



Associação Brasileira de Soldagem

**XLI CONSOLDA – CONGRESSO NACIONAL DE SOLDAGEM
Salvador - BA – 12 a 15 de Outubro de 2015****CT110 Avaliação de Propriedades Mecânicas de Juntas Soldadas do Aço P91 Submetidas a Diversas Condições ao Tratamento Térmico de Alívio de Tensões****(Mechanical Properties Evaluation of Steel Welded Joints Subjected to P91 Various Conditions to the Heat Treatment of Stress Relief)***Marcos Antônio Teixeira¹ e Maurício David Martins das Neves²**¹Petrobras S. A., Engenharia para Empreendimentos de Abastecimento (ENG-AB), Cubatão, SP, Brasil,
teixeira.rpbc@petrobras.com.br**²Comissão Nacional de Energia Nuclear (CENEN), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN),
Coordenadoria de Engenharia e Ciência dos Materiais, São Paulo, SP, Brasil
mdneves@ipen.br***Resumo**

Os aços P91 vêm sendo amplamente utilizados como componentes para trabalhar em elevadas temperaturas nas indústrias de geração de energia, petroquímica e refinarias de petróleo em consequência da sua excelente resistência a fluência e corrosão em altas temperaturas. Apesar destas notáveis propriedades tem sido encontradas dificuldades na soldagem de juntas do aço P91, visto que podem apresentar valores de dureza fora dos limites especificados e provocando diminuição de diversas propriedades mecânicas. Neste estudo foram confeccionadas juntas tubulares do aço P91, por meio de soldagem usando o processo GTAW (Gas Tungsten Inert Gas) na raiz e o processo SMAW (Shielded Metal Arc Welding) nas camadas de soldagem subsequentes. As juntas soldadas foram submetidas ao Tratamento Térmico de Alívio de Tensões (TTAT) com diferentes tempos de revenimento e posteriormente, analisada as propriedades mecânicas para atender condições impostas por normas do setor, através da realização de ensaios mecânicos de tração convencional e à quente (540°C) e dureza Vickers. Os resultados demonstraram que as propriedades mecânicas do aço P91 sofrem alteração com o aumento do tempo de revenimento, indicando que é possível obter um melhor controle das propriedades com o tempo de patamar maior do que 4 horas no TTAT.

Palavras-chave: Aço 9Cr-1Mo, Metal de solda, Zona termicamente afetada (ZTA), Tratamento térmico pós-soldagem (PWHT), Caracterização mecânica.

Abstract: *The P91 steels have been widely used as components to work at high temperatures in power generation industries, petrochemicals and oil refineries as a result of its excellent creep and corrosion resistance at high temperatures. Despite these remarkable properties, difficulties in welding together steel P91 have been encountered, as they may exhibit hardness values outside the specified limits and cause a reduction in various mechanical properties. In this study, steel P-91 tubular joints were made through welding using the GTAW process at the root and the SMAW process in the subsequent welding layers. The welded joints were subjected to PWHT with different tempering times and subsequently the mechanical properties of the welded joint were analyzed to meet the conditions set by industry standards by performing conventional traction test, elevated-temperature tension (540°C) and Vickers hardness. The results showed that the mechanical properties of steel P91 suffer changes with increasing tempered time, indicating that it is possible to obtain better control of the properties with time greater than 4 hours PWHT.*

Key-words: *P91 steel, Modified 9%Cr-1Mo, Weld metal, Post-weld heat treatment (PWHT), Mechanical Properties.*

1. Introdução

O governo federal tem investido no aumento da capacidade de geração de energia com a construção de novas usinas termoeletricas que são equipadas com uma tecnologia moderna de turbinas de ciclo combinado permitindo aumentar o fornecimento energia para o Sistema Interligado Nacional (SIN) garantindo a segurança energética brasileira. Nestas novas instalações é essencial aumentar a temperatura e a pressão do vapor na entrada das turbinas para melhorar a eficiência energética e diminuir as emissões de CO₂ [1], então, vem sendo estudada a introdução de novos materiais com propriedades mecânicas superiores aos empregados atualmente para suportar estas novas condições. Além do mais, na construção e montagem das indústrias de petróleo e

petroquímica busca-se uma maior produtividade por meio de redução de espessura de parede de vasos de pressão e tubulações, visto que é menor a quantidade de matéria prima e tem um menor tempo para sua soldagem.

Desta forma, uma nova geração de aços-ligas Cr-Mo para altas temperaturas de serviço vem sendo estudada nestas aplicações. O aço modificado 9Cr-1Mo-V (P91, onde P = “Pipe”) é apenas o começo, pois novas ligas de Cr-Mo estão sendo experimentadas em todo o mundo. O aço P91 é amplamente utilizado como componentes sujeitos a alta temperatura em centrais termoeletricas, usinas nucleares e petroquímicas pela sua excelente resistência a fluência e corrosão, que operam com vapor nas condições de alta temperatura (600 °C) e pressão (30 MPa) [2].

Por outro lado, a soldagem deste material pode se apresentar uma atividade consideravelmente complexa, à medida que diversos cuidados devem ser observados antes, durante e após a operação de união, para se garantir que as juntas soldadas apresentem qualidade adequada e propriedades compatíveis com o metal de base. Além do mais, algumas dificuldades foram encontradas na soldagem da construção e montagem de termoeletricas e tubos de fornos nas unidades da Petrobras, como por exemplo, estabelecer os limites de propriedades mecânicas alcançadas e conseguir um melhor controle de calor no processo de soldagem e tratamento térmico para obter propriedades mecânicas definidas em normas e microestruturas adequadas. Enquanto não for realizado o tratamento térmico pós-soldagem (TTPS) o metal de solda e parte da zona afetada pelo calor apresentam estrutura martensítica, frágil e susceptível à ocorrência de trincas, portanto é obrigatório realização de tratamento térmico de revenimento no P91, independente da espessura soldada. Neste tratamento toda a martensita é revenida, e a peça finalmente possuirá níveis de dureza e tenacidade ideais à aplicação. O TTPS é constituído por um aquecimento até a temperatura abaixo da linha de transformação A_{c1} , geralmente os códigos de projeto de equipamentos recomendam a temperatura de patamar entre 730 e 775 °C, e o tempo geralmente calculado em função da espessura, com uma metodologia específica para cada código. É uma boa prática para determinar o tempo de patamar do TTPS é se basear nos testes de qualificação do procedimento de soldagem [3].

Quando devidamente tratado termicamente como especificado na ASTM A335 [4], o metal de base do aço P91 devem adquirir na temperatura ambiente as seguintes propriedades mecânicas mínimas: limite de resistência de 585 MPa, limite de escoamento de 415 MPa e a dureza no intervalo de 196 a 265 HV. De acordo com a norma Petrobras 133 [5] a dureza da zona fundida (ZF) e na zona afetada pelo calor (ZAC) após tratamento térmico pós-soldagem (TTPS) não deve exceder o valor de 250 HV. Diferenças na dureza entre o metal base, ZF e ZAC são típicas nas soldas do aço P91, dado que a dureza pode ser um indicador de resistência para estas ligas, algumas regiões da junta soldada oferece um menor desempenho. A ZF tende a ser mais resistente do que o metal de base e definitivamente mais resistente do que a ZAC [6, 7, 8].

Partindo deste contexto, o presente estudo teve como objetivo avaliar a influência do tempo de tratamento térmico pós-soldagem (TTPS) sobre as propriedades mecânicas (resistência à tração convencional, resistência à tração à quente e dureza) do aço P91, numa tubulação soldada pelos processos, TIG na raiz da solda e eletrodo revestido no restante das camadas, com base em requisitos estabelecidos em normas Petrobras 133 [5] e ASTM A335 [4].

2. Procedimento experimental

2.1 Soldagem e tratamento térmico da tubulação

O aço P91 usado neste estudo foi fabricado na forma de tubo sem costura (ASTM A335 Gr. P91) e uma curva de 90° (ASTM A234 Gr. WP91) que foram comprados para a construção e montagem da tubulação de transferência da Usina Termoeletrica (UTE) Euzébio Rocha, em Cubatão, SP. O tubo e a curva têm 14” (diâmetro externo 355,6 mm) de diâmetro e 27,0 mm e 35,71 mm de espessura de parede respectivamente.

O material recebido, de acordo com o fabricante, foi submetido a um tratamento de normalização e revenimento, que consiste numa austenização a 1050°C por 5 minutos, com resfriamento ao ar, e revenido a 780°C por 45 minutos.

A soldagem do tubo com a curva foi conduzida na área de transferência da UTE e a Refinaria Presidente Bernardes (RPBC). A tubulação foi biselada conforme a geometria mostrada na Figura 1.

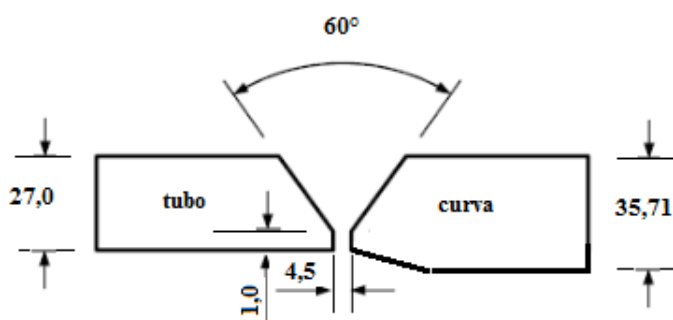


Figura 1. Geometria da junta de topo da tubulação (tubo e curva).

Utilizando-se o processo TIG na raiz do cordão e eletrodo revestido no restante das camadas de preenchimento, a junta foi soldada na posição de teste 5G, conforme ASME IX, QW-461.4 [9]

As variáveis de soldagem utilizadas para a produção das juntas, bem como informações referentes ao controle de calor e consumíveis estão resumidas na Tabela 1.

Tabela 1. Materiais e principais parâmetros da soldagem usados no experimento.

P-Number	15E
Tipo ou grau do MB	P91
Metais de adição/ Diâmetro	GTAW- ER-90S-B9 (ϕ) = 3,2 mm THERMANIT MTS 3 SMAW - E-9015 B9 (ϕ) = 3,25/4,00 mm
Marca comercial	THERMANIT Cr 9 V
Gás de proteção	Argônio – 13-18 l/min
Intensidade de corrente, polaridade e diâmetro do eletrodo de W(ϕ)	Raiz – GTAW 90-120 A, (ϕ) = 2,4 mm, CCEN Enchimento – SMAW 100-145 A, CCEP
Temperatura de pré-aquecimento	250 °C
Temperatura de interpasse:	350 °C
TTPS (temperatura de patamar)	760°C com diferentes tempos de patamar
Razão de aquecimento	150°C/h de 80 até 550°C e 80°C/h de 550 até 760°C
Número de passes/camadas	27 (3 GTAW + 24 SMAW) / 13

Após a soldagem o aço foi submetido a tratamento térmico de revenimento em forno, de acordo com a Tabela 2. Então, quatro diferentes condições metalúrgicas foram obtidas, variando de soldado sem tratamento e com tratamento.

Tabela 2. Tratamentos térmicos e ensaios executados no aço P91

Denominação	Descrição	Ensaio/Microestrutura esperada
CS (como soldado)	Soldado sem tratamento	Tração convencional, tração à quente (540°C), dureza e análise de composição química e microestrutural.
T760 1 h	CS + revenido 760°C por 1h	Martensita revenida com fina distribuição de carbonítritos.
T760 4 h	CS + revenido 760°C por 4h	
T760 8 h	CS + revenido 760°C por 8h	

Foram realizados tratamentos térmicos pós-soldagem (TTPS) consistindo de aquecimento a 760°C por 1 hora, 4 horas e 8 horas, visando verificar a evolução das propriedades mecânicas do tubo em função do tempo de tratamento (revenimento), conforme segue:

- CS (como soldado) = soldado sem tratamento;
- T760 1h = CS + revenido 760°C por 1 h;
- T760 4h = CS + revenido 760°C por 4 h;
- T760 8h = CS + revenido 760°C por 8 h.

A Figura 2 representa o trecho de 300 mm do tubo original que foi utilizado para remoção dos corpos após soldagem para realização de ensaios mecânicos.



Figura 2. Remoção dos corpos de prova do material na forma de tubo 14", espessura de 27 mm, para realização dos ensaios.

2.2 Análises químicas

A junta soldada sem tratamento foi submetida à análise química na seção transversal com o objetivo de determinar os teores dos principais elementos presentes no metal de solda e metal de base do tubo e da curva. Na região da solda foram realizadas duas análises na região do depósito do processo TIG e três no processo eletrodo revestido, veja a Figura 3 com a localização dos cinco pontos.

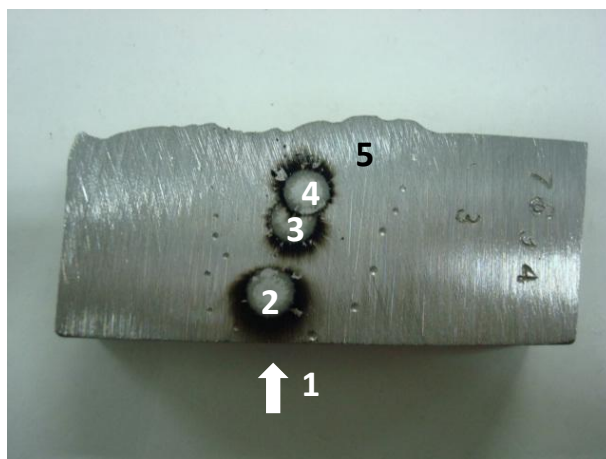


Figura 3. Regiões das análises químicas na seção transversal da junta soldada: ponto 1 e 2 (raiz - TIG) e 3, 4 e 5 (enchimento – eletrodo revestido) .

As análises dos elementos C, Mn, Si, P, S, Cr, Ni, Mo, Al, Cu, Ti, V e Nb foram realizadas pelo Espectrômetro de emissão óptica no equipamento marca ARL, modelo 3460, conforme norma ASTM E 415 [10].

As análises dos elementos oxigênio e nitrogênio foram feitas via combustão no equipamento marca LECO, modelo TC 400, conforme norma ASTM E 1019 [11].

2.3 Ensaio de tração convencional

Foram realizados ensaios de tração, um para cada tempo de revenimento, com as amostras retiradas do sentido transversal à solda nas seguintes condições:

- revenimento de 4 horas (T760 4h);
- revenimento de 8 horas (T760 8h).

As amostras para os ensaios de tração convencional do metal de solda foram realizados na máquina universal Tinius Olsen MTR-006, escala 60 toneladas, preparadas e conduzidas conforme norma para ensaio mecânico ASTM A370 [12]. Na Figura 4 é representado o esquema de preparação com as dimensões do corpo de prova prismático transversais à solda, preparados de acordo com a norma ASME Section IX [9] e dimensões nominais de 19,0 x 19,0 mm na seção reduzida.

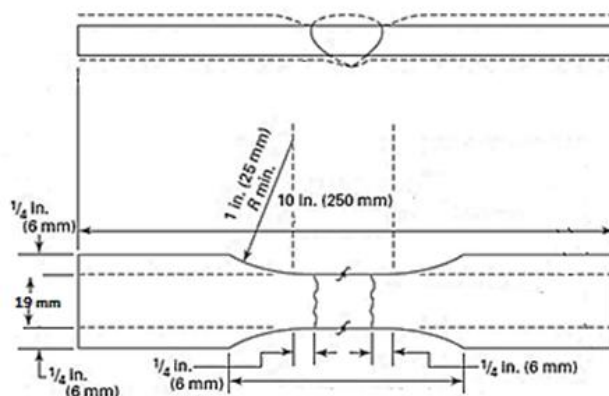


Figura 4. Esquema com a dimensão do corpo de prova de tração transversal das soldas de acordo com a norma ASME BPVC Section IX: 2010, QW-462.1 (b) [9].

2.4 Ensaio de tração à quente

Foram fabricados doze corpos de prova para ensaios de tração à quente na temperatura de 540°C. As amostras foram extraídas do sentido transversal e longitudinal da junta soldada e no metal de base do tubo e da curva na condição de TTPS de 1 hora, 4 horas e 8 horas de permanência na temperatura de patamar. Sendo assim, foram preparados três conjuntos (um para cada tempo de tratamento) com quatro corpos de provas de cada grupo. As seguintes condições de ensaio foram aplicadas:

- T760 1h - 4 ensaios com temperatura de 540°C - região transversal e longitudinal da solda, metal de base do tubo e da curva.
- T760 4h - 4 ensaios com temperatura de 540°C - região transversal e longitudinal da solda, metal de base do tubo e da curva.
- T760 8h - 4 ensaios com temperatura de 540°C - região transversal e longitudinal da solda, metal de base do tubo e da curva.

Preparação da amostra foi executada conforme ASTM E8/E8M [13] e o método do ensaio estabelecido na norma ASTM E21[14]. Na Figura 5 são observadas as amostras cilíndricas com diâmetro de 9 mm na região útil, com rosca tipo M16 para pega da máquina de ensaio de tração.



Figura 5. Geometria dos corpos de prova para o ensaio de tração à quente.

Os ensaios foram executados na Máquina universal Tinius Olsen MTR-006 na escala 60 toneladas. Na Figura 6 é mostrado o equipamento utilizado para realização deste ensaio com o posicionamento do corpo de prova.



Figura 6. Máquina universal utilizada para ensaios de tração à quente com forno elétrico e extensômetro fixado no corpo de prova.

Os ensaios foram realizados com velocidade constante (0,005 mm/min) até a determinação do escoamento, onde foram removidos os extensômetros. Em seguida a velocidade foi aumentada para 0,05 mm/min até a ruptura da amostra.

2.5 Ensaio de dureza

Foram realizadas medidas de dureza pelo método “Vickers” com carga de 5 Kgf e o ensaio foi conduzido conforme a norma ASTM E 92 [15]. Perfis de dureza foram construídos a partir de medições na seção transversal conforme ilustrado na Figura 7. Utilizaram-se quatro eixos de medição na seção transversal de cada junta, desde próximo à parede externa do tubo até próximo à parede interna. No primeiro e no segundo eixo foram feitas doze medições no metal de base (seis no tubo e seis na curva), seis na ZAC (três em cada lado) e seis na Zona Fundida (ZF). No terceiro eixo foram feitas doze medições no metal de base (seis no tubo e seis na curva), seis na ZAC (três em cada lado) e cinco na Zona Fundida (ZF). No quarto eixo foram feitas doze medições no metal de base (seis no tubo e seis na curva), seis na ZAC (três em cada lado) e quatro na Zona Fundida (ZF). Dessa forma, totalizando 93 medições para cada junta soldada nas condições de CS, T760 1h, T760 4h e T760 8h. Foi calculado o valor médio de dureza da cada região da junta soldada: Metal de base do tubo, ZAC do tubo, ZF, ZAC da curva e metal de base da curva.

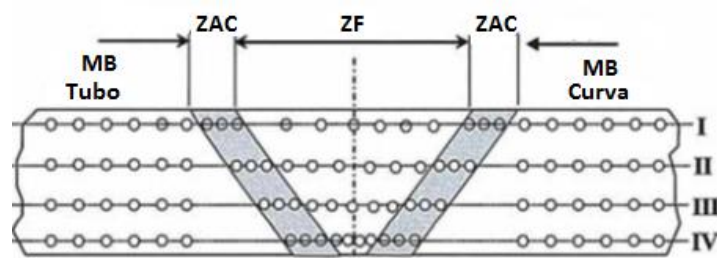


Figura 7. Pontos de medição de dureza na seção transversal da junta soldada, totalizando 93 medições.

O primeiro ponto na zona afetada pelo calor (ZAC) está a 0,2 mm da linha de fusão, os demais pontos estão equidistantes em 0,5 mm. O equipamento para as medições de dureza utilizado foi o durômetro de bancada marca Reicherter.

3. Resultados e discussão

3.1 Análises químicas

A análise química pelo método de Espectrômetro de emissão óptica (EEO), do metal de base, apresentou os resultados (% em peso) conforme Tabela 3.

Tabela 3. Composição química por EEO do metal de base do tubo e da curva [% em peso]

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	Cu	Ti	V	Nb
0,131	0,416	0,274	0,011	0,003	9,076	0,124	0,900	0,010	0,111	0,001	0,237	0,065
0,111	0,438	0,241	0,015	0,005	8,790	0,173	0,852	0,003	0,004	0,002	0,221	0,076

O resultado do teor de carbono (% C) do MB do tubo apresentou um valor acima do máximo permitido pela norma ASTM A 335 [4], que é de 0,12%, entretanto, considera-se o desvio permitido pela norma, de +0,02% para análise do produto.

Pelo método via combustão, a análise do metal de base apresentou 0,024% de oxigênio e 0,037% de nitrogênio, ambos em porcentagem em peso.

Para a junta soldada, os resultados das análises químicas na região da seção transversal: ponto 1 e 2 (raiz - TIG) e 3, 4 e 5 (enchimento - Eletrodo revestido) são apresentados na Tabela 4 e Tabela 5.

Tabela 4. Composição química por EEO nos depósitos por TIG [% em peso]

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	Cu	Ti	V	Nb
0,110	0,511	0,243	0,010	0,005	9,082	0,616	0,936	0,002	0,055	0,001	0,213	0,061
0,126	0,644	0,211	0,010	0,008	9,283	0,617	0,925	ND	0,039	0,005	0,216	0,050

Tabela 5. Composição química por EEO nos depósitos por Eletrodo Revestido [% em peso].

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	Cu	Ti	V	Nb
0,152	0,656	0,217	0,011	0,011	9,287	0,648	0,935	ND	0,033	0,006	0,221	0,050
0,140	0,645	0,194	0,011	0,010	9,402	0,656	0,941	ND	0,033	0,005	0,200	0,049
0,182	0,643	0,198	0,011	0,011	9,425	0,695	0,931	ND	0,033	0,006	0,212	0,046

Tanto os depósitos em TIG quanto os depósitos por Eletrodo Revestido apresentaram composições químicas similares, exceto pelos teores de carbono, maiores nos depósitos por Eletrodo Revestido. Verificou-se ainda que os teores de Mn, Ni, Ti nos depósitos de solda foram significativamente maiores do que observados no metal de base. A quantidade Ni e Mn afeta a temperatura crítica de transformação inferior Ac_1 do aço P91, quanto maior a soma menor a temperatura Ac_1 [3]. Os teores de Ni + Mn do metal de solda apresentaram valores mais elevados do que o MB.

3.2 Ensaio de tração convencional (temperatura ambiente)

Todas as fraturas nos corpos de prova ocorreram no metal de base. A Tabela 6 apresenta os resultados do ensaio de tração convencional realizado no sentido transversal nas juntas soldadas em função do tempo de revenimento.

Tabela 6. Propriedades Mecânicas da junta soldada em função do tempo de revenimento

Tempo de revenimento (h)	Limite de Resistência (MPa)	Limite de Escoamento (MPa)	Alongamento em 50 mm (%)
4	655	476	21
8	653	506	21

Constata-se que a diminuição do limite de resistência (LR) com o aumento do tempo de revenimento não é significativa.

Todos os resultados de tração transversal das juntas soldadas atendem os requisitos da norma ASME IX-2010, QW-422 [9], de limite de resistência mínimo de 585 MPa e também a norma ASTM A 335 [4], de limite de resistência mínimo de 585 MPa, limite de escoamento mínimo de 415 MPa e alongamento mínimo de 20%.

3.3 Ensaio de tração à quente

Os ensaios de tração à quente (540°C) longitudinal e transversal da junta soldada apresentaram os resultados de limite de resistência (LR) e limite de escoamento (LE) indicados na Figura 8.

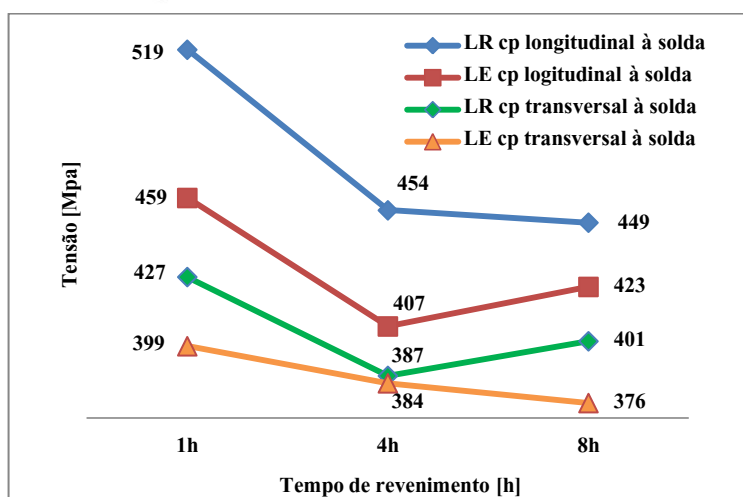


Figura 8. Resultados do ensaio de tração à quente na região transversal e longitudinal da junta soldada do aço P91 em função do tempo de revenimento.

Constata-se por meio da Figura 8 que os valores de limite de resistência (LR) e limite de escoamento (LE) da região longitudinal à solda indicaram valores superiores aos da região transversal, pois a região transversal é uma região mais heterogênea que contém as regiões da zona fundida (ZF), zona afetada pelo calor (ZAC) e metal de base (MB), enquanto a região longitudinal é formada apenas pela zona fundida (ZF).

Os resultados mostram que o tempo de revenimento do primeiro para o segundo ciclo, respectivamente 1 e 4 horas exerce influência sobre as propriedades mecânicas, com a diminuição do LR e LE em todas as condições. Do segundo para o terceiro ciclo de tratamento (de 4 para 8 h) houve pequena diminuição no LR do corpo de prova longitudinal e do LE do corpo de prova transversal e acréscimo no LE do corpo de prova longitudinal e LR do corpo de prova transversal.

3.4 Ensaio de dureza Vickers

As Tabelas 7, 8, 9 e 10 apresentam os valores obtidos nos ensaios de dureza Vickers com carga de 5Kgf das juntas soldadas nas condições de soldado sem tratamento (CS), T760 1h, T760 4h e T760 8h. Conforme descrito os ensaios de dureza foram realizados em quatro eixos de medições na seção transversal de cada junta.

Tabela 7. Perfil de dureza da junta soldada sem tratamento (CS)

Plano de Medição	MB Tubo	ZAC Tubo	ZF	ZAC Curva	MB Curva
0 – I	214 – 221 – 214 223 – 212 – 221	280 – 313 – 321	313 – 317 – 317 317 – 306 – 313	317 – 313 – 317	227 – 219 – 232 232 – 236 – 239
0 – II	223 – 225 – 223 229 – 223 – 216	257 – 299 – 325	303 – 299 – 310 310 – 317 – 317	306 – 306 – 260	239 – 234 – 239 241 – 239 – 234
0 – III	229 – 225 – 225 221 – 227 – 225	251 – 280 – 313	317 – 310 – 293 306 – 303	310 – 296 – 254	232 – 234 – 236 239 – 236 – 236
0 – IV	223 – 232 – 227 232 – 227 – 232	293 – 317 – 325	310 – 321 – 310 306	296 – 286 – 225	229 – 229 – 232 236 – 234 – 234

Tabela 8. Perfil de dureza da junta soldada com revenimento de 1 hora

Plano de Medição	MB Tubo	ZAC Tubo	ZF	ZAC Curva	MB Curva
0 – I	195-234-234 232-229-229	251-257-268	268-271-274 280-280-265	283-262-227	153-223-221 216-221-221
0 – II	232-234-229 225-229-227	234-257-280	268-268-274 271-265-274	286-257-227	223-219-214 223-221-218
0 – III	227-223-216 225-221-223	225-251-274	268-277-271 271-271	280-225-214	223-219-216 214-219-223
0 – IV	236-236-236 234-232-234	223-241-268	283-283-265 274	277-262-236	216-225-223 225-223-227

Tabela 9. Perfil de dureza da junta soldada com revenimento de 4 horas

Plano de Medição	MB Tubo	ZAC Tubo	ZF	ZAC Curva	MB Curva
0 – I	208 – 223 – 221 215 – 223 – 223	221 – 236 – 260	251-260-260-249 254-244-257	265 – 254 – 260	229 – 225 – 223 234 – 227 – 225
0 – II	221 – 227 – 223 223 – 219 – 219	219 – 229 – 246	246 – 251 – 257 254 – 249 – 249	262 – 249 – 232	225 – 227 – 227 227 – 234 – 229
0 – III	214 – 221 – 216 223 – 225 – 221	229 – 236 – 254	239 – 241 – 244 232 – 254	251 – 239 – 225	232 – 234 – 236 239 – 239 – 239
0 – IV	234 – 227 – 227 221 – 223 – 232	227 – 239 – 262	257 – 251 – 262 254	262 – 260 – 239	216 – 219 – 219 227 – 227 – 223

Tabela 10. Perfil de dureza da junta soldada com revenimento de 8 horas

Plano de Medição	MB Tubo	ZAC Tubo	ZF	ZAC Curva	MB Curva
0 – I	229 – 221 – 225 225 – 219 – 223	214 – 232 – 227	251-241-239-236 229 – 234 – 241	241 – 236 – 225	223 – 223 – 219 221 – 225 – 219
0 – II	214 – 225 – 221 216 – 212 – 219	208 – 229 – 244	232 – 239 – 239 234 – 241 – 236	249 – 229 – 221	229 – 227 – 232 223 – 221 – 221
0 – III	219 – 219 – 212 221 – 223 – 225	210 – 214 – 246	239 – 239 – 236 239 – 232	244 – 232 – 227	216 – 232 – 229 229 – 227 – 221
0 – IV	214 – 214 – 223 210 – 212 – 219	221 – 223 – 225	221 – 241 – 244 246	236 – 234 – 225	223 – 234 – 229 234 – 227 – 239

Na Figura 9 é apresentado o gráfico com os perfis de dureza da junta soldada com valor médio em cada região na condição de soldado sem tratamento (CS), revenimento de 1 hora (T760 1h), revenimento de 4 horas (T760 4h) e revenimento de 8 horas (T760 8h).

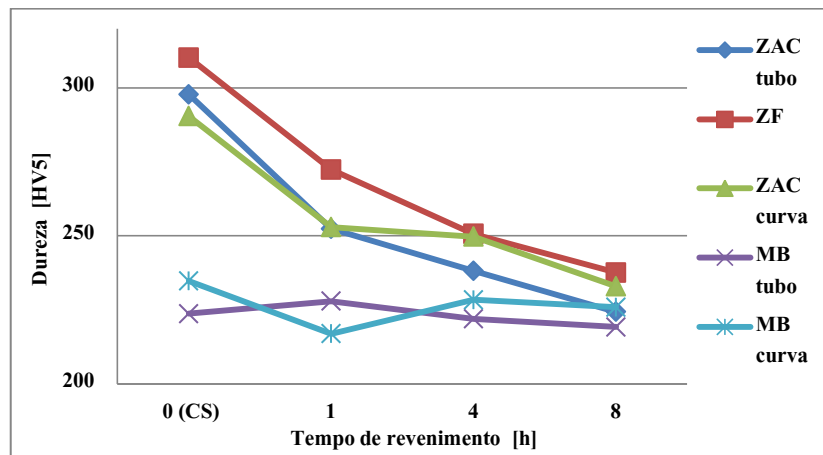


Figura 9. Influência do tempo de revenimento nas durezas das regiões da junta soldada e no metal de base (MB).

O critério de aceitação da norma ASTM A335 [4] é que a dureza do metal de base (MB) tenha um valor de 190 a 265 HV. De acordo com a norma PETROBRAS 133 [5] a dureza na zona fundida (ZF) e na zona afetada pelo calor (ZAC) após tratamento térmico pós-soldagem (TTPS) não deve exceder o valor de 250 HV.

Sendo assim, o aço P91 soldado sem tratamento (CS) e com tempo de revenimento de 1 hora, as regiões da zona fundida (ZF) e zona afetada pelo calor (ZAC) excederam o valor. Para o tempo de revenimento de 4 horas a dureza da ZAC e do MB da junta soldada foram aprovadas, mas a região da zona fundida (ZF) que ficou com uma média de dureza de 250,7 HV, excedendo o valor do critério da norma [5], 250 HV. As juntas com tempo de patamar (revenimento) de 8 horas todas as regiões da junta soldada foram aprovadas, mas por ser um tempo elevado torna inviável em termos econômicos.

4. Conclusões

Com base nos estudos e ensaios realizados neste trabalho, as seguintes conclusões podem ser apresentadas: Com relação à resistência à tração das juntas soldadas, os ciclos de tratamento térmicos não exercem influência significativa no limite de resistência (LR). Todos os valores de limite de resistência ficaram acima do mínimo requerido por norma de 585 MPa.

O aumento do tempo de revenimento diminui significativamente os valores de dureza da zona fundida (ZF) e da zona afetada pelo calor (ZAC), sendo assim, a junta soldada sem tratamento e com tempo de revenimento de 1 hora a região da zona fundida (ZF) e a zona afetada pelo calor (ZAC) excedem o critério de dureza máxima de 250 HV.

Todos os valores de dureza do metal de base (MB) da junta soldada na condição sem tratamento e com tempos de 1, 4 e 8 horas de revenimento atenderam o critério da norma [4], entre 190 a 265 HV.

A sequência de dois ciclos de tratamento térmico pós-soldagem (4 e 8 horas de permanência na temperatura de patamar) devido a possíveis reparos de solda no aço P91 pode ser executada sem prejudicar as propriedades mecânicas do aço à temperatura ambiente, atendendo os critérios estabelecidos em normas [4, 5].

Com base nas conclusões anteriores, recomenda-se, portanto, que o aço P91 soldado seja submetido ao tempo de patamar maior do que 4 horas no tratamento térmico pós-soldagem (TTPS).

5. Agradecimentos

Os autores agradecem a Petróleo Brasileiro S. A. pelo apoio prestado na execução do presente trabalho e a empresa PROAQT Empreendimentos Tecnológicos Ltda., pela realização dos ensaios mecânicos.

6. Referências Bibliográficas

- [1] FUCHS, R., GROSS, V., HEUSER, H. and JOCHUM C., Properties of matching filler metals for the advanced martensitic steels T91/P91, **5^a International EPRI RRAC Conference**, Alabama, USA, 2002.
- [2] HILKES, JAN & GROSS, VOLKER, **Welding CrMo steels for Power Generation and Petrochemical Applications – Past, Present & Future**, Conference, Singapore, 2009.
- [3] API 938-B. **Use of 9Cr-1Mo-V (Grade 91) Steel in the Oil Refining Industry**. Washington D. C. 2008.
- [4] ASTM **A335/A335M** Specification for Seamless Ferritic Alloy-Steel Pipe for High-Temperature Service. ASTM International, 2011.
- [5] PETROBRAS **N-133**, Revisão L, Soldagem, Julho, 2013.
- [6] Kimura, K. PVP2006-ICPVTIII-93294, **Creep strength assessment and review of allowable tensile stress of creep strength enhanced ferritic steels in Japan**, 2005.
- [7] Prager, M. Presentation from WRC/MPC Data, ASME SCII TG, **Creep Strength-Enhanced Ferritic Steels**. Henderson, Nev. 2006.
- [8] Vallourec-Mannessman. **Evaluation of allowable stresses for Grade**. 2006.
- [9] ASME **Boiler and Pressure Vessel Code. Section IX-2010** Qualification Standard for Welding and Brazing Procedures, Welders, Brazers, and Welding and Brazing Operators.
- [10] ASTM **E415** Standard Test Method for Atomic Emission Vacuum Spectrometric Analysis of Carbon and Low-Alloy Steel. ASTM International, 2008.
- [11] ASTM **E1019** Standard Test Methods for Determination of Carbon, Sulfur, Nitrogen, and Oxygen in Steel, Iron, Nickel, and Cobalt Alloys by Various Combustion and Fusion Techniques. ASTM International, 2008.
- [12] ASTM **A370** Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products. ASTM International, 2011.
- [13] ASTM **E8/E8M** Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. ASTM International, 2009.
- [14] ASTM **E21** Standard Test Methods for Elevated Temperature Tension Tests of Metallic Materials. ASTM International, 2009.
- [15] ASTM **E92** Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials. ASTM International, 2003.