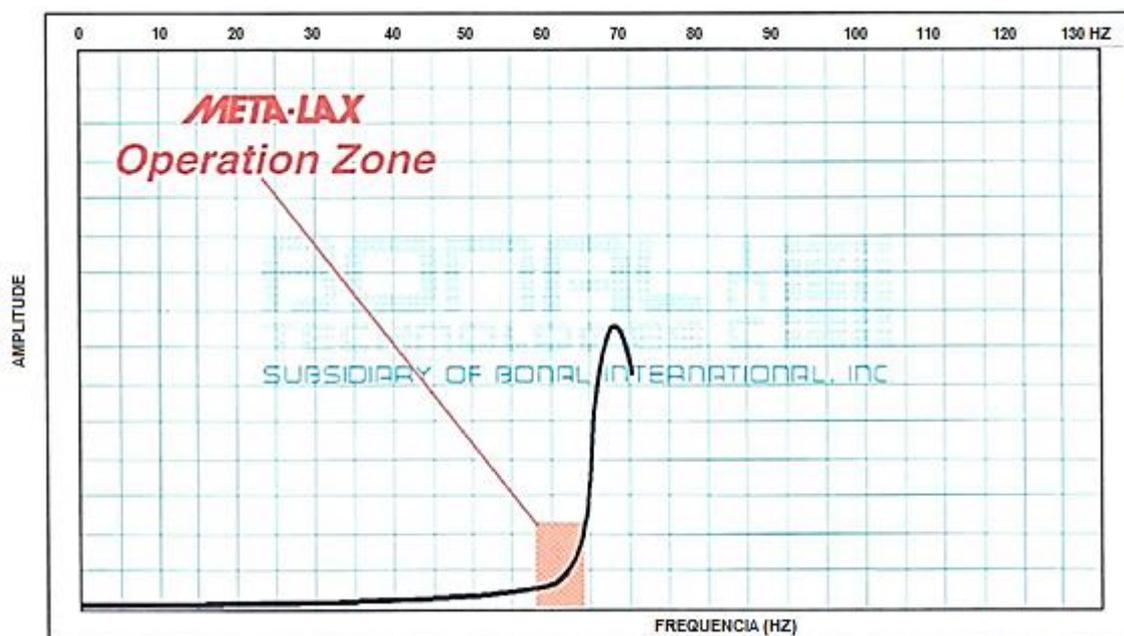


Figura 9 – Curva de ressonância da peça obtida através do equipamento Meta-lax (Fonte: Meta-lax-2013).

Para iniciar o processo, o operador induz um sinal elétrico crescente para o motor por um microprocessador. Um tacômetro é acoplado no motor para controle do processo. Parte-se o motor da frequência zero até 120 Hz. Dentro desta faixa, a curva de ressonância de qualquer peça é obtida desde que não ultrapasse 40.000 kg em massa, correspondente à capacidade do equipamento. A curva de ressonância da peça é então impressa conforme ilustrado na figura 9 (MARTINS, 2004).

Na figura 9 pode ser observada a região onde deve ser mantida a frequência para a obtenção do melhor resultado no alívio de tensões (região em destaque). Ajusta-se, portanto o aparelho para que se mantenha a frequência dentro dos níveis desejados.

Esta região é obtida mantendo-se uma frequência tal, que sua amplitude seja aproximadamente um terço da amplitude total da ressonância, baseado na teoria de Skinner, demonstrada na figura 9 da página 37.

Esta frequência é mantida por um determinado tempo, que varia em relação ao peso e material da peça a ser aliviada, conforme o quadro 4 (MARTINS, 2004).

Quadro 4 – Tempos necessários para alívio de tensões.

AÇO CARBONO	ALUMINIO INOX	FERRO FUNDIDO	AÇO FERRAMENTA METAIS EXOTICOS	1ª APLICAÇÃO	2ª APLICAÇÃO
0 - 90 kg	0 - 22 kg			15 MINUTOS	5 MINUTOS
90 - 2265 kg	22 - 90 kg	0 - 2265 kg		20 MINUTOS	5 - 10 MINUTOS
2265 - 4530 kg	ACIMA de 90 kg	2265 - 4530 kg		25 MUNUTOS	10 MINUTOS
ACIMA de 4530 kg		ACIMA de 4530 kg		30 MINUTOS	15 MINUTOS
			TODOS OS PESOS	60 MINUTOS	15 MINUTOS

Em seguida, é feita uma segunda leitura para se observar a variação da curva de ressonância. Uma vez que se trata da mesma peça, com o mesmo equipamento, sem alterar nenhuma das variáveis, a curva teoricamente seria a mesma se não houvesse tensões residuais na peça. Pode-se então deduzir que, quando há alteração na frequência de ressonância de uma peça é porque já houve redução de suas tensões internas, conforme estudo dos autores Wong e Johnson (1987), demonstrado na página 36.

Pode-se observar que a quantidade de tensões residuais contidas na peça é proporcional à redução que existe na frequência dos picos de ressonância apresentados no gráfico de alívio de tensões por vibrações. Na figura 10, é mostrada a segunda leitura da curva de ressonância (curva 2).

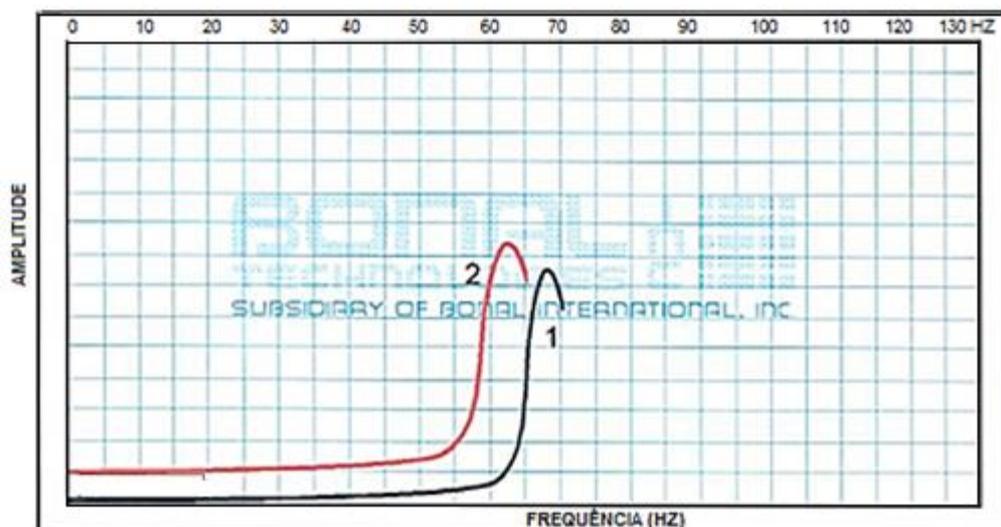


Figura 10 – Segunda leitura da curva de alívio de tensões após o tratamento.

Para a confirmação final, se as tensões residuais foram totalmente removidas, deve-se aplicar a vibração na nova frequência de tratamento (uma vez que houve alteração na curva). Ou seja, repete-se a operação anterior e executa-se em seguida, a terceira leitura da curva. Caso a terceira curva observada (curva 3) seja exatamente igual à segunda, no que se refere à frequência de pico de ressonância, pode-se afirmar que o alívio está completo, conforme mostrado na figura 11.

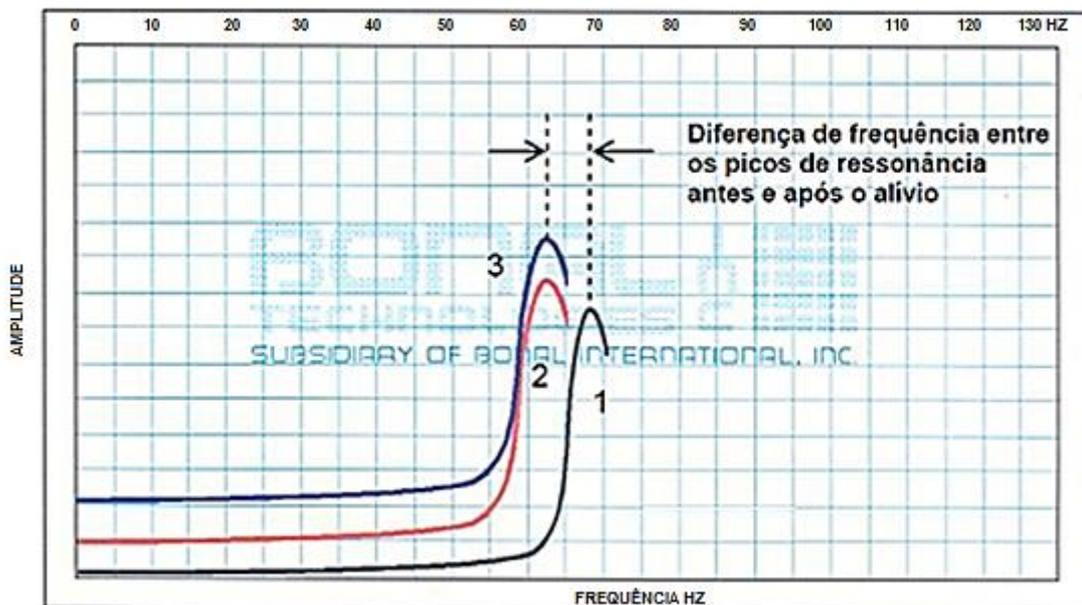


Figura 11 – Alteração e estabilização da curva de ressonância após a aplicação da frequência sub-harmônica de alívio de tensões Fonte: Meta-lax (2013).

Nesta etapa, caso seja repetido o ciclo de aplicação de vibrações, não há alteração da curva de ressonância. Este fato também ocorre quando não existem tensões internas em uma peça (HEBEL, 1989). Podem ser realizadas as seguintes observações a partir da figura 11: a curva 1 representa a curva de ressonância da peça após a soldagem sem nenhum tipo de alívio de tensões e a curva 2 representa a segunda leitura da curva de ressonância após a aplicação da vibração.

Observa-se que o pico de ressonância deslocou-se para a esquerda, possuindo uma frequência menor que a curva original (preta). A curva 3 da terceira leitura, (coincidindo em sua ascensão com a linha vermelha da segunda leitura), significa que, após aplicar mais vibrações para alívio, a curva não se alterou, ou seja, todas as tensões residuais que estavam presentes na peça foram removidas.

Após esta observação, podem-se aplicar indefinidamente frequências de alívio de tensões, que a curva de ressonância não se altera, comprovando mais uma vez que o alívio está completo (MARTINS, 2004).

7 MEDIÇÕES DE TENSÕES PELO MÉTODO DO “FURO CEGO”

Conforme a norma ASTM - E837-2013, a execução do furo cego consiste em medir a mudança na deformação superficial decorrente do alívio mecânico, realizado através da introdução de um furo de pequenas dimensões na superfície do componente. O princípio é que a remoção de material implica em reajuste do estado de tensão do material adjacente, de modo a alcançar o equilíbrio (TOTTEN; HOWES, 2003). A figura 12 mostra um extensômetro tipo roseta delta (cuja construção de *strain gages*, os eixos onde são medidos os alongamentos possuem um ângulo de 120 graus entre si)

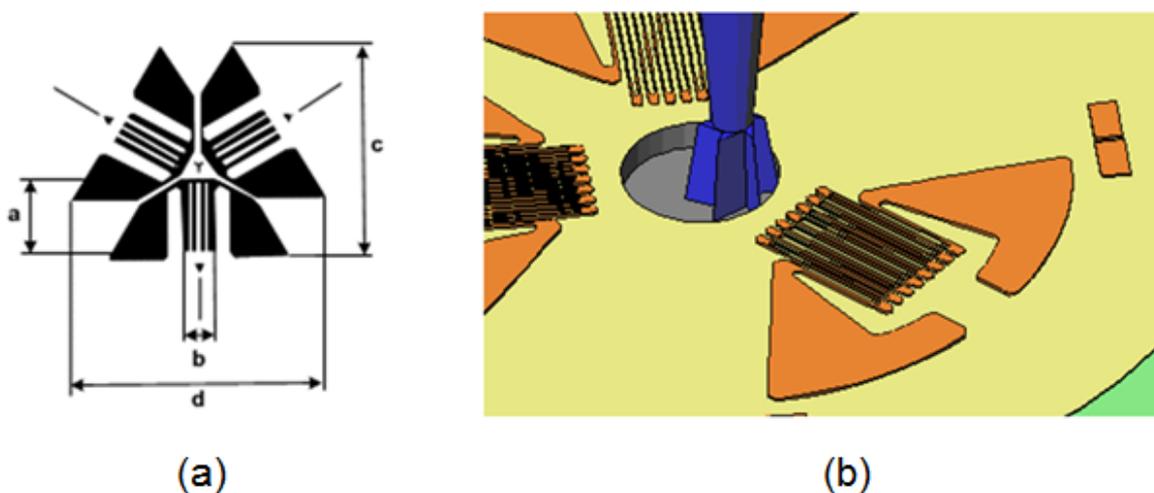


Figura 12 – Exemplos de Extensômetros. (a) Roseta Delta (b) representação gráfica em 3D (Fonte: Nunes (2006)).

Deve-se fixar uma roseta em posição adequada, sendo que para o uso em cordão de solda é utilizado o eixo x no sentido longitudinal da solda e o eixo y no sentido transversal do cordão de solda na superfície do componente e, realizar a usinagem de um furo de pequenas dimensões no centro da roseta, um extensômetro desenhado especialmente para este fim. A avaliação deste alívio de tensões é feita por esses extensômetros, elétricos ou mecânicos, e então, a tensão residual pode ser determinada por meio de diversas equações (ASTM E-837, 2009).

Na maioria dos casos, as tensões residuais não são uniformes ao longo da profundidade. Por exemplo, um material submetido à jateamento apresenta elevadas tensões compressivas próximas à superfície, e tensões de tração de magnitude muito inferior em seu interior. Em tais casos, não se pode aplicar um método que considera as tensões como uniformes (MARTINS, 2014; COFIÑO, 2010).

Alguns métodos matemáticos foram desenvolvidos de modo a calcular tensões residuais não uniformes em materiais de espessura considerável a partir de medidas obtidas pelo método “Furo Cego”.

Esses métodos identificam as tensões residuais interiores considerando a evolução das deformações medidas conforme a profundidade do furo aumenta. Pelo fato de que as deformações são medidas por extensômetros fixados na superfície do material, a maior sensibilidade das tensões residuais é próxima à superfície, reduzindo rapidamente com a profundidade (MARTINS, 2014; COFIÑO, 2010).

Em profundidades em torno do raio da roseta a sensibilidade é nula. Essa é a limitação fundamental deste método, que implica na dificuldade de avaliar corretamente as tensões no interior do material. Pequenos erros nas medidas realizadas manualmente implicam em um grande erro no cálculo das tensões (ASTM E-837, 2009).

Existem três métodos de medições:

1. Método de tensões uniformes: é o especificado pela norma ASTM E-837 de 2009. Assume que as tensões residuais são uniformes ao longo da profundidade do material. Quando as tensões presentes no material são realmente uniformes, esse é o método adequado, pois é o menos sensível a erros experimentais.
2. Método *Power Series*: promove resolução limitada considerando que as tensões variam linearmente com distância a partir da superfície. É uma boa escolha quando as tensões variam pouco com a profundidade (MARTINS, 2014; COFIÑO, 2010).
3. Método integral: oferece uma avaliação separada das tensões residuais em cada incremento de profundidade durante as medições, com isso este método proporciona a maior resolução dos três métodos. É o método adequado quando as tensões variam rapidamente, entretanto a sensibilidade aos erros experimentais também é a mais intensa. As tensões finais são calculadas através da integração das tensões medidas em cada incremento. Este método será utilizado neste trabalho.

O método do furo cego é um dos mais utilizados na determinação de tensões residuais superficiais, pois apresenta baixo custo relativo, mobilidade do equipamento, e possibilidade de aplicação a uma vasta variedade de materiais.

Entretanto, apresenta limitações por ser uma técnica semidestrutiva (MARTINS, 2014; COFIÑO, 2010).

Existem restrições na aplicação da técnica do furo-cego e, além da falta de sensibilidade dos “gages” com aumento da profundidade e os erros experimentais já citados anteriormente. Outra restrição refere-se ao fato de que tal método se aplica aos casos nos quais o material se comporta de modo elástico-linear. Portanto, na prática, resultados satisfatórios são obtidos quando as tensões residuais não ultrapassam 60% da tensão de escoamento do material (AGGEN et al., 1998).

Um material que apresenta tensões residuais superiores a este valor, ao ser submetido ao método do furo-cego, pode apresentar uma plastificação na borda do furo provocada pela redistribuição no estado de tensões na região onde houve a remoção de material. Desta forma, os resultados obtidos no ensaio não são corretos, podendo superar a tensão de escoamento do material. Neste caso, os resultados obtidos pela técnica tradicional do furo cego não são confiáveis, pois o algoritmo de cálculo das tensões é baseado em teorias linear-elásticas (ASTM E-837, 2009).

8 ENSAIO DE DUREZA VICKERS

8.1 Histórico

O ensaio de dureza consiste na impressão de uma pequena marca feita na superfície de uma peça pela aplicação de pressão por uma ponta de penetração. A medida da dureza do material ou da dureza superficial é dada como função das características da marca de impressão e da carga aplicada em cada tipo de ensaio de dureza realizado (GARCIA, SPIM, SANTOS, 2012).

8.2 Vickers

Essa dureza foi introduzida em 1925 por Smith e Sandland, levando o nome Vickers, porque a Companhia Vickers- Armstrong Ltda. fabricou as máquinas mais conhecidas para operar com esse tipo de dureza. O penetrador é uma pirâmide de diamante de base quadrada, com um ângulo de 136° entre as faces opostas. Esse ângulo produz valores de impressões semelhantes à dureza Brinell, porque a relação ideal d/D da dureza Brinell sendo 0,375, conforme mostrada figura 13, para essa relação ideal, as tangentes à esfera, partindo dos cantos da impressão, fazem entre si um ângulo de 136° (SOUZA, 2004).

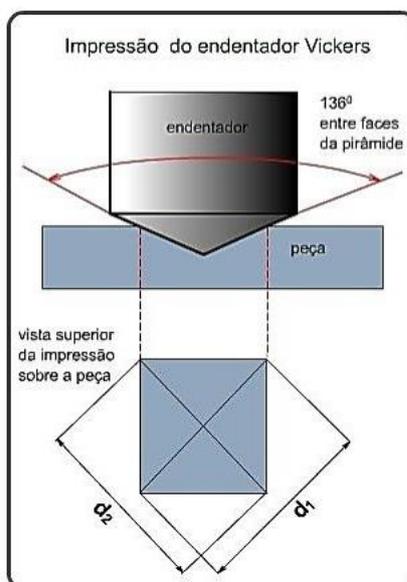


Figura 13 – Ângulo das tangentes à esfera, para a relação $d/D = 0,375$ na dureza Brinell (adaptado - Souza, 2004).

Como o penetrador é um diamante, ele é praticamente indeformável e, como todas as impressões são semelhantes entre si, não importando o seu tamanho, a dureza Vickers (HV) é independente da carga, isto é, o número de dureza obtido é o

mesmo, qualquer que seja a carga usada para materiais homogêneos. Para esse tipo de dureza, a carga varia de 9,81N a 1177 N. A mudança de carga é necessária para se obter uma impressão regular, sem deformação e de tamanho compatível para a medida de suas dimensões no visor da máquina e isso depende, naturalmente, da dureza do material que está sendo ensaiado, como no caso da dureza Brinell. A forma da impressão é um losango regular, ou seja, quadrada, e pela média L das suas diagonais, tem-se conforme a expressão seguinte, a dureza Vickers (SOUZA, 2004).

$$HV = \frac{CARGA}{\acute{A}REA} = \frac{2Q \operatorname{sen}\left(\frac{136}{2}\right)}{L^2}$$

$$HV = \frac{1,8544Q}{L^2} \quad (7)$$

Como Q é dado em N e L em mm, a dimensão de dureza Vickers é N/mm² ou Kgf/mm². Esse tipo de dureza fornece, assim, uma escala contínua de dureza (de HV=5 até HV=1000 Kgf/mm²) para cada carga usada.

Entretanto, para cargas muito pequenas, a dureza Vickers pode variar de uma carga para outra, sendo então necessário mencionar a carga utilizada, toda vez que se ensaiar um metal. A área deve ser medida com precisão, e para esse fim, existe um microscópio acoplado à máquina para a determinação das diagonais, L , com grande precisão, cerca de 1 micron. A carga é aplicada levemente na superfície plana de amostra, por meio de um pistão movido por uma alavanca, e é mantida durante cerca de 18 segundos, depois do qual é retirada e o microscópio é movido manualmente até que focalize a impressão (SOUZA, 2004).

As principais vantagens do método Vickers são:

- 1) Escala contínua;
- 2) Impressão pequena, evitando danos na peça;
- 3) Grande precisão de medida;
- 4) Deformação nula do penetrador;
- 5) Existência de apenas uma escala de dureza;
- 6) Cobre grande gama de dureza;
- 7) Aplicação em qualquer espessura de material, podendo, portanto, medir também durezas superficiais.

O ensaio exige uma preparação cuidadosa do material a ser ensaiado. Utiliza-se muito a dureza Vickers para pesquisas, estudos e mais especificamente, para determinação de profundidade de têmpera nos aços, profundidade de decarbonetação nos aços, para lâminas finíssimas, materiais muito duros ou moles (SOUZA, 2004).

9 MATERIAIS E MÉTODOS

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

9.1 Confeção da peça de teste

De um setor circular de um tubo de aço ASTM A335 Gr P91 que não foi utilizado por Gaspar (2013), sobre a solda inicial do tubo, após o tratamento térmico requerido pela norma ASME B31.3 - 2014, foi realizada uma solda de reparo conforme mostra a figura 14 para a confecção dos corpos de prova. A figura 14(a) mostra a representação gráfica do “setor de um cilindro”, e a figura 14(b), o “setor circular soldado” com a solda de reparo.

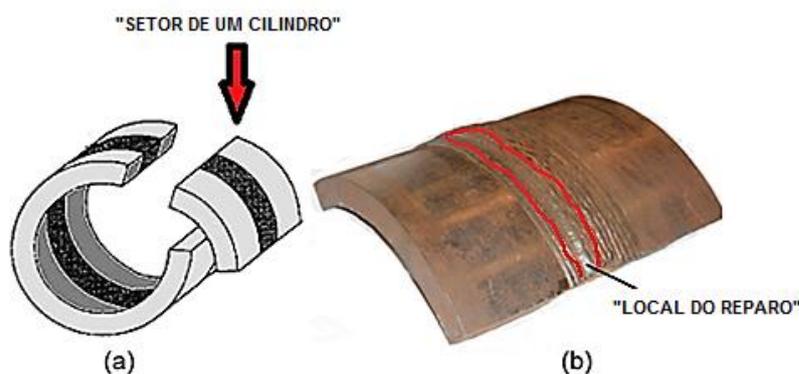


Figura 14 - “Setor de um cilindro” de tubo (a) representação gráfica (b) peça soldada. (ASTM A 335 Gr P91) – Com adaptação

A composição química do material de base e do consumível utilizado para o reparo pode ser verificado na tabela 5.

Tabela 5 – Composição química do metal base e consumível de soldagem (adaptado de GASPARG, 2013).

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

Gás – Star Plus – White Martins.

Fonte – Catálogo de consumíveis da BOEHLER, KESTRA e ASTM A335 - 2012.

Neste setor de cilindro foi simulado sobre a solda existente um reparo, onde foram aplicados dez cordões de solda, conforme mostra a figura 15 da pagina 47, com o processo de eletrodo revestido utilizando o consumível E9015-B9, recomendado

pela norma ASME IX - 2013, por ter a composição química similar ao do material de base, como mostrado na tabela 5 da página 46.

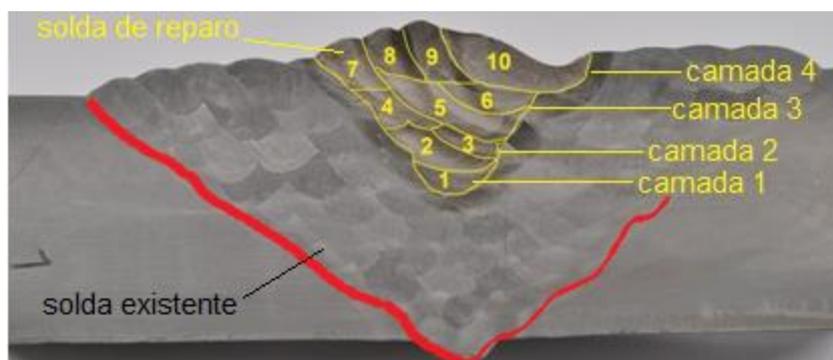


Figura 15 – Passes de soldas de reparo aplicados na solda existente (Elaborada pelo autor).

Conforme pode ser visto na figura 15, é possível verificar a quantidade de passes de solda distribuídas em 4 camadas.

Os parâmetros de soldagem utilizados para esse reparo estão apresentados no quadro 5.

Quadro 5 – Parâmetros de soldagem utilizados para o reparo. (elaborada pelo autor).

ACOMPANHAMENTO DURANTE A SOLDAGEM												
Passe	Camada	Processo	Consumível			Características Elétricas			Vazão do Gás		Veloc (mm/s)	Energia (kJ/mm)
			Classif. AWS	Ø (mm)	Oscilação (mm)	Tipo corr. e Polaridade	Faixa Tensão (V)	Faixa Corrente (A)	Purga (l/min)	Prot. (l/min)		
1	1	SMAW	E9015 B9	3,25	7,5	CC+	22 - 26	157 - 162	N.A.	N.A.	1,5	2,80
2	2	SMAW	E9015 B9	3,25	8,4	CC+	22 - 26	157 - 163	N.A.	12	2,5	1,66
3	2	SMAW	E9015 B9	3,25	7,0	CC+	22 - 25	157 - 162	N.A.	N.A.	2,1	1,95
4	3	SMAW	E9015 B9	3,25	10,0	CC+	21 - 26	157 - 166	N.A.	N.A.	2,3	1,91
5	3	SMAW	E9015 B9	3,25	10,0	CC+	21 - 25	159 - 164	N.A.	N.A.	2,1	1,99
6	3	SMAW	E9015 B9	3,25	8,55	CC+	22 - 27	159 - 164	N.A.	N.A.	2,9	1,55
7	4	SMAW	E9015 B9	3,25	9,5	CC+	22 - 26	156 - 161	N.A.	N.A.	2,6	1,58
8	4	SMAW	E9015 B9	3,25	10,0	CC+	22 - 27	159 - 165	N.A.	N.A.	2,2	1,99
9	4	SMAW	E9015 B9	3,25	9,5	CC+	22 - 27	157 - 163	N.A.	N.A.	2,2	2,00
10	4	SMAW	E9015 B9	3,25	9,0	CC+	21 - 25	157 - 163	N.A.	N.A.	3,1	1,32

Pode se verificar no quadro 5 que a oscilação máxima do eletrodo ficou entre 7 mm e 10 mm, A variação da tensão está entre 22 V e 27 V.

Soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido. (SMAW – *Shielded Metal Arc Welding*)

Neste mesmo quadro, também é possível verificar, que a corrente elétrica utilizada está entre 157 e 166 A, com uma energia de soldagem variando entre 1,32 a 2,8 kJ/mm.

9.2 Obtenção dos corpos de provas

Após a realização da soldagem do reparo, os corpos de provas foram obtidos da seguinte maneira:

Foi utilizado o processo de corte por jato de água com uma máquina Mach 2 – Flow 2400 com uma pressão de 414 MPa, com uma vazão de 3 litros por minuto, onde foi utilizado um abrasivo da marca ZIRTEC1 st grade, com um diâmetro de bico de 0,9 mm. Na figura 16 é mostrada a máquina de jato de água utilizada para o corte dos corpos de provas.



Figura 16 - Máquina de corte com jato de água. (Elaborada pelo autor).

Depois de programado o contorno do corte é posicionado o bico para sua execução. Na figura 17 da página 49 é indicado o posicionamento do bico para a realização do corte do corpo de prova.

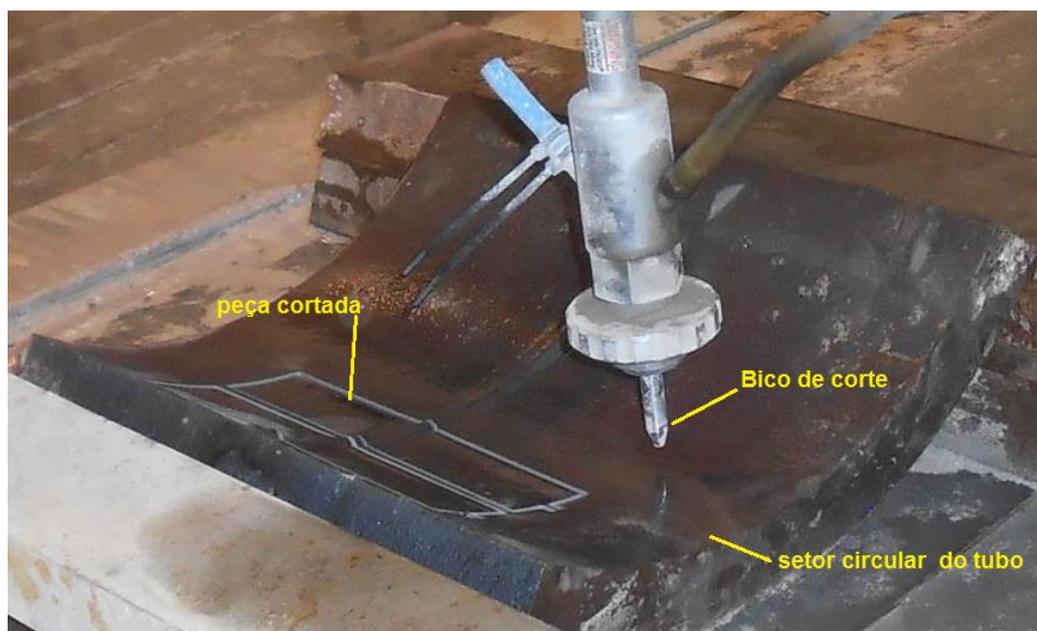


Figura 17 – Posicionamento do bico para execução do corte do corpo de prova. (Elaborada pelo autor).

Nesta figura, é possível observar o corpo de prova cortado do setor circular do tubo e o posicionamento do bico para iniciar o corte do próximo corpo de prova.

Na figura 18 é mostrada a execução do corpo de prova com o detalhe da capa de proteção do jato de água, esta capa de proteção evita a dispersão do jato de água.



Figura 18 – Corte corpo de prova. (Elaborada pelo autor).

Para cada novo corte realizado, é necessário movimentar o setor circular, para que o jato fique mais próximo da direção do raio.

Após a realização do corte com o jato de água, os corpos de prova foram identificados com numeração de 1 a 6. A figura 19 mostra o local de retirada dos corpos de prova e a sua identificação.



Figura 19 – Local de retirada e identificação dos corpos de prova. (Elaborada pelo autor).

Pode-se notar na figura 19 que foram obtidos seis corpos de prova e numerados de 1 a 6.

Na figura 20, é mostrado com mais detalhe, o puncionamento dos números nos corpos de prova.

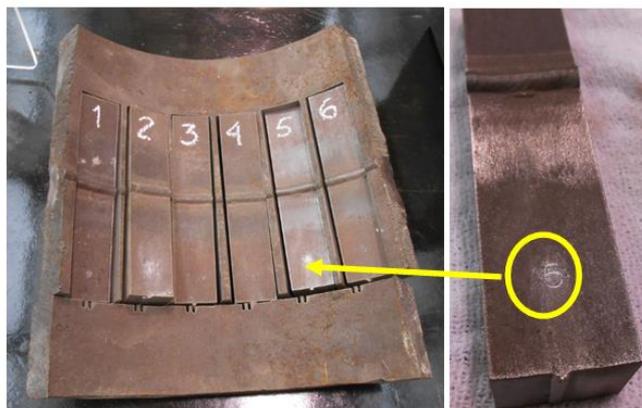


Figura 20 – Puncionamento dos corpos de provas. (Elaborada pelo autor).

9.3 Preparação dos corpos de provas

A superfície dos corpos de prova foi preparada com lixamento abrasivo com a sequência de lixas de 400 e 600 seguido de um polimento com pasta de diamante.

Na figura 21 é mostrada a preparação do corpo de prova para o ensaio macrográfico. (Foi utilizado o reagente Vilella para o preparo da macrografia).

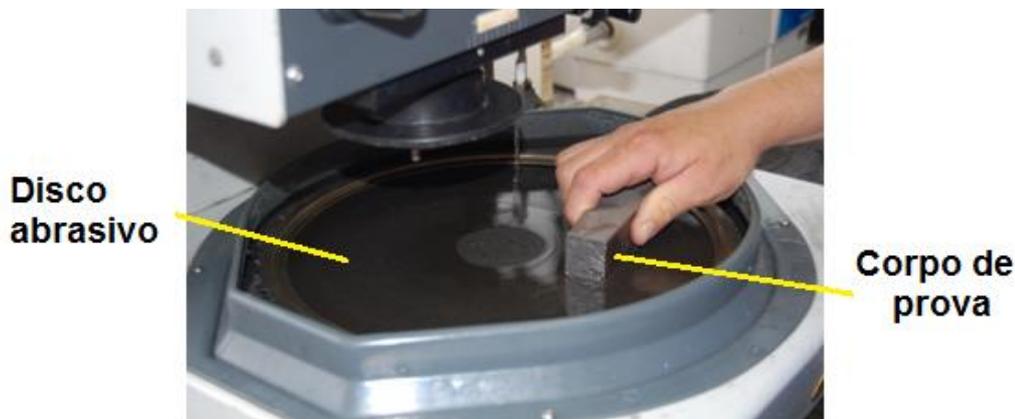


Figura 21 – Lixamento do corpo de prova. (Elaborada pelo autor).

Nesta figura, é possível verificar a execução do lixamento e o disco abrasivo utilizado para a preparação dos corpos de prova.

Foram usados seis corpos de prova numerados de 1 a 6. Nos corpos de prova 1 e 2, foram medidas as durezas e as tensões residuais sem a execução dos tratamentos térmico e vibração sub-ressonante. Nos corpos de provas 3 e 4, após a execução do TTAT, foram medidas as durezas e as tensões residuais. Nos corpos de provas 5 e 6, após a execução do ATVS, foram medidas as durezas e as tensões residuais.

9.4 Procedimento do alívio de tensões residuais por tratamento térmico usado nos corpos de prova 3 e 4

O tratamento térmico executado segue a curva de aquecimento mostrada no gráfico da figura 22 da página 52. O controle do aquecimento foi feito a partir de 300°C, com taxa de 100°C por hora, até atingir o patamar de 730°C. Nessa temperatura, o corpo de prova permaneceu por um período de 2 horas. Após esse tempo, o corpo de prova foi resfriado com uma taxa de resfriamento de 100°C por hora, até atingir a temperatura de final de controle, que foi de 300°C.

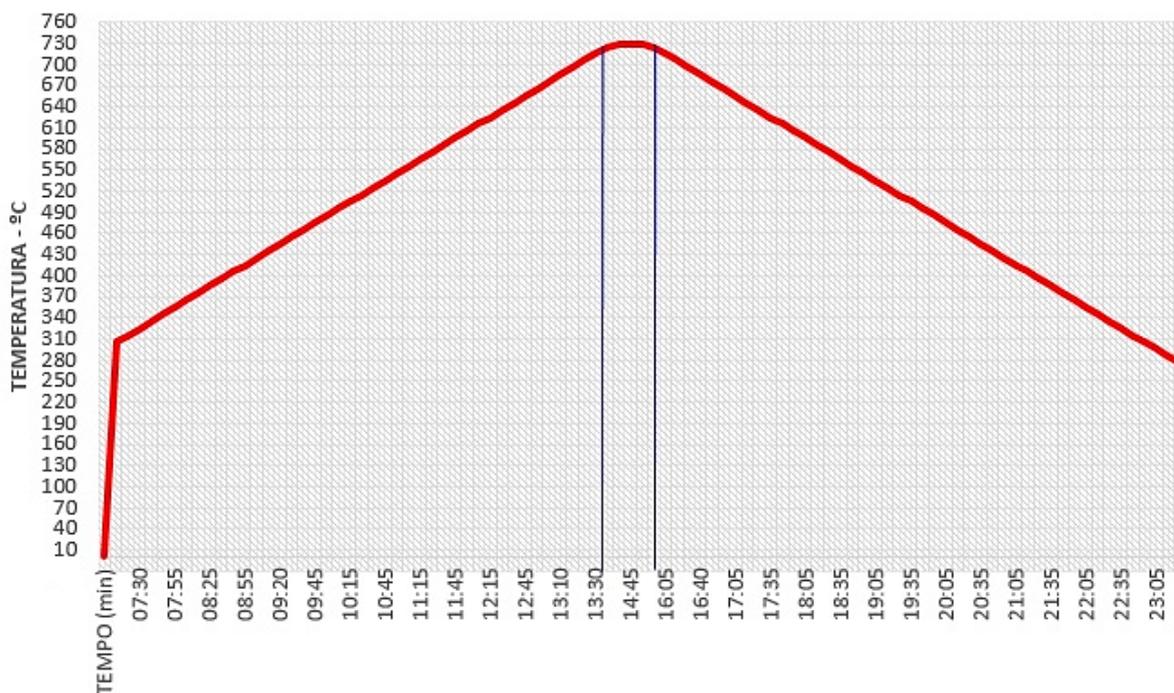


Figura 22 – Gráfico com os parâmetros utilizados no TTAT. (Elaborado pelo autor).

As informações de utilização dos parâmetros de tratamento foram obtidas na norma ASME B31.3 – 2014. Observa-se que foi utilizada a recomendação mínima para o tempo de tratamento de duas horas, que pode ser verificado pelo intervalo das linhas verticais em azul no gráfico.

9.5 Procedimento do alívio de tensões residuais por vibrações sub-ressonantes usado nos corpos 5 e 6

Para a execução desse tratamento, foram usadas as seguintes etapas:

- 1 - Fixado o par de corpos de prova sobre a mesa de vibração, onde foram fixados o indutor de força e o transdutor;
- 2 - Ajustado o excêntrico do indutor de força 2A para 40%;
- 3 - Foi ligado o equipamento e pré-aquecido o indutor de força por 10 minutos, com uma frequência de aproximadamente 40 Hz;
- 4 - Executada a primeira varredura, determinando o pico de ressonância de cada peça;
- 5 - Executado o primeiro tratamento de alívio de tensões por vibrações sub-ressonantes, respeitando a porcentagem do pico de ressonância, que foi pré-estabelecida em 35%, por 20 minutos;
- 7 - Findo o primeiro tratamento, foi executada uma segunda varredura, com os mesmos parâmetros da primeira;

8 – Foi executado o segundo tratamento, por 10 minutos, respeitando a mesma porcentagem do pico de ressonância.

9 - Findo o segundo tratamento, foi executada uma terceira varredura, cuja finalidade é a comparação com a segunda;

10 – Como a análise dos dados entre a segunda e a terceira varreduras mostraram que a diferença de frequência entre elas foi menor que 0,8 Hz, o alívio de tensões foi considerado completo;

11 - Findo o Alívio, os dados coletados foram armazenados (apêndice B), juntamente com o gráfico emitido pelo equipamento.

O gráfico do alívio de tensões por vibração sub ressonante é mostrado na figura 23 .

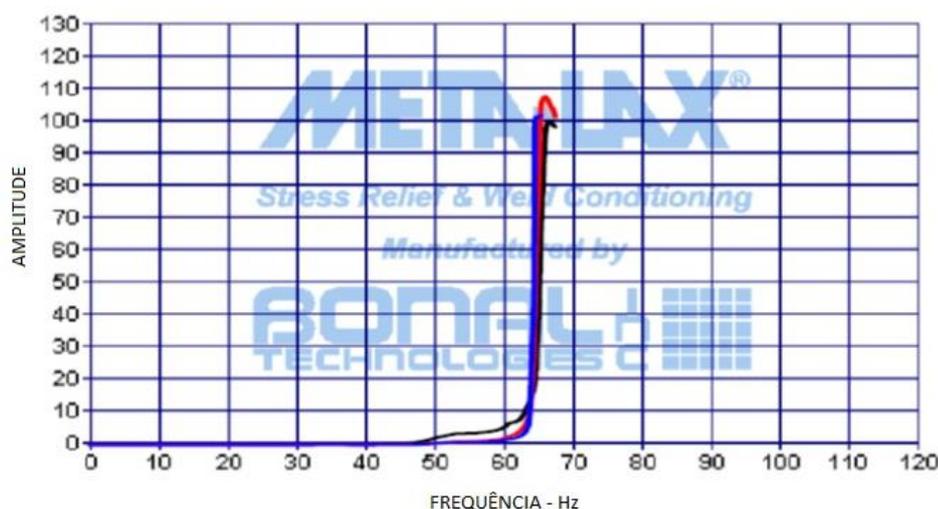


Figura 23 – Gráfico com os parâmetros utilizados no ATVS. (Relatório Tramontina – Apêndice B)

Pode-se perceber no gráfico, que as curvas na cor vermelho e na cor azul do gráfico de vibração sub-ressonante estão bem próximas, o que demonstra que as tensões foram aliviadas.

9.6 Ensaio de tensões residuais pelo método do furo cego

Os ensaios de tensões residuais, foi feito pelo processo de furo cego, com broca de 1,8mm no equipamento “Automatic Residual Stress Measurement System Model Restan” sendo que foram executadas 50 medições, escalonadas em intervalos de 0,012mm a partir da superfície, perfazendo um total de 0,6mm de profundidade. A profundidade total do furo corresponde a 1/3 do diâmetro da broca.

A figura 24 mostra o furo e sua posição relativa à roseta.

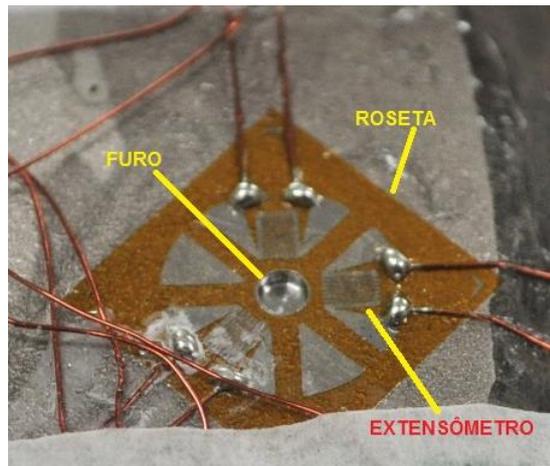


Figura 24 – Posição do furo em relação à roseta após a medição das tensões residuais pelo método do furo cego. (Elaborada pelo autor).

Na figura 24 pode se verificar a colocação dos três extensômetros próxima à borda do furo cego e à colagem da roseta sobre a solda.

Para que fosse possível a colocação dos extensômetros, as superfícies dos corpos de provas foram preparadas, por meio de eletroerosão, a fim de se obter uma superfície plana. A figura 25 indica o posicionamento dos extensômetros e as direções de medição X e Y.

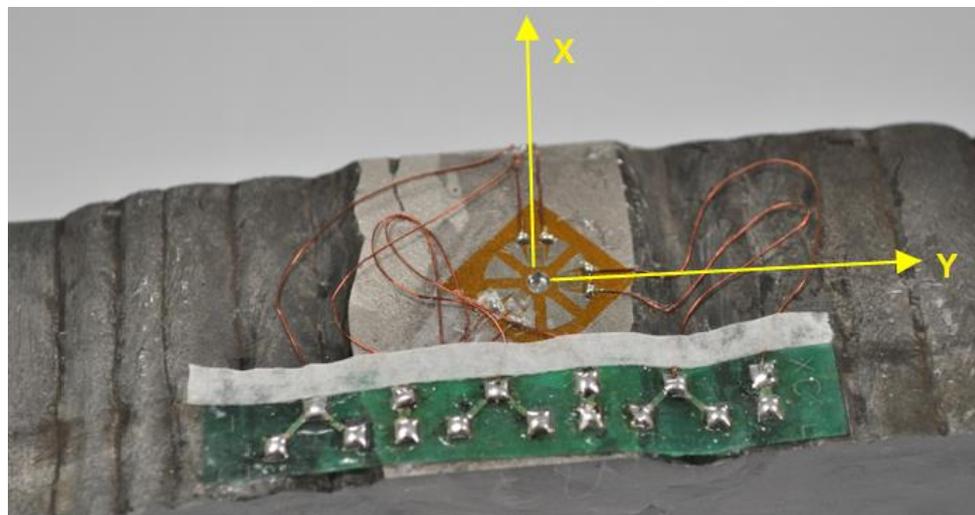


Figura 25 – Identificação e posição dos eixos da roseta em relação ao cordão de solda. (Elaborada pelo autor).

Observa-se que o eixo X da roseta está posicionado no sentido longitudinal do cordão de solda, e o eixo Y, no sentido transversal do cordão de solda.

9.7 Ensaio de dureza Vickers

Os ensaios de dureza Vickers, foram feitos na superfície cortada do CP pelo processo de micro dureza no equipamento da Shimadzo Corporation H.M.V.2 com medidas verticais, em intervalos de 1 mm, e na horizontal, com intervalos entre 3 mm e 5 mm, abrangendo toda a solda de reparo, como mostra a figura 26.

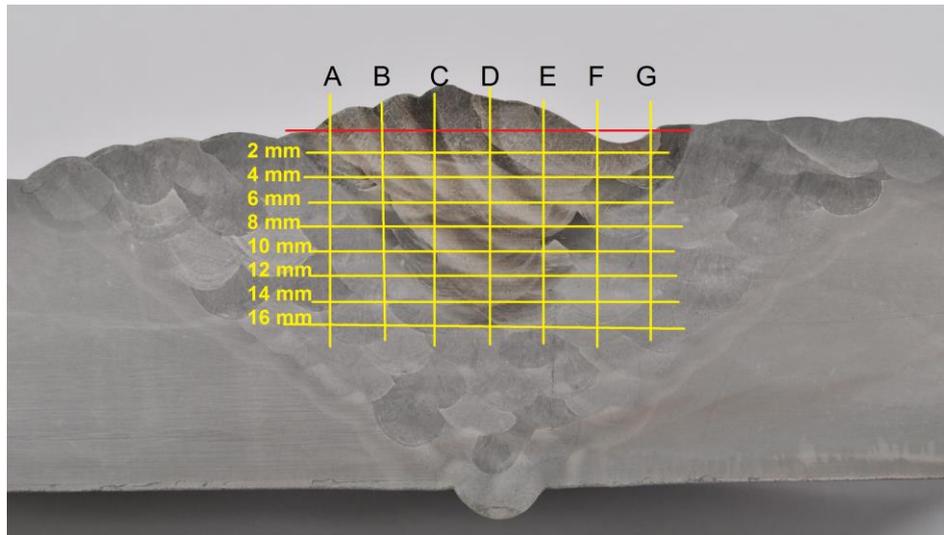


Figura 26 – Varredura de medição de dureza Vickers. (Elaborada pelo autor).

Para este mapeamento de dureza o ponto final de medição foi escolhido levando-se em consideração o último ponto na região da ZAT.

10 RESULTADOS

A seguir são apresentados os resultados obtidos nos corpos de prova ensaiados.

10.1 Corpos de prova 1 e 2 (sem tratamento para alívio de tensões)

Na sequência estão apresentados os resultados dos ensaios de tensões residuais e de dureza.

10.1.1 Tensões residuais (furo cego)

No gráfico da figura 27 são mostradas as tensões residuais nos eixos X e Y do CP1 e do CP2.

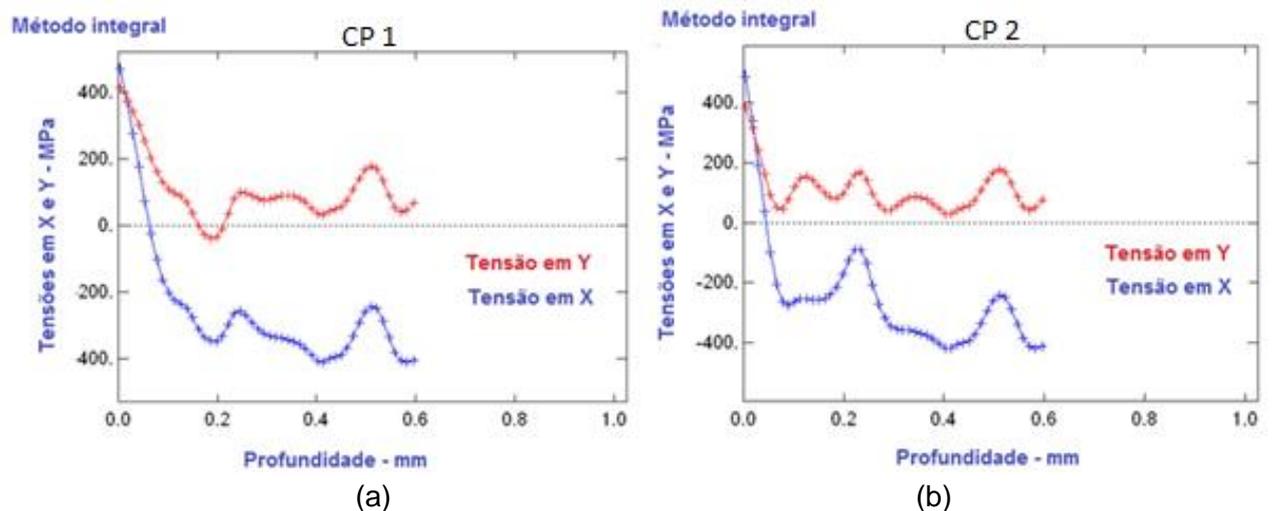


Figura 27 – Gráfico tensão versus profundidade obtido pelo processo do furo cego – (a) CP 1 e (b) CP 2, sem tratamento de alívio de tensões residuais.

Na figura 27 (a), pode-se observar uma tensão máxima no eixo X de 471 MPa obtida na primeira medição, que foi feita na profundidade de 0,012 mm. Nota-se que até a profundidade de 0,06 mm, a tensão no eixo X é positiva (tração), e a partir daí, ela se torna negativa (compressão). Na profundidade de 0,588 mm é encontrada a tensão no eixo X mínima de -413 MPa. Do mesmo modo para o eixo Y, a tensão máxima é de 416 MPa na profundidade de 0,012 mm, no intervalo de 0,168 mm até 0,216 mm, a tensão no eixo Y ficou negativa (compressão), e a partir daí, voltou a ser positiva.

Na figura 27 (b) da página 56, pode-se observar uma tensão máxima no eixo X de 485 MPa na profundidade de 0,012 mm, nota-se que até a profundidade de 0,048 mm, a tensão no eixo X é positiva (tração), e na profundidade de 0,408 mm e 0,588 mm, tem-se a tensão no eixo X máxima negativa (compressão) de -417 MPa.

Do mesmo modo, para o eixo Y, a tensão máxima é de 384 MPa na profundidade de 0,012 mm e, no ponto de 0,420 mm, a tensão mínima de 28 MPa no eixo Y (tração), sendo que nesse eixo, a tensão ficou sempre positiva.

Observando as figuras 27 (a) e 27 (b) da página 56, é possível notar que a variação da tensão na direção Y acompanha a variação na direção X.

No apêndice A, são encontrados, além das tensões de direção X e Y, as tensões principais σ_1 (max) e σ_2 (min).

10.1.2 Dureza Vickers

A tabela 6 mostra o mapeamento de dureza feita na seção transversal do CP1 dentro da zona de medição apresentada na figura 26 da página 55.

Tabela 6 – Durezas medidas nos corpos de prova sem alívio de tensões – CP1.

PROFUNDIDADE	VARREDURA DE DUREZA CP1 (HV) - SEM TTAT						
	AFASTAMENTO (5mm em 5 mm)						
	A	B	C	D	E	F	G
1,0 mm	364	394	411	394	358	396	407
2,0 mm	381	394	442	384	332	377	406
3,0 mm	381	423	403	360	360	434	383
4,0 mm	396	368	367	328	408	403	354
5,0 mm		339	362	340	398	437	422
6,0 mm		441	391	365	429	375	410
7,0 mm		452	311	389	419	385	386
8,0 mm		428	446	289	377	417	399
9,0 mm		302	367	335	332	370	342
10,0 mm			387	362	394	358	384
11,0 mm			367	433	377	418	
12,0 mm			302	430	373	337	
13,0 mm				351	373	405	
14,0 mm				316	387	365	
15,0 mm				369	363	391	
16,0 mm				394	373		
17,0 mm				304	385		

Nota-se nesta tabela, que a dureza máxima encontrada foi de 452HV na coluna B na linha 7 mm, e a dureza mínima foi de 289HV, na coluna D linha 8 mm

A média encontrada foi de 380 HV, com um desvio padrão de 107

Do mesmo modo, na tabela 7 da página 58 é mostrado o mapeamento de dureza feita na seção transversal do CP 2.

Tabela 7 – Durezas medidas nos corpos de prova sem alívio de tensões – CP2.

PROFUNDIDADE	VARREDURA DE DUREZA CP2 (HV) - SEM TTAT					
	AFASTAMENTO (5mm em 5 mm)					
	A	B	C	D	E	F
1,0 mm	401	398	385	401	381	364
2,0 mm	399	365	387	440	366	394
3,0 mm	416	355	376	357	389	392
4,0 mm	395	391	407	405	398	348
5,0 mm	231	425	411	408	397	224
6,0 mm		351	346	398	387	
7,0 mm		230	358	420	435	
8,0 mm			361	344	377	
9,0 mm			422	360	429	
10,0 mm			413	426	393	
11,0 mm			384	451	376	
12,0 mm			386	398	428	
13,0 mm			393	436	394	
14,0 mm			465	350	377	
15,0 mm			391	435	394	
16,0 mm			403	450	234	
17,0 mm			387	404		
18,0 mm				288		

Nota-se nesta tabela, que a dureza máxima encontrada foi de 465HV na coluna C, na linha 14 mm, e a dureza mínima foi de 224 HV na coluna F, linha 5 mm.

A média encontrada foi de 384 HV, com um desvio padrão de 48.

10.2 Corpos de prova 3 e 4 (com TTAT)

Na sequência estão apresentados os resultados dos ensaios de tensões residuais e de dureza.

10.2.1 Tensões residuais (furo cego)

No gráfico da figura 28 são mostradas as tensões residuais nos eixos X e Y do CP3 e do CP4.

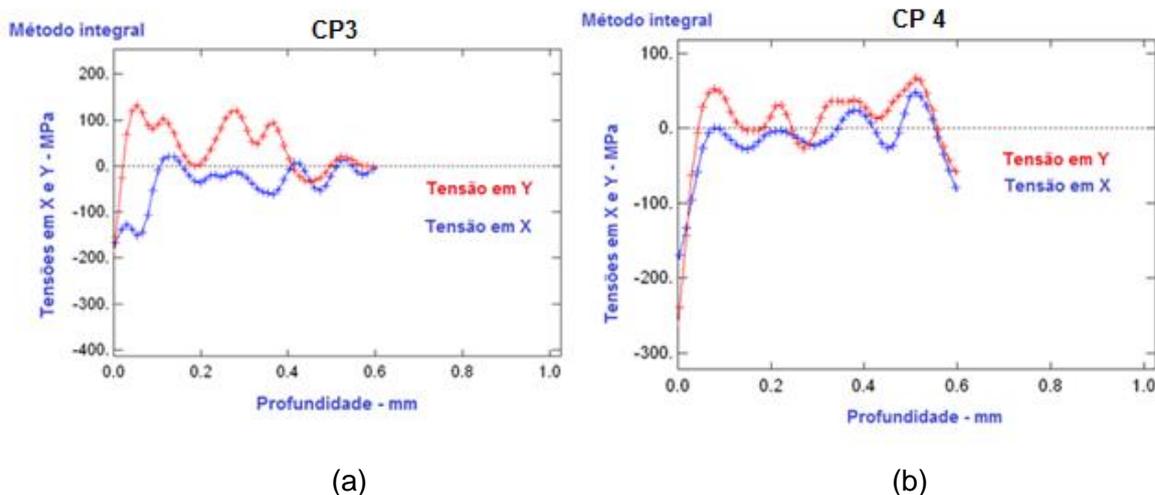


Figura 28 – Gráfico tensão versus profundidade obtido pelo processo do furo cego – (a) CP 3 e (b) CP 4, com TTAT.

Na figura 28 (a), é possível observar uma tensão mínima no eixo X de - 166 MPa na profundidade de 0,012 mm, nota-se que a partir da profundidade de 0,096 mm, a tensão no eixo X variou entre -52 MPa (compressão) a 21 MPa (tração).

Do mesmo modo para o eixo Y, a tensão mínima de -155 MPa na profundidade de 0,012 mm, e no ponto de 0,060 mm, a tensão máxima de 132 MPa (tração).

Na figura 28 (b), podemos observar uma tensão máxima no eixo X de - 170 MPa na profundidade de 0,012 mm, nota-se que a partir da profundidade de 0,036 mm a tensão no eixo X variou entre -95 MPa (compressão) a 48 MPa (tração).

Do mesmo modo para o eixo Y, a tensão mínima é de -240 MPa na profundidade de 0,012 mm, e a partir do ponto de 0,036 mm, a tensão variou de -63 MPa (compressão) a 67 MPa (tração).

Nota-se nesta tabela, que a dureza máxima encontrada foi de 327HV na coluna E, linha com 4 mm, e a dureza mínima foi de 230HV na coluna H, linha 7 mm.

A média encontrada foi de 283 HV, com um desvio padrão de 76.

10.3 Corpos de prova 5 e 6 (com ATVS)

Analisando o gráfico da figura 23 da página 53, pode-se observar que a primeira medição da frequência harmônica com os corpos de prova tensionados, foi de 66,1Hz, conforme evidenciado no relatório do apêndice B, da página 88.

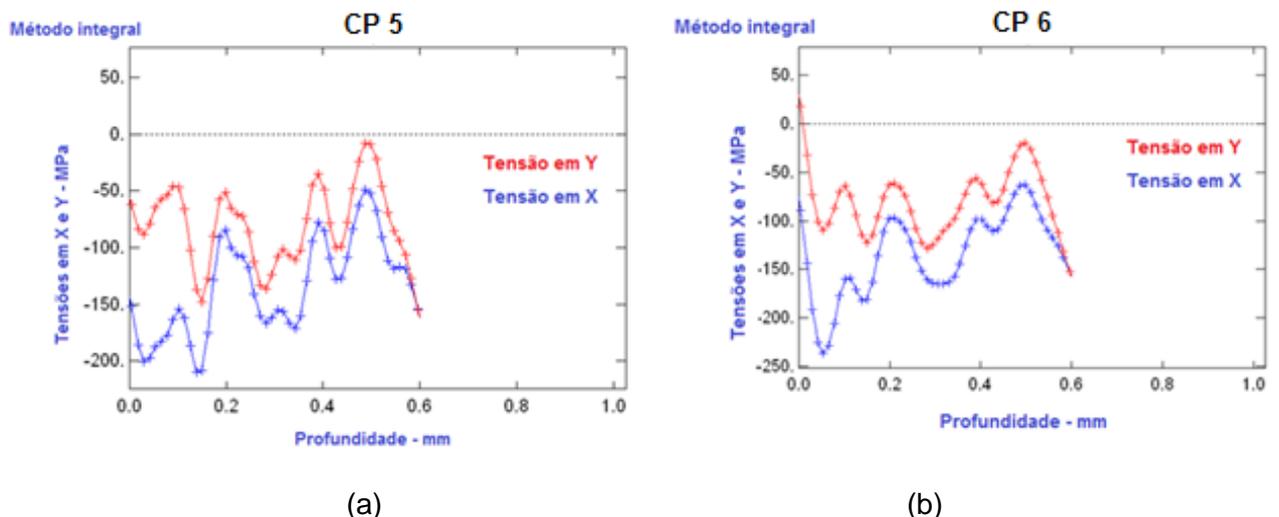
Após a aplicação do alívio de tensões por 20 minutos na frequência sub-harmônica de 61,6 Hz, cuja amplitude é um terço da amplitude da frequência harmônica (66,1 Hz), é feita a segunda aplicação de 10 minutos na frequência de 61,7 Hz, cuja amplitude é um terço da amplitude da frequência harmônica, que é 65,6 Hz.

Verificando-se a frequência harmônica novamente, e não havendo alteração entre a segunda e a terceira leituras, o alívio de tensões foi tido como finalizado.

Na sequência estão apresentados os resultados dos ensaios de tensões residuais e de dureza.

10.3.1 Tensões residuais (furo cego)

No gráfico da figura 29, são mostradas as tensões residuais nos eixos X e Y do CP5 e CP6.



(a) (b)
 Figura 29 – Gráfico tensão versus profundidade obtido pelo processo do furo cego – (a) CP 5 e (b) CP 6, com ATVS.

Nesta figura 29 (a), pode-se observar uma tensão mínima no eixo X de - 210 MPa na profundidade de 0,144 mm, nota-se que a partir da profundidade de 0,144 mm, a tensão no eixo X variou entre -210 MPa (compressão) a -49 MPa (compressão).

Do mesmo modo para o eixo Y, a tensão mínima é de -155 MPa na profundidade de 0,600 mm e com uma variação entre -155 MPa (compressão) a -8 MPa (compressão).

Na figura 29 (b), podemos observar uma tensão mínima no eixo X de - 237 MPa na profundidade de 0,060 mm, com uma variação entre -237 MPa (compressão) a -63 MPa (compressão).

Do mesmo modo para o eixo Y, a tensão mínima é de -152 MPa na profundidade de 0,600 mm e com uma variação entre -152 MPa (compressão) a -20 MPa (compressão).

Obs. Na profundidade de 0,012mm, a tensão é de +18MPa e na profundidade entre 0,012 mm a 0,024 mm a tensão é nula.

10.3.2 Dureza Vickers

Na tabela 10 é mostrado o mapeamento de dureza feita na seção transversal do CP5

Tabela 10 – Durezas medidas nos corpos de prova com ATVS – CP 5.

PROFUNDIDADE	VARREDURA DE DUREZA CP 5 (HV) - SEM TTAT								
	AFASTAMENTO (3 mm em mm)								
	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1,0 mm	395	415	434	441	425	406	398	415	395
2,0 mm	382	405	417	419	422	373	370	415	387
3,0 mm	409	389	336	415	351	404	418	419	396
4,0 mm	323	384	369	417	359	437	434	411	443
5,0 mm	369	416	417	427	397	436	410	384	403
6,0 mm	411	389	432	362	432	373	433	466	315
7,0 mm	425	298	418	407	389	385	340	426	256
8,0 mm	373	251	350	314	362	383	369	346	
9,0 mm	433		374	373	425	467	430	383	
10,0 mm	385		379	334	355	439	404	408	
11,0 mm	344		443	404	404	391	420	344	
12,0 mm	414		422	463	410	454	436		
13,0 mm	393		369	444	404	432	370		
14,0 mm	412		325	424	450	415	320		
15,0 mm	365		306	367	417	418	229		
16,0 mm			218	346	420	372			
17,0 mm				206	354	202			
18,0 mm					230				

Nota-se nesta tabela, que a dureza máxima encontrada foi de 467HV na coluna F, na linha 9 mm e a dureza mínima foi de 202HV na coluna F, linha 17mm.

A média encontrada foi de 387 HV, com um desvio padrão de 110.

Do mesmo modo, a tabela 11 mostra o mapeamento de dureza feita na seção transversal do CP6.

Tabela 11 – Durezas medidas nos corpos de prova com ATVS – CP 6.

PROFUNDIDADE	VARREDURA DE DUREZA CP 6 (HV) - SEM TTAT								
	AFASTAMENTO (3 mm em mm)								
	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1,0 mm	406	404	416	412	407	393	408	382	388
2,0 mm	393	430	401	430	424	399	408	392	411
3,0 mm	404	446	422	425	409	418	369	425	412
4,0 mm	400	411	359	424	349	402	453	413	449
5,0 mm	328	422	345	396	397	424	435	404	376
6,0 mm	395	413	410	408	413	367	448	454	364
7,0 mm	394	309	457	354	411	380	343	424	295
8,0 mm	417	350	369	302	371	331	342	351	241
9,0 mm	327	332	426	396	401	398	413	366	
10,0 mm	402	393	388	435	335	384	388	408	
11,0 mm	415	423	269	429	353	437	442	272	
12,0 mm	368	377	223	440	435	381	381		
13,0 mm	242	235		383	422	396	386		
14,0 mm				331	405	439	377		
15,0 mm				225	378	399	276		
16,0 mm					349	376			
17,0 mm					208	218			
18,0 mm									

Nota-se nesta tabela, que a dureza máxima encontrada foi de 457HV na coluna C, na linha 7 mm e a dureza mínima foi de 208HV na coluna E linha 17 mm.

A média encontrada foi de 382 HV, com um desvio padrão de 110.

11 DISCUSSÃO

Comparando os gráficos da figura 27(a) e 27(b) da página 56 dos CP1 e CP2 sem tratamento de alívio com os gráficos da figura 28(a) e 28(b) da página 59 dos CP3 e CP4 de alívio de tensões por TTAT, nota-se que houve a redução de tensões nos CP3 e CP4.

Do mesmo modo, comparando os gráficos da figura 27(a) e 27(b) da página 56 (corpos de prova CP1 e CP2 - sem tratamento) com os da figura 29(a) e 29(b) da página 61 (corpos de prova CP5 e CP6 – com alívio de tensões por ATVS), nota-se que ocorreu redução de tensões nos CP5 e CP6.

Os gráficos da figura 28(a) e (b) da página 59, dos corpos de provas CP3, CP4, indicam que na superfície desses corpos de prova atuavam tensões negativas (compressão). Mostram, também, que com a profundidade, as tensões permaneceram mais próximas de zero. Ao mesmo tempo, os gráficos da figura 29(a) e (b) da página 61, dos corpos de prova CP5 e CP6, mostram que com a profundidade, as tensões permanecem negativas, com valor médio próximo a - 120MPa.

Além das tensões nas direções x e y, foram traçados os gráficos de tensões residuais máximas e mínimas, σ_1 (Smax) e σ_2 (Smin), apresentados no apêndice A, que para os corpos de prova CP1 e CP2, estão apresentados na figura 30 da página 65. Nesses gráficos, foram acrescentadas as curvas de variação das tensões equivalentes, determinada pelo critério de Von Mises. Além disso, foram traçadas as retas de tendência para essas tensões principais, cujas equações estão apresentadas a seguir:

$$\text{CP1} - \sigma_{eq} = 490,81x + 245,58; \quad (8)$$

$$\text{CP2} - \sigma_{eq} = 472,93x + 256,58. \quad (9)$$

sendo:

σ_{eq} - Tensão equivalente (MPa);

X= profundidade da medida do furo cego (mm).

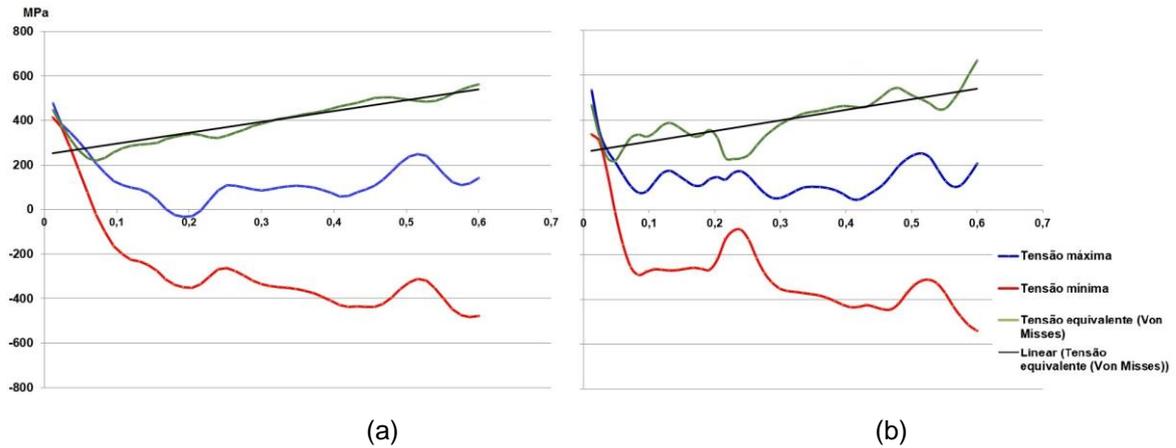


Figura 30 – Tendência das tensões residuais no CP 1 (a) e CP2(b) sem tratamento de alívio.

Observa-se que as equações das retas 8 e 9 para os CP1 e CP2, têm tendência crescente, mostrando que, dentro do limite do estudo, ocorre aumento da das tensões residuais com a profundidade.

Da mesma forma, foram traçados os gráficos de tensões residuais máximas e mínimas para os corpos de prova CP3 e CP4, apresentados na figura 31 da página 65. Nesses gráficos estão representadas as variações de tensões equivalente segundo Von Mises, cuja equação da reta gerada tem as equações apresentadas a seguir:

$$\text{CP3 } \sigma \text{ eq.} = -243,46x + 212,61 \quad (10)$$

$$\text{CP4 } \sigma \text{ eq.} = -50,039x + 68,955. \quad (11)$$

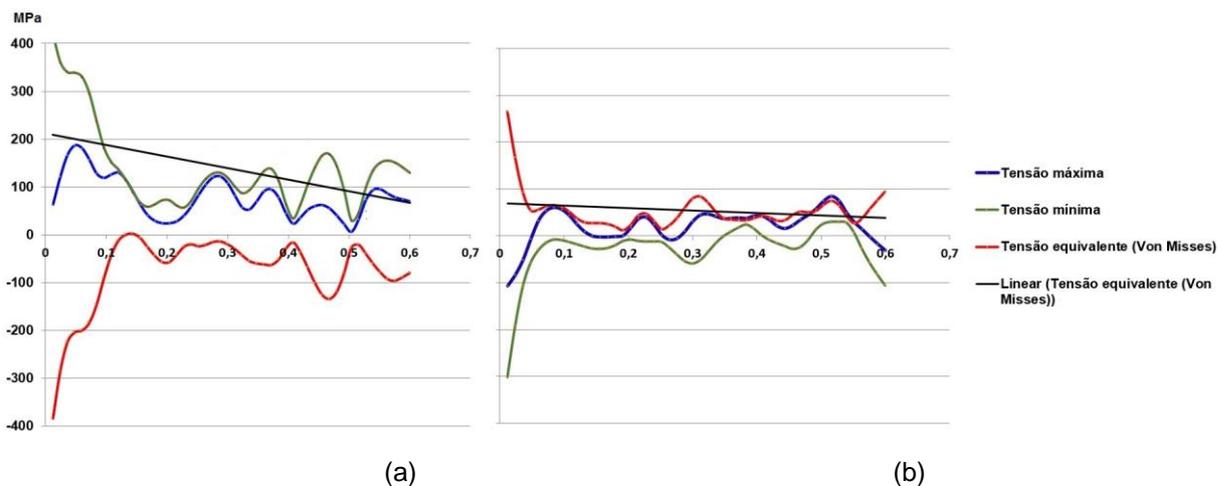


Figura 31 – Tendência das tensões residuais no CP 3 (a) e CP4(b) com TTAT.

Observa-se que as equações das retas para os CP3 e CP4, as retas têm tendência decrescente, (diminuição das tensões residuais)

Com as tensões σ_1 (σ_{max}) e σ_2 (σ_{min}) apresentados no apêndice A da página 75, foram traçados os gráficos da figura 32 para os CP5 e CP6. Nesses gráficos, está representada a variação de tensões equivalente segundo Von Mises, cuja equação da reta gerada tem as equações demonstradas a seguir:

$$\text{CP5 } \sigma_{eq.} = -94,601x + 159,20; \quad (12)$$

$$\text{CP6 } \sigma_{eq.} = -100,81x + 161,30. \quad (13)$$

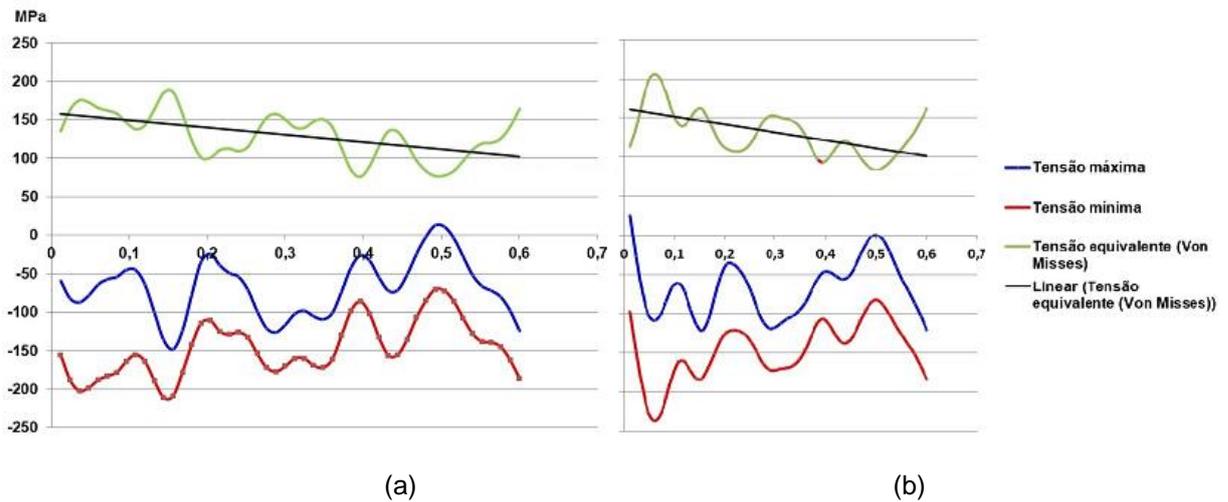


Figura 32 – Tendência das tensões residuais no CP 5 (a) e CP 6(b) com ATVS.

Observa-se que as equações das retas para os CP5 e CP6, têm tendência decrescente, (diminuição das tensões residuais).

Com relação ao ensaio de dureza, a tabela 12, mostra as médias das durezas entre os tratamentos de alívio de tensão por tratamento térmico (TTAT) e vibração sub-ressonante (ATVS).

Tabela 12 – Média das durezas e das tensões residuais – SEM TRATAMENTO, COM TTAT e ATVS

IDENTIFICAÇÃO	MÉDIA DA DUREZA (HV)	MÉDIA DAS TENSÕES EQUIVALENTES (MPa)	TIPO DE TRATAMENTO
CP1	380	396	SEM TRATAMENTO
CP2	384	401	SEM TRATAMENTO
CP 3	268	138	TTAT
CP 4	283	54	TTAT
CP 5	387	130	ATVS
CP 6	382	130	ATVS

Comparando a média das durezas dos corpos de prova com TTAT e dos corpos de prova por ATVS, verificou-se que a média do TTAT ficou menor que a média dos corpos de provas submetidos ao ATVS.

Observa-se, também, que as durezas encontradas estão acima do limite estabelecido pela norma ASME B31.3 - 2012 que é 263 HV.

Comparando as médias de durezas e de tensões residuais encontradas nos corpos de prova que sofreram TTAT e ATVS, com a média de dureza e tensões residuais dos corpos de prova sem tratamento, nota-se que houve redução de tensão e dureza nos corpos CP3 e CP4 em que foi realizado TTAT. Ao mesmo tempo, percebe-se que nos corpos CP5 e CP6, onde foi realizado o ATVS, as durezas não sofreram alterações, mas houve uma diminuição das tensões residuais.

12 CONCLUSÕES

Os resultados dos corpos de prova CP1 e CP2 (sem tratamento) mostram que existem tensões residuais pós-soldagem de reparo, cuja média das tensões equivalentes é 398MPa. Mostram, também, que a média da dureza Vickers ficou igual a 382HV, acima de 263 HV, que é o máximo recomendado pela norma ASME B31.3 – 2012. Tal resultado confirma, que para atender o limite estabelecido pela referida norma, é necessário à execução de tratamento para a redução da dureza.

Os resultados dos corpos de prova CP3 e CP4 (com TTAT) mostram que as tensões residuais foram aliviadas conforme pode ser observado na figura 31 da página 65, cuja média das tensões equivalentes é 96MPa. Mostram, também, que a média da dureza Vickers ficou igual a 275 HV. Observa-se que seguindo as recomendações da norma, o resultado ficou acima do recomendado, porém, bem próximo de 263 HV, que é o máximo recomendado pela norma ASME B31.3 2012 .

Na comparação entre os corpos de prova CP1 e CP2 sem tratamento com os CP3 e CP4 com TTAT houve uma redução de tensões próxima a 76%. Com relação à dureza, a redução foi de 28%.

Embora a redução de dureza tenha sido de 28%, há de se notar que a dureza média dos corpos de prova CP3 e CP4 ficou, apenas, 8,7% acima do valor máximo estabelecido pela norma.

Com os resultados encontrados nos corpos de prova CP5 e CP6 (com ATVS) observa-se que as tensões residuais foram reduzidas, conforme pode ser observado na figura 32, da página 66, cuja média das tensões equivalentes é 130MPa. Mostram, também, que a média da dureza Vickers ficou igual a 385HV, acima de 263 HV, que é o máximo recomendado pela norma ASME B31.3 – 2012.

Na comparação com os corpos de prova CP1 e CP2 houve uma redução de tensões residuais de 67% e observa-se que não houve redução na dureza.

Quando a comparação é feita entre os corpos de prova CP3 e CP4 com os CP5 e CP6, verificou-se que em ambos houve a redução de tensões residuais. Enquanto a redução de tensão nos corpos que sofreram TTAT foi de 76%, a que ocorreu nos corpos que sofreram ATVS foi de 67%. Isto mostra que, em ambos os casos, a redução de tensões foi significativa, existindo uma diferença entre elas de 9%, que representam 36MPa.

Com relação à dureza, há de se observar que não existe forma de comparação, pois, o ATVS não produz redução de dureza superficial.

Por se tratar de um trabalho com o objetivo de comparar solda de reparo entre os tratamentos de TTAT e ATVS, e que possuem características diferentes em relação ao tempo de preparação e execução, pode-se concluir que a solda de reparo com ATVS, leva vantagens sobre o TTAT no quesito tempo. Para os corpos de prova com TTAT, a duração do tratamento foi de aproximadamente 17 horas, e a duração do tratamento com ATVS foi de aproximadamente 30 minutos.

Como comentário final, vale observar, que o presente trabalho teve início em março de 2012, quando da vigência da norma ASME B31.3-2012,. No ano de 2014 ocorreu a atualização da norma, que não mais apresenta a exigência da limitação de dureza, mas recomenda que seja feito o alívio de tensões. (tabela 331.1.1, página 70 da norma ASME B31.3.2014.)

Por fim, entende-se que a dureza, não representava um parâmetro significativo para a determinação do comportamento mecânico dos corpos de prova.

13 PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS

Como proposta para trabalhos futuros é possível citar a possibilidade de estudo de outros parâmetros para especificar o comportamento do corpo reparado. Poderão ser estudados, por exemplo, o limite de fadiga do material após soldagem de reparo sem tratamento, com TTAT e ATVS e fazer a comparação entre eles.

Para redução de tempo de reparo, poderão ser estudados os corpos de prova soldados na mesa de vibração, que permitirão que seja feito o tratamento durante o processo de soldagem.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASME B31.1 - **Power Piping**, Edition 2014.

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

ASTM A335 / A335M – 2015 - **Standard Specifications for Seamless Ferritic Alloy-Steel Pipe for High Temperature Service.**

ASTM - American Society for Testing and Materials - Sociedade Americana para Testes e Materiais. **Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method – Método de Teste Padrão para Determinação de Tensões Residuais através de Extensômetros com Furo Cego.** E 837-08. USA. Jul 2009.

ASTM – American Society for Testing and Materials - Sociedade Americana para Testes e Materiais. **E140-2012 - Standard Hardness Conversion Tables for Metals Relationship Among Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness, Scleroscope Hardness, and Leeb Hardness1** - 2012

ASTM - American Society for Testing and Materials - Sociedade Americana para Testes e Materiais. **E837-2013 - Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain- Gage Method1**; 2013.

BRANDI, S. D; GARCIA, D.M.;- **Soldagem dos Aços P91 : Evoluções Recentes dos Requisitos de Normas Técnicas** - Trabalho apresentado durante a 11a Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos. 2011.

COFIÑO, R.C.; - **Análise das Tensões Residuais em uma Junta Soldada em Condição Overmatch.** 2010 – Centro Universitário da FEI, São Bernardo do Campo, 2010. Disponível em: <http://fei.edu.br/~rodrmagn/TFC/Rachel.pdf>. Acessado em 02/04/2012

CUNHA, B. R. M. da. - **Soldabilidade da nova geração de aços ferríticos Cr-W resistentes a altas temperaturas**. UFRJ, 2006, 123 p. Dissertação (mestrado).

DOU, D., - **Finite Element Modeling of Stress Evolution in Quenching Process** - A Thesis submitted to the Graduate School of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University, 2005 - Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE, Rio de Janeiro – RJ, 2006.

FERREIRA, D.C.F.;- **Efeitos de diferentes tratamento térmicos na microestrutura e nas propriedades mecânicas de um aço 9CrMoWVNb** – 2010 – UFRJ/ Escola Politécnica/ Curso de Engenharia Metalúrgica – 2010.

FUNDERBUCK, R. S.; - "**Post Weld Heat Treatment** “**Tratamento Térmico Pós-Soldagem**, Welding Innovation Vol. XV, N° 2, 1998.

GARCIA, A.; SPIM, J.A.; SANTOS,C.A.; – **Ensaio dos Materiais** – 2ª edição – 2012 – Editora LTC.

GASPAR, N.J.; – **Potencial uso do passe de revenimento no reparo de soldas; Avaliação via mapeamento de durezas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Santa Cecília, Santos - SP, 2013.

HALD, J.; VISWANATHAN, V.; 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.

HEBEL, T. E.; - **Heat Treating, Stress relieving**. p 1, 2, 3, 4 set. 1989.

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

LISBOA, M. B.; - **Nova geração de aços ferríticos Fe-Cr-W(V) Análise 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.

MARTINS, C.A.P.; MORILLA, J.C., VILLANI, P.V.; -**Alívio de Tensões e Condicionamento de Solda por Vibrações Sub-ressonantes**. 2012. Trabalho apresentado no XXXVIII Congresso Nacional de soldagem – ABS Ouro Preto, Minas Gerais.2012.

MARTINS, C.A.P.; - **Tensões e Condicionamento de Solda por Vibrações Sub-Harmônicas – Histórico sobre a Origem desta Tecnologia, sua Introdução no Brasil, Descrição do Processo, Utilização e Aplicação**. 2004. Trabalho de Conclusão de Curso de Pós Graduação (Gestão de Negócios – Foco na Qualidade) Universidade Paulista – UNIP Santos, São Paulo.2004.

MARTINS, C.A.P.; - **Alívio de Tensões por vibrações sub-ressonantes: Análise e parametrização**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Santa Cecília, Santos - SP, 2014

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

META-LAX; Bonal Technologies, Inc. **Sub-Harmonic Vibratory Stress Relief and Weld Conditioning**.<http://www.meta-lax.com/> Acesso em 16/06/2015.

<http://metalurgicavera.com.br/produtos/TABELA-DE-CONVERSAO-DE-DUREZAS.php> - acesso em 10/05/2016

MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V.; SANTOS, D. B.;- **Introdução a Metalurgia da Soldagem**. 2012. – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012. Disponível em:<http://demet.eng.ufmg.br/wp-content/uploads/2012/10/metalurgia.pdf> acessado em 16/06/2015.

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.M. 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.

SKINNER, R. D.; **An investigation Into the Theory Behind Sub-Resonant Stress Relieve – Uma Pesquisa sobre a Teoria de Alívio de tensões por Vibrações Sub-ressonantes.** p. 10, 1987. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2007.

SOUZA, S.A.; – **Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos – Fundamentos teóricos e práticos** – 5ª edição. São Paulo, Editora Edgard Blucher, 1982 – 8ª reimpressão 2004.

TOTTEN, G.; HOWES, M.; INOUE, T.;- **Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel – Manual de Tensões Residuais e Deformações do Aço.** Ohio: ASM International, 2003.

WONG, T. E.; JOHNSON, G. C.; - **Ultrasonic Evaluation of the Nonlinearity of Metals from a Design Perspective – Avaliação Ultrassônica de Não Linearidade de Metais a partir da Perspectiva.** p.15, 1987.

APÊNDICE

APÊNDICE A – DADOS FURO CEGO

Dados peça 1 – Tensões residuais sem tratamento de alívio de tensões

H-DRILL RESIDUAL STRESS CALCULATION ----- Integral Method

PEÇA 1

Rosette type = 062 RE Rosette mean diameter = 5.13 mm
 Young's modulus = 200.0 GPa Hole diameter = 1.800 mm
 Poisson's ratio = 0.300 Stress depth limit = 1.03 mm

Std strain err (auto) = 0.6 ue

Rms strain misfit = 0.6 ue <-- satisfactory

beta=angle Smax clockwise from gage 1

Depth mm	--- STRAINS ---			90% prob. bound	----- STRESSES (X is in gage 1 direction) ----						
	e1 ue	e2 ue	e3 ue		Smax MPa	Smin MPa	Tmax MPa	beta deg	SX MPa	SY MPa	TXY MPa
0.000	0	0	0								
0.004					475	412	31	-14	471	416	15
0.012	-4	-2	-3								
0.018					382	370	6	-64	372	379	4
0.024	-6	-5	-5								
0.030					345	276	35	86	276	344	-5
0.036	-9	-7	-8								
0.042					305	175	65	85	176	303	-11
0.048	-11	-11	-11								
0.054					256	72	92	85	74	255	-14
0.060	-11	-13	-15								
0.066					205	-24	115	87	-24	204	-13
0.072	-11	-15	-16								
0.078					163	-104	133	88	-104	162	-9
0.084	-10	-16	-20								
0.090					129	-165	147	90	-165	129	-2
0.096	-8	-15	-22								
0.102					109	-203	156	-89	-203	109	6
0.108	-6	-16	-25								
0.114					97	-225	161	-88	-224	97	13
0.120	-3	-16	-27								
0.126					90	-235	163	-87	-234	88	19
0.132	-1	-15	-29								
0.138					73	-250	162	-86	-249	72	24
0.144	2	-14	-32								
0.150					41	-278	160	-85	-276	39	26
0.156	3	-14	-34								
0.162					2	-314	158	-85	-312	-1	27
0.168	8	-12	-34								
0.174					-24	-338	157	-85	-336	-26	29
0.180	12	-11	-36								
0.186					-34	-350	158	-84	-348	-37	30
0.192	15	-10	-38								
0.198					-31	-353	161	-84	-349	-34	33
0.204	19	-7	-39								

continua

0.210				-6	-337	166	-84	-333	-10	35
0.216	24	-5	-39							
0.222				41	-302	171	-83	-298	36	39
0.228	29	-3	-42							
0.234				86	-270	178	-83	-265	81	43
0.240	31	-3	-44							
0.246				108	-263	185	-83	-257	102	47
0.252	35	-1	-48							
0.258				106	-278	192	-82	-272	99	51
0.264	41	1	-50							
0.270				98	-299	199	-82	-291	90	55
0.276	45	3	-53							
0.282				90	-320	205	-82	-311	81	59
0.288	48	4	-54							
0.294				86	-336	211	-81	-326	76	64
0.300	55	7	-58							
0.306				90	-344	217	-81	-333	79	69
0.312	59	9	-60							
0.318				97	-348	222	-80	-335	85	73
0.324	64	11	-62							
0.330				104	-351	227	-80	-337	90	78
0.336	69	14	-66							
0.342				105	-358	231	-80	-343	90	81
0.348	75	17	-68							
0.354				104	-365	235	-79	-349	89	85
0.360	80	19	-71							
0.366				99	-375	237	-79	-358	82	88
0.372	86	22	-74							
0.378				88	-391	239	-79	-372	70	93
0.384	92	25	-77							
0.390				73	-411	242	-78	-390	52	98
0.396	96	28	-80							
0.402				59	-431	245	-77	-408	35	106
0.408	103	32	-82							
0.414				60	-439	250	-76	-411	32	115
0.420	111	36	-84							
0.426				77	-436	256	-75	-402	43	127
0.432	113	37	-86							
0.438				91	-437	264	-74	-396	50	141
0.444	119	42	-89							
0.450				106	-438	272	-73	-389	57	155
0.456	126	45	-92							
0.462				132	-425	279	-71	-369	76	168
0.468	133	50	-95							
0.474				170	-395	283	-71	-333	107	178
0.480	140	56	-99							
0.486				209	-358	284	-70	-291	142	183
0.492	143	58	-102							
0.498				237	-329	283	-70	-260	168	185
0.504	148	62	-104							
0.510				248	-313	281	-69	-243	179	185
0.516	154	66	-107							
0.522				239	-319	279	-69	-250	170	183
0.528	---	--	---							

continua

0.528	158	70	-113							
0.534				202	-354	278	-70	-287	135	181
0.540	163	73	-115							
0.546				157	-403	280	-70	-336	90	181
0.552	166	75	-116							
0.558				122	-448	285	-70	-381	55	184
0.564	174	81	-120							
0.570				109	-475	292	-70	-407	40	188
0.576	178	84	-121							
0.582				118	-483	301	-70	-413	48	194
0.588	187	91	-126							
0.596				140	-479	310	-70	-406	67	200
0.600	190	94	-129							

Dados peça 2 – Tensões residuais sem tratamento de alívio de tensões

```

H-DRILL RESIDUAL STRESS CALCULATION  -----  Integral Method
-----

PEÇA 2

Rosette type           = 062 RE           Rosette mean diameter = 5.13 mm
Young's modulus        = 200.0 GPa        Hole diameter         = 1.800 mm
Poisson's ratio        = 0.300           Stress depth limit    = 1.03 mm

Std strain err (auto) = 0.7 ue

Rms strain misfit      = 0.7 ue  <--  satisfactory

beta=angle $max clockwise from gage 1

--- STRAINS --- 90% ----- STRESSES (X is in gage 1 direction) ----
Depth   e1    e2    e3  prob.  $max  $min  Tmax  beta   SX    SY    TXY
mm      ue    ue    ue  bound  MPa   MPa   MPa   deg   MPa  MPa  MPa
0.000   0     0     0
0.004           533  336   99   -30   485  384   85
0.012  -4    -2    -2
0.018           348  303   22   -29   337  313   19
0.024  -6    -4    -4
0.030           264  165   49    61   188  240  -42
0.036  -9    -7    -7
0.042           212  -12   112   62    37  162  -93
0.048  -8    -9    -9
0.054           154 -158  156   64   -99   94 -123
0.060  -8   -11   -11
-----
0.066           103 -257  180   67  -204   50 -127
0.072  -6   -12   -12
0.078           74  -291  183   74  -262   45  -99
0.084  -3   -12   -12
0.090           81  -277  179   84  -273   77  -39
0.096  -1  -14   -14
0.102           122 -266  194  -85  -263  119   34
0.108   2  -12   -17
0.114           162 -268  215  -79  -253  147   79
0.120   5  -12   -20
0.126           172 -271  221  -78  -252  153   90
0.132   8  -10   -23
0.138           152 -269  210  -80  -256  140   71
0.144  12   -9   -25
0.150           128 -263  195  -82  -257  121   51
0.156  15   -7   -28
0.162           107 -259  183  -82  -252   99   52
0.168  19   -8   -31
0.174           108 -264  186  -75  -238   82   94
0.180  22   -7   -33
0.186           135 -268  201  -68  -212   79  139
0.192  25   -4   -35
0.198           144 -221  183  -69  -173   95  124
0.204  28    1   -37
0.210           133 -133  133  -81  -126  127   41
0.216  31    3   -39
0.222           163  -94  128   83   -90  159  -32
0.228  33   -3   -42

```

continua

0.234				170	-90	130	86	-89	168	-18
0.240	33	-3	-44							
0.246				146	-137	141	-84	-133	142	32
0.252	35	-1	-48							
0.258				107	-218	162	-79	-206	95	60
0.264	41	1	-50							
0.270				72	-284	178	-79	-271	59	65
0.276	45	3	-53							
0.282				51	-327	189	-81	-318	42	59
0.288	48	4	-54							
0.294				51	-353	202	-82	-344	42	59
0.300	55	7	-58							
0.306				65	-363	214	-81	-353	56	63
0.312	59	9	-60							
0.318				84	-367	225	-81	-355	71	73
0.324	64	11	-62							
0.330				98	-372	235	-80	-356	83	83
0.336	69	14	-66							
0.342				101	-377	239	-80	-362	86	84
0.348	75	17	-68							
0.354				100	-383	241	-80	-367	85	85
0.360	80	19	-71							
0.366				95	-394	245	-79	-376	77	93
0.372	86	22	-74							
0.378				85	-409	247	-78	-387	64	101
0.384	92	25	-77							
0.390				68	-425	246	-78	-403	46	101
0.396	96	28	-80							
0.402				47	-435	241	-79	-417	29	91
0.408	103	32	-82							
0.414				44	-433	238	-80	-417	28	85
0.420	111	36	-84							
0.426				62	-426	244	-78	-405	41	99
0.432	113	37	-86							
0.438				84	-434	259	-75	-398	49	130
0.444	119	42	-89							
0.450				110	-444	277	-72	-391	57	163
0.456	126	45	-92							
0.462				149	-445	297	-69	-371	75	196
0.468	133	50	-95							
0.474				193	-420	306	-68	-334	107	213
0.480	140	56	-99							
0.486				224	-375	299	-68	-292	142	207
0.492	143	58	-102							
0.498				244	-337	290	-69	-259	166	198
0.504	148	62	-104							
0.510				250	-316	283	-69	-242	177	190
0.516	154	66	-107							
0.522				231	-313	272	-70	-249	167	175
0.528	158	70	-113							
0.534				178	-332	255	-72	-286	132	147
0.540	163	73	-115							
0.546				126	-376	251	-74	-337	87	135
0.552	166	75	-116							
0.558				101	-433	267	-72	-384	52	154
0.564	174	81	-120							
0.570				110	-480	295	-70	-411	41	190
0.576	178	84	-121							
0.582				152	-517	334	-67	-417	51	239
0.588	187	91	-126							
0.596				205	-540	372	-65	-410	75	283
0.600	190	94	-129							

Dados peça 3 – Tensões residuais com tratamento de alívio de tensões -

TTAT

```

PEÇA 3

Rosette type           = 062 RE           Rosette mean diameter = 5.13 mm
Young's modulus        = 200.0 GPa          Hole diameter         = 1.800 mm
Poisson's ratio        = 0.300             Stress depth limit    = 1.03 mm

Std strain err (auto) = 0.7 ue

Rms strain misfit      = 0.6 ue <-- satisfactory

beta=angle Smax clockwise from gage 1

--- STRAINS --- 90% ----- STRESSES (X is in gage 1 direction) ----
Depth   e1    e2    e3  prob. Smax  Smin  Tmax  beta  SX    SY    TXY
mm      ue    ue    ue  bound MPa   MPa   MPa   deg  MPa  MPa  MPa
0.000   0     0     0
0.004           63  -384  223   46  -166  -155  -223
0.012   2    -1     3
0.018           121 -285  203   53  -137  -27   -195
0.024   3    -3     1
0.030           167 -224  196   60  -126   69   -169
0.036   3    -5     0
0.042           187 -204  195   66  -138  120   -147
0.048   5    -6    -1
0.054           181 -200  190   69  -151  132   -128
0.060   7    -8    -2
0.066           157 -184  171   70  -143  116   -111
0.072  10   -9   -6
0.078           128 -146  137   68  -107   89   -96
0.084  12  -11   -5
0.090           119  -91  105   65  -52   81   -82
0.096  12  -12   -6
0.102           126  -43   84   63   -8   91   -68
0.108  12  -13   -6
0.114           130  -12   71   64   15  103   -56
0.120  13  -15  -10
0.126           115   0   58   64   21   93   -45
0.132  14  -18  -10
0.138           90   2   44   63   20   72   -36
0.144  14  -19  -11
0.150           63  -7   35   60   10   45   -30
0.156  14  -19  -12
0.162           41  -26   33   57   -6   21   -30
0.168  15  -19  -12
0.174           29  -44   37   56  -21   7   -34
0.180  15  -20  -13
0.186           24  -57   41   57  -33   0   -37
0.192  16  -21  -13
0.198           24  -57   40   59  -36   3   -36
0.204  17  -24  -14
0.210           28  -42   35   64  -29   15   -28
0.216  18  -24  -14
0.222           40  -25   32   75  -20   35   -16
0.228  18  -26  -15
0.234           59  -20   40   86  -20   59   -6
0.240  18  -24  -16
0.246           83  -24   53  -89  -24   83   1

```

continua

0.252	20	-25	-17							
0.258				105	-21	63	-87	-21	105	6
0.264	21	-26	-19							
0.270				120	-15	67	-86	-14	119	9
0.276	21	-27	-20							
0.282				122	-14	68	-85	-13	121	12
0.288	22	-29	-22							
0.294				108	-20	64	-83	-17	106	16
0.300	23	-29	-24							
0.306				82	-30	56	-80	-26	78	20
0.312	24	-29	-26							
0.318				57	-43	50	-77	-38	52	22
0.324	24	-29	-26							
0.330				53	-55	54	-78	-50	49	22
0.336	26	-29	-27							
0.342				70	-60	65	-80	-56	66	22
0.348	27	-30	-28							
0.354				91	-62	76	-82	-59	88	21
0.360	27	-30	-30							
0.366				95	-63	79	-84	-61	94	17
0.372	29	-30	-32							
0.378				78	-52	65	-86	-52	77	10
0.384	31	-31	-34							
0.390				45	-29	37	89	-29	45	-1
0.396	31	-31	-34							
0.402				23	-16	20	62	-7	15	-16
0.408	32	-32	-35							
0.414				36	-37	37	39	7	-8	-36
0.420	32	-32	-35							
0.426				52	-69	60	38	5	-22	-59
0.432	32	-32	-36							
0.438				60	-101	81	41	-10	-31	-80
0.444	33	-33	-36							
0.450				62	-126	94	44	-30	-34	-94
0.456	33	-35	-36							
0.462				55	-134	94	48	-48	-31	-94
0.468	34	-37	-37							
0.474				40	-119	79	50	-53	-25	-78
0.480	35	-39	-37							
0.486				22	-80	51	53	-43	-14	-49
0.492	36	-40	-37							
0.498				6	-27	16	68	-23	1	-11
0.504	36	-39	-38							
0.510				32	-21	27	-53	-2	13	26
0.516	37	-40	-38							
0.522				73	-40	57	-47	13	20	57
0.528	37	-40	-39							
0.534				94	-61	77	-46	14	19	77
0.540	37	-35	-39							
0.546				95	-79	87	-47	2	13	87
0.552	37	-40	-40							
0.558				86	-93	90	-48	-13	5	89
0.564	38	-37	-40							
0.570				78	-96	87	-48	-19	1	87
0.576	39	-36	-40							
0.582				74	-89	82	-48	-15	-1	81
0.588	39	-36	-41							
0.596				70	-80	75	-46	-7	-2	75
0.600	39	-36	-41							

Dados peça 4 – Tensões residuais com tratamento de alívio de tensões –
TTAT

```

Rms strain misfit      =    0.5 ue  <--  satisfactory

beta=angle $max clockwise from gage 1

--- STRAINS --- 90% ----- STRESSES (X is in gage 1 direction) ----
Depth   e1   e2   e3  prob.  Smax  Smin  Tmax  beta   SX   SY   TXY
  mm    ue   ue   ue bound MPa   MPa   MPa   deg   MPa  MPa  MPa
0.000   0    0    0
0.004   0    0    0   -107  -302   98   34  -170  -240  -91
0.012   2    1    4
0.018   2    1    4   -83  -193   55   42  -133  -144  -55
0.024   2    1    3
0.030   2    1    3   -51  -108   28   62   -95   -63  -23
0.036   3    1    3
0.042   3    1    3    -7   -58   26  -90   -58    -7    0
0.048   4    2    4
0.054   4    2    3   33   -31   32  -76   -27   29   15
0.060   4    2    3
0.066   4    2    3   54   -15   34  -70    -7   46   22
0.072   4    2    3
0.078   4    2    3   61    -8   35  -69    0   52   23
0.084   5    2    3
0.090   5    3    3   57    -9   33  -70   -1   49   21
0.096   5    3    3
0.102   5    3    3   44   -13   29  -73   -9   39   16
0.108   5    2    1
0.114   5    2    1   25   -18   22  -76  -16   22   10
0.120   6    3    2
0.126   6    3    2    9   -23   16  -81  -22    8    5
0.132   6    3    2
0.138   6    3    2    0   -27   14  -89  -27    0    1
0.144   7    3    2
0.150   7    3    2   -2   -28   13   84  -28   -3   -2
0.156   7    4    2
0.162   7    4    2   -2   -26   12   77  -25   -3   -6
0.168   8    4    2
0.174   8    4    2   -1   -20    9   71  -18   -3   -6
0.180   7    3    0
0.186   7    3    0    1   -11    6   83  -10    1   -1
0.192   9    4    3
0.198   9    4    3   18    -8   13  -71   -5   15    8
0.204   9    4    3
0.210   9    4    3   37   -11   24  -67   -4   30   18
0.216   9    4    1
0.222   9    4    1   40   -12   26  -66   -3   31   19
0.228   9    5    1
0.234   9    5    1   24   -12   18  -66   -6   18   13
0.240   9    5    0
0.246   9    5    0    2   -13    7  -58   -9   -3    7
0.252  10    5    1
0.258  10    5    1   -8   -25    8  -33  -13  -20    7
0.264  10    5    1
0.270  10    5    1   -5   -40   18  -38  -18  -27   17
0.276  10    5    1
0.282  10    5    1   10   -54   32  -46  -22  -21   32
0.288  11    6    2
0.294  11    6    2   31   -59   45  -51  -23   -5   44
0.300  12    8    2

```

continua

0.306				45	-52	48	-55	-20	14	45
0.312	11	8	1							
0.318				47	-35	41	-62	-17	29	34
0.324	12	9	1							
0.330				42	-16	29	-72	-11	36	17
0.336	12	9	0							
0.342				37	-1	19	-90	-1	37	0
0.348	13	9	0							
0.354				38	9	15	72	11	35	-9
0.360	13	9	0							
0.366				39	18	11	68	21	36	-7
0.372	13	8	0							
0.378				38	24	7	-81	24	37	2
0.384	13	9	-1							
0.390				43	15	14	-58	23	35	12
0.396	13	8	-1							
0.402				43	1	21	-53	17	28	20
0.408	13	9	-2							
0.414				34	-9	22	-53	7	18	21
0.420	13	9	-2							
0.426				21	-16	18	-61	-7	12	16
0.432	13	10	-2							
0.438				16	-22	19	-77	-20	14	8
0.444	14	9	-2							
0.450				23	-28	25	-88	-27	23	2
0.456	14	10	-2							
0.462				35	-24	30	86	-24	35	-4
0.468	14	9	-4							
0.474				45	-9	27	79	-7	43	-10
0.480	16	10	-3							
0.486				58	13	23	66	20	51	-17
0.492	16	10	-4							
0.498				75	26	25	55	42	59	-23
0.504	15	11	-3							
0.510				85	30	28	55	48	67	-26
0.516	14	7	-6							
0.522				75	30	23	58	43	63	-20
0.528	15	7	-6							
0.534				49	28	10	72	30	47	-6
0.540	15	7	-6							
0.546				29	6	11	-62	11	24	9
0.552	14	7	-7							
0.558				14	-28	21	-52	-12	-2	21
0.564	15	8	-7							
0.570				-2	-58	28	-50	-35	-25	28
0.576	16	9	-6							
0.582				-17	-83	33	-51	-57	-43	32
0.588	16	9	-6							
0.596				-31	-106	37	-53	-79	-57	36
0.600	16	9	-7							

Dados peça 5 – Tensões residuais com tratamento de alívio de tensões por vibração – ATVS

```

PEÇA 5

Rosette type           = 062 RE           Rosette mean diameter = 5.13 mm
Young's modulus        = 200.0 GPa          Hole diameter         = 1.800 mm
Poisson's ratio        = 0.300             Stress depth limit    = 1.03 mm

Std strain err (auto) = 0.4 ue

Rms strain misfit      = 0.4 ue <-- satisfactory

beta=angle $max clockwise from gage 1

--- STRAINS --- 90% ----- STRESSES (X is in gage 1 direction) ----
Depth          e1    e2    e3    90%    Smax  Smin  Tmax  beta    SX    SY    TXY
mm            ue    ue    ue    bound MPa  MPa  MPa  deg    MPa  MPa  MPa
0.000         0     0     0
0.004         0     0     0     -59   -155  48   -80   -152  -62   17
0.012         0     1     0     -82   -188  53   -82   -186  -84   14
0.018         3     1     1     -87   -202  57   -84   -201  -89   12
0.024         5     4     1     -78   -198  60   -86   -198  -79   8
0.030         7     5     2     -64   -188  62   -88   -188  -64   4
0.036         8     6     2     -57   -183  63   90    -183  -57  -1
0.042         10    7     2     -54   -178  62   88    -177  -54  -5
0.048         13    8     3     -45   -164  59   86    -163  -46  -8
0.054         15    9     3     -45   -155  55   85    -154  -46 -10
0.060         17   11     3     -64   -164  50   83    -162  -66 -13
0.066         18   12     4     -100  -189  44   82    -187 -102 -13
0.072         21   13     4     -136  -211  38   83    -210 -137  -9
0.078         23   15     6     -148  -209  30   90    -209 -148  0
0.084         27   16     7     -124  -178  27   -76   -175 -127  13
0.090         29   18     8     -77   -142  33   -63   -128  -90  26
0.096         31   20    10     -34  -114  40   -57   -91  -57  37
0.102         32   23    10     -24  -111  44   -56   -84  -51  40
0.108         33   24    10     -39  -125  43   -57  -100  -65  39
0.114         36   26    12     -49  -129  40   -59  -107  -70  36
0.120         38   28    13     -54  -126  36   -60  -108  -72  31
0.126         40   30    13     -71  -133  31   -60  -118  -86  27
0.132
0.138
0.144
0.150
0.156
0.162
0.168
0.174
0.180
0.186
0.192
0.198
0.204
0.210
0.216
0.222
0.228
0.234
0.240
0.246

```

continua

0.252	41	31	14							
0.258				-99	-154	28	-60	-141	-112	24
0.264	44	33	15							
0.270				-121	-172	26	-61	-160	-133	22
0.276	46	36	17							
0.282				-126	-177	26	-63	-167	-137	21
0.288	48	38	19							
0.294				-116	-170	27	-67	-162	-124	19
0.300	51	41	20							
0.306				-102	-160	29	-72	-155	-108	17
0.312	53	42	21							
0.318				-98	-160	31	-76	-156	-102	15
0.324	55	44	22							
0.330				-105	-169	32	-79	-166	-107	12
0.336	58	47	23							
0.342				-109	-172	31	-82	-171	-111	8
0.348	60	49	24							
0.354				-101	-161	30	-84	-161	-102	6
0.360	63	51	26							
0.366				-73	-130	28	-82	-129	-74	8
0.372	65	53	27							
0.378				-42	-98	28	-76	-94	-45	13
0.384	67	53	27							
0.390				-26	-86	30	-68	-77	-35	21
0.396	68	55	28							
0.402				-33	-102	35	-61	-85	-49	30
0.408	70	57	28							
0.414				-55	-133	39	-57	-109	-78	36
0.420	72	59	29							
0.426				-72	-156	42	-55	-128	-100	39
0.432	74	62	31							
0.438				-71	-155	42	-55	-127	-99	40
0.444	76	64	32							
0.450				-51	-135	42	-56	-109	-77	39
0.456	78	66	33							
0.462				-24	-107	41	-58	-83	-48	37
0.468	79	67	33							
0.474				-2	-85	41	-59	-63	-24	36
0.480	82	69	34							
0.486				13	-70	41	-60	-49	-8	36
0.492	82	70	34							
0.498				11	-72	42	-61	-52	-9	35
0.504	84	72	35							
0.510				-4	-86	41	-62	-67	-22	34
0.516	85	74	35							
0.522				-28	-108	40	-62	-91	-46	33
0.528	86	75	36							
0.534				-52	-128	38	-62	-111	-69	32
0.540	89	77	36							
0.546				-66	-138	36	-59	-119	-85	31
0.552	91	78	37							
0.558				-72	-139	34	-55	-117	-94	32
0.564	92	81	38							
0.570				-80	-145	33	-50	-119	-106	32
0.576	93	82	39							
0.582				-98	-162	32	-47	-132	-127	32
0.588	94	84	40							
0.596				-124	-186	31	-45	-155	-155	31
0.600	97	86	41							

Dados peça 6 – Tensões residuais com tratamento de alívio de tensões por vibração - ATVS

PEÇA 6

Rosette type = 062 RE Rosette mean diameter = 5.13 mm
 Young's modulus = 200.0 GPa Hole diameter = 1.800 mm
 Poisson's ratio = 0.300 Stress depth limit = 1.03 mm

Std strain err (auto) = 0.5 ue

Rms strain misfit = 0.5 ue <-- satisfactory

beta=angle \$max clockwise from gage 1

Depth mm	--- STRAINS ---			90% prob. bound	----- STRESSES (X is in gage 1 direction) ----						
	e1 ue	e2 ue	e3 ue		\$max MPa	\$min MPa	Tmax MPa	beta deg	SX MPa	SY MPa	TXY MPa
0.000	0	0	0								
0.004					26	-98	62	-75	-90	18	32
0.012	1	0	-2								
0.018					-28	-149	61	-79	-144	-32	23
0.024	2	0	0								
0.030					-72	-193	61	-83	-192	-73	14
0.036	2	3	0								
0.042					-101	-226	63	-88	-226	-101	4
0.048	7	5	1								
0.054					-109	-237	64	88	-237	-109	-5
0.060	8	6	1								
0.066					-102	-230	64	84	-229	-103	-12
0.072	10	7	2								
0.078					-85	-208	62	82	-206	-87	-16
0.084	15	8	3								
0.090					-67	-180	56	82	-177	-69	-16
0.096	15	9	3								
0.102					-61	-162	50	81	-160	-64	-15
0.108	17	11	3								
0.114					-72	-161	44	82	-159	-74	-12
0.120	18	11	4								
0.126					-94	-172	39	84	-171	-94	-8
0.132	21	13	4								
0.138					-114	-182	34	89	-182	-115	-2
0.144	23	15	6								
0.150					-122	-182	30	-83	-181	-123	7
0.156	27	16	7								
0.162					-109	-169	30	-72	-163	-115	18
0.168	29	18	8								
0.174					-81	-152	35	-62	-137	-96	29
0.180	31	20	10								
0.186					-53	-134	41	-58	-111	-75	37
0.192	32	23	10								
0.198					-37	-124	43	-57	-98	-63	39
0.204	33	24	10								
0.210					-37	-121	42	-57	-97	-62	38
0.216	36	26	12								
0.222					-44	-122	39	-58	-101	-65	35
0.228	38	28	13								
0.234					-56	-127	36	-59	-109	-74	31
0.240	40	30	13								
0.246					-74	-137	31	-60	-121	-90	27
0.252	41	31	14								

continua

0.258				-95	-151	28	-61	-138	-108	24
0.264	44	33	15							
0.270				-111	-164	26	-61	-152	-123	22
0.276	46	36	17							
0.282				-119	-171	26	-64	-161	-129	20
0.288	48	38	19							
0.294				-118	-172	27	-68	-165	-126	19
0.300	51	41	20							
0.306				-113	-170	29	-72	-165	-118	17
0.312	53	42	21							
0.318				-107	-169	31	-76	-165	-111	14
0.324	55	44	22							
0.330				-103	-166	31	-79	-164	-105	11
0.336	58	47	23							
0.342				-96	-159	31	-82	-157	-98	9
0.348	60	49	24							
0.354				-86	-146	30	-83	-145	-87	8
0.360	63	51	26							
0.366				-71	-128	29	-81	-126	-72	9
0.372	65	53	27							
0.378				-56	-112	28	-75	-109	-60	14
0.384	67	53	27							
0.390				-47	-107	30	-68	-99	-56	21
0.396	68	55	28							
0.402				-47	-115	34	-61	-99	-62	29
0.408	70	57	28							
0.414				-52	-128	38	-57	-105	-74	35
0.420	72	59	29							
0.426				-56	-137	41	-55	-111	-82	38
0.432	74	62	31							
0.438				-53	-136	42	-55	-109	-80	39
0.444	76	64	32							
0.450				-42	-126	42	-56	-99	-68	39
0.456	78	66	33							
0.462				-26	-110	42	-58	-86	-50	38
0.468	79	67	33							
0.474				-11	-95	42	-59	-72	-34	37
0.480	82	69	34							
0.486				-1	-85	42	-60	-63	-22	36
0.492	82	70	34							
0.498				0	-83	42	-61	-63	-20	36
0.504	84	72	35							
0.510				-7	-90	41	-62	-71	-26	34
0.516	85	74	35							
0.522				-22	-102	40	-62	-84	-40	33
0.528	86	75	36							
0.534				-40	-116	38	-61	-99	-57	32
0.540	89	77	36							
0.546				-57	-128	36	-59	-109	-76	31
0.552	91	78	37							
0.558				-72	-140	34	-55	-117	-94	32
0.564	92	81	38							
0.570				-87	-152	33	-51	-126	-112	32
0.576	93	82	39							
0.582				-103	-167	32	-48	-138	-132	32
0.588	94	84	40							
0.596				-121	-183	31	-45	-152	-152	31
0.600	97	86	41							

APÊNDICE B – RELATÓRIO DE ATVS

<small>Meta-Lax® by BONAL TECHNOLOGIES, INC. - [Job1.mf]</small>		<small>Meta-Lax® is a Patented process</small>	
META-LAX® Provider		Customer	
<div style="background-color: #0056b3; color: white; padding: 10px; text-align: center; font-weight: bold; font-size: 24px;">TRAMONTINA</div>		Tel#:	
Part(s)		Settings	
Part: 1 thru 1 WO#: Serial#: Part Name: CORPOS DE PROVA Material/Type: Size: x x cm Weight: kg Cold Worked: Blank		Location: 1 of 1 Force Inducer: 2A Material Class: A Steel Batch Weight: 1000 kg Mode: Manual Stress Relief Dwell Timer: 20 min Monitor Timer: 10 min Eccentric: 80%	
META-LAX® Stress Relief Certification			
Scan Results			
Total Scans Completed: 3		First Scan	Final Scan
Harmonic Frequency:		66.1 Hz	66.6 Hz
Peak Amplitude:		99.9	107.9
SUB-Harmonic Frequency:		61.6 Hz	61.7 Hz
Date & Time: 16/07/2016 09:46:58		Final Dwell %	25
Harmonic Frequency Difference:		0.6 Hz	
Peak Amplitude Difference:		8.0	
Total Dwell Time:		30:00	
Total Monitor Time:		0:00	
META-LAX® Provider		Job Notes	
TRAMONTINA ELETRIK S/A RODOVIA RSC 470, KM 230 CARLOS BARBOSA, RS 95185-000 BRASIL Tel#: (54) 3461-8200 Fax#:			
Opr: Juliano Supptitz			
<small>Meta-Lax® is a registered trademark of Bonal Technologies, Inc. Form and Software Copyright © 2001-2006, by Bonal Technologies, Inc. All rights reserved.</small>			