

QUALIFICAÇÃO DE TUBOS OCTG TUBING EUE GRAU C90 2, FABRICADOS PELO PROCESSO DE SOLDAGEM AUTÓGENA ERW/HFIW¹

Wilson Rosa Cordeiro²
Luis Carlos Rodrigues Melo³
Igor Gomes⁴
Luiz Paulo Boni⁵

Resumo

Este trabalho apresenta os resultados de propriedade mecânica e de resistência a corrosão sob tensão, de tubos soldados eletricamente em alta frequência, utilizados para produção de petróleo em poços profundos em ambientes ácidos. A norma API 5CT foi utilizada para avaliação dos resultados obtidos, com a finalidade de autenticar a produção do grau C90 2 pelo processo de fabricação ERW/ HFIW. Para o desenvolvimento deste grau foram utilizadas bobinas de aço laminadas a quente, com teor controlado de enxofre em concentração máxima de 40 ppm. Os tubos foram testados por ensaios não destrutivos por todo corpo e solda como ultrassom, inspeção eletromagnética, teste hidrostático e dimensional, assim como ensaios destrutivos de tração, impacto, dureza, espectofotometria, metalografia, achatamento e corrosão sob tensão conforme norma NACE. Os resultados evidenciam a conformidade do produto ERW/HFIW C90 2 em relação aos requisitos da API5CT.

Palavras-chave: ERW/HFIW; *Tubing* EUE; API 5CT; C90 2.

QUALIFICATION OF OCTG TUBING EUE GRADE C90 2, MANUFACTURED THROUGH PROCESS OF AUTOGENOUSLY WELDING ERW/HFIW

Abstract

This work shows the mechanical properties and resistance to stress corrosion cracking of electrically welded pipes at high frequency, used for oil production from deep wells for acidic environments. The standard API 5CT was used to evaluate the results, in order to authenticate the production of C90 2 through the ERW/ HFIW process. For the development of C90 grade were used hot rolled steel coil with controlled sulfur maximum concentration at 40 ppm. The pipes were tested by non-destructive tests on the body and welding as ultrasound, electromagnetic inspection, hydrostatic testing and dimensional as well as destructive testing of tensile, impact, hardness, spectofotometria, metallography, flattening and stress corrosion cracking as NACE standard. The results are evidence for the conformity of the product ERW / HFIW C90 2 as API5CT.

Key words: ERW/HFIW; *Tubing* EUE; API 5CT; C90 2.

¹ Contribuição técnica ao 67^o Congresso ABM - Internacional, 31 de julho a 3 de agosto de 2012, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

² Engenheiro Mecânico, Diretor Industrial, Apolo Tubulars, Lorena, SP, Brasil.

³ Engenheiro Metalúrgico e de Materiais, Gerente Industrial, Apolo Tubulars, Lorena, SP, Brasil.

⁴ Engenheiro Mecânico, Gerente da Qualidade, Apolo Tubulars, Lorena, SP, Brasil.

⁵ Engenheiro Químico, Supervisor da Qualidade, Apolo Tubulars, Lorena, SP, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

A demanda por produtos tubulares para o setor energético aumenta com a descoberta de novos campos de petróleo, onde a utilização de produtos certificados por entidades reconhecidas internacionalmente, como a API (*American Petroleum Institute*), colabora para confiabilidade e sucesso das operações.

Produtos certificados pela API 5CT⁽¹⁾ devem ter seus processos especiais padronizados pelo fabricante de um modo que garanta a sua qualidade. Para isto, os processos especiais devem possuir um certificado de qualificação.

Os avanços tecnológicos demonstram que é possível operar de forma segura em ambientes corrosivos, utilizando materiais confiáveis. Uma das variáveis atuante nestes meios é a dureza do material, sendo este um requisito de rigoroso controle nos produtos destinados a operações em meios capazes de originar trincas em um metal, devido à ação combinada entre tensão e corrosão na presença de água e H₂S, no qual ocorre a fragilização do metal pelo hidrogênio atômico, que está disponível devido ao processo de corrosão da superfície metálica onde sua absorção é promovida devido a presença de sulfetos.⁽²⁾

Neste trabalho estão apresentados os resultados da qualificação de tubos grau C90 2 destinado a em ambientes contendo H₂S, fabricados pelo processo ERW/HFIW, com diâmetro externo de 73,03 mm e 5,51 mm de espessura (Figura 1).

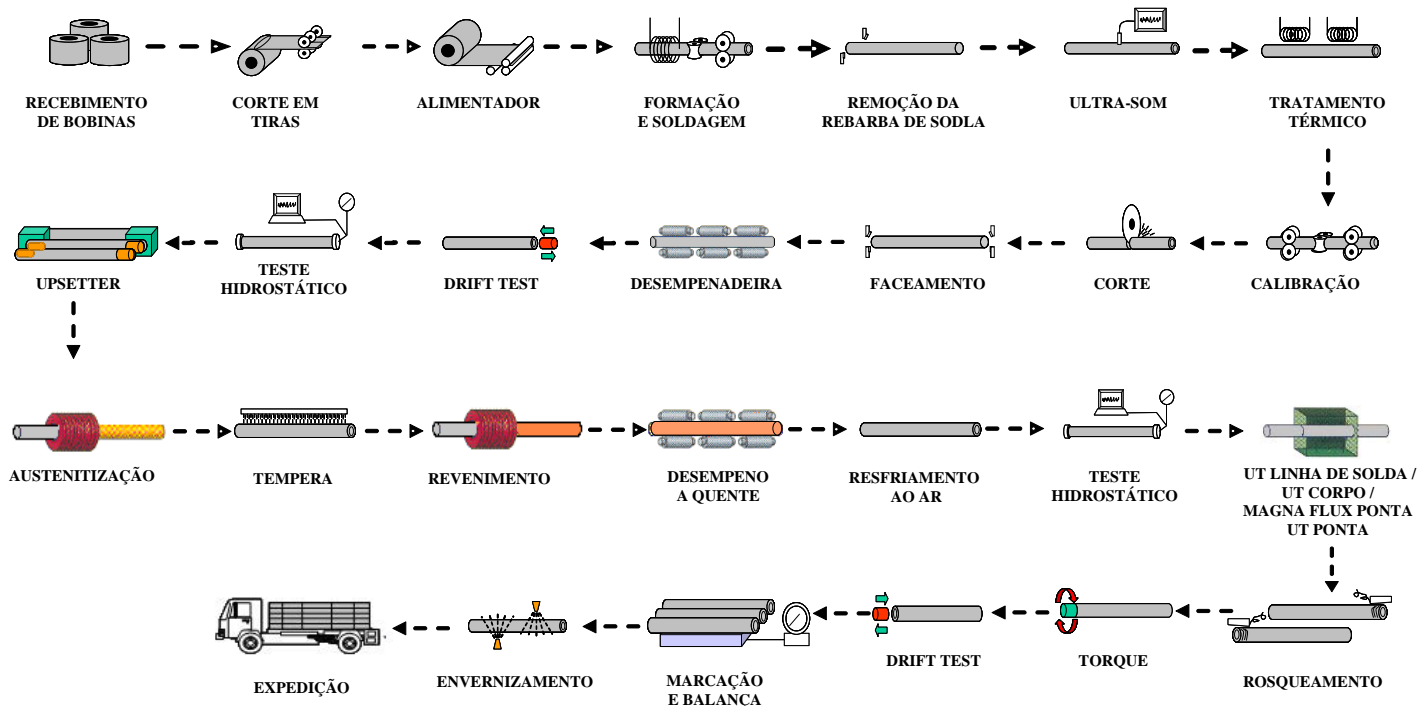


Figura 1. Produção de Tubing EUE API 5CT grau C90 2.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Um material de composição química⁽³⁾ pré-definida para tratamento térmico, adequado às dimensões do produto, foi conformado em tubo e qualificado no processo de soldagem conforme ASME IX, onde posteriormente teve suas pontas forjadas no formato de *upsetter*, que é o aumento do diâmetro externo sem alteração do interno, e posteriormente todo o tubo foi tratado termicamente por tempera e revenimento.

O processo de tratamento térmico foi qualificado conforme os requisitos mecânicos especificados para o grau C90 2 (Tabela 1), utilizando um modelo matemático 1 (Equação 1), descrito por Hollomon e Jaffe,⁽⁴⁾ para ajuste da temperatura do processo de revenimento, e a Equação 2, da API5CT, para ajuste do processo de tempera que especifica a dureza mínima para 90% de transformação martensítica.

Tabela 1. Requisitos mecânicos API 5CT grau C90

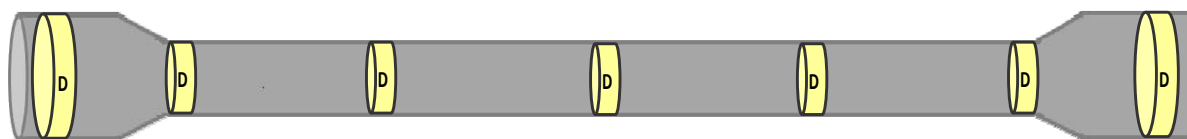
Limite de Escoamento		Limite de Resistência	Dureza	
Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Varição Máx.
621 MPa	689 MPa	724 MPa	25,4 HRC	3 HRC

Fonte: API 5CT 9^a Edição.

$$T^{\circ}F = \frac{(Hcadj - HRCaim)}{(0.00216 * (19,5 * \log_{10}(t)))} - 460 \quad (1)$$

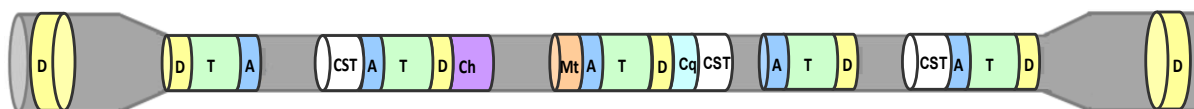
$$HRC \text{ min} \geq 58 * (\% \text{ carbono}) + 27 \quad (2)$$

Após o processo de tratamento térmico do material, 2 tubos foram analisados na condição como temperado (Figura 2), e 10 tubos na condição temperado e revenido (Figura 3.)



Legenda: D=Dureza

Figura 2. Posições para ensaio no tubo temperado.



Legenda: D=Dureza; T=Tração; A=Achatamento; CST=Corrosão Sob Tensão; Ch=Impacto; Mt=Metalografia; Cq=Composição Química.

Figura 3. Posições para ensaio no tubo revenido.

A quantidade de ensaios realizados, o número de ensaios requeridos pela API 5CT, as normas de ensaio, o tamanho das amostras e os equipamentos utilizados para qualificação estão descritos na Tabela 2.

Tabela 2. Requisitos mecânicos API 5CT grau C90

Ensaios Realizados					
Ensaio	Quantidade Realizada	Frequência Norma API5CT	Norma de Ensaio	Dimensão da Amostra	Equipamentos Utilizados
<i>Drift Test</i> (Passagem de calibre para verificação do diâmetro interno e retidão do tubo)	100% dos Tubos	100% dos Tubos	API 5CT	Tubo com 9.750 mm	Mandril de Teste Padrão
Teste Hidrostático	100% dos Tubos	100% dos Tubos	API 5CT	Tubo com 9.750 mm	Equipamento de Teste Hidrostático (capacidade de 20.000 psi)
Ensaio Não-Destrutivo (END)	100% dos Tubos	100% dos Tubos	API 5CT	Tubo com 9.750 mm	Partículas Magnéticas, Inspeção Eletromagnética e Ultrassom (Calibração para descontinuidades longitudinais e transversais nível L2).
Composição Química	2 ensaios em cada tubo revenido	2 ensaios por corrida	ASTM A 751	50 mm ²	Espectrômetro de emissão ótica
Dimensional	10 por tubo	1 por tubo	API 5CT	Tubo com 9.750 mm	Paquímetro, Micrometro e ultrassom
Tração	20 por tubo revenido	1 ensaio a cada 200 tubos	ASTM A 370	longitudinal 105 mm ²	Máquina de Tração Kratos (capacidade de 100 ton)
Impacto	1 ensaio em triplicata por tubo revenido	1 ensaio em triplicata por lote	ASTM A370 / ISO 148-1	Longitudinal 10,0 x 3,3 x 55 mm	Máquina de Impacto PAN 300 J
Achatamento Solda 0° e 90°	5 por tubo revenido	1 ensaio a cada 100 tubos	API 5CT	Anel com 150 mm	Prensa Hidráulica
Dureza Corpo Temperado	7 amostras por tubo temperado	Uma amostra por turno	ISO 6508-1	Seção Transversal Anel com 50 mm	Durometro Rockwell Digital
Dureza Corpo Revenido	20 por tubo revenido	1 ensaio a cada 200 tubos	ISO 6508-1	Seção Transversal Anel com 50 mm	Durometro Rockwell Digital
Dureza Upsetter Revenido	2 por tubo revenido	1 ensaio a cada 20 tubos	ISO 6508-1	Seção Transversal Anel com 50 mm	Durometro Rockwell Digital
Dureza Superficial	100% dos Tubos	100% dos Tubos	ISO 6508-1	Corpo e upsetter tubo com 9.750 mm	Durometro Superficial LD
Microdureza Corpo Revenido	1 amostra	Não específica	ISO 6507-1	30,0 x 30,0 x 5,51 mm	Microdurometro HVS-10
Metalografia	1 amostra por tubo temperado	Uma amostra por turno	ASTM E3 / ASTM E112 / ISO 643	30,0 x 30,0 x 5,51 mm	Policorte e Politriz Prazis
Corrosão Sob Tensão (CST) Solda C-Ring	1 ensaio em triplicata	Não específica	NACE TM0177	C-Ring Full-Size	Static Autoclave Systems
Corrosão Sob Tensão (CST) Metal Base Tração	1 ensaio em triplicata	1 ensaio em triplicata por lote	NACE TM0177	Tração Sub-Size	Proof Rings

Fonte: Resultados da qualificação grau C90 e API 5CT 9ª Edição.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 *Drift Test*, Teste Hidrostático, Achatamento e END

Antes do corte das amostras para os ensaios destrutivos, os tubos revenidos foram testados pelo *Drift Test* com um mandril de diâmetro externo de 60 mm e 1.067 mm de extensão, por todo o comprimento do tubo. Todos os tubos foram testados hidrostaticamente com uma pressão de 10.000 psi durante 5 segundos, e avaliados por ensaios não-destrutivos de ultra-som, EMI para detecção de defeitos longitudinais e transversais por todo o corpo do tubo e partículas magnéticas em ambas as pontas. Todos os tubos foram aprovados nos ensaios realizados acima, conforme os critérios da norma API5CT, comprovando que os parâmetros definidos para o processo assim como a matéria-prima, não causaram danos à integridade estrutural do tubo após o tratamento térmico.

Como a API não especifica ensaio de achatamento para o grau C90, foi utilizado como critério para avaliação deste ensaio o requisito do grau J55, 47 mm mínimo para distância entre as placas, pois este grau é mais restrito do que os demais graus tratados termicamente por têmpera e revenimento. Os resultados de achatamento para as posições 0° e 90° foram aprovados conforme requisito do grau J55, sendo a média e o desvio padrão encontrados a 0° e 90° foram respectivamente 10 +- 5 mm e 25 +- 10 mm.

3.2 Análise Química

Avaliando os resultados presentes na Tabela 3, verifica-se que o material selecionado atende completamente as especificações químicas da norma.

Tabela 3. Composição química do material

Especificação		APOLO C90	API 5CT – C90 1
C	Mín.	0,22	-
	Máx.	0,24	0,35
Mn	Mín.	0,93	-
	Máx.	0,98	1,20
Mo	Mín.	0,008	-
	Máx.	0,010	0,85
Cr	Mín.	0,025	-
	Máx.	0,028	1,55
Ni	Máx.	0,015	0,99
Cu	Máx.	0,072	-
P		0,011	0,020
S		0,001	0,010
Si		0,117	-

Fonte: Resultados da qualificação grau C90 e API 5CT 9ª Edição.

3.3 Análise Dimensional

Os tubos foram dimensionados após o processo de tratamento térmico e desempenho a quente, onde foram avaliadas as características dimensionais no corpo do tubo e nas pontas na área com *upsetter* externo, em nove posições ao longo da circunferência do tubo, 0°, 45°, 90°, 135°, 180°, 225°, 270°, 315° e 360°, sendo a solda localizada na posição 0°.

Todos os tubos foram desempenados a quente e apresentaram-se retilíneos.

Tabela 4. Dimensional dos tubos após tratamento térmico

	APOLO C90			API 5CT	
	Média (mm)	Mínimo (mm)	Máximo (mm)	Mínimo (mm)	Máximo (mm)
Diâmetro Corpo	73,36	73,10	73,82	72,24	73,82
Ovalização Corpo	0,33	0,18	0,40	-	-
Espessura Corpo	5,56	5,49	5,75	5,30	5,90
Diâmetro Upsetter	79,80	79,10	80,04	78,59	80,18
Espessura Upsetter	8,92	8,26	9,65	7,85	9,87

Fonte: Resultados da qualificação C90 e API 5CT 9ª Edição.

3.4 Ensaio de Tração Longitudinal

Os ensaios de tração foram realizados conforme as especificações da norma API 5CT, em quatro quadrantes da seção transversal ao longo do comprimento do tubo, nas posições de ensaio marcadas na Figura 3. Após análise estatística dos resultados verificou-se que houve uma pequena variação dos resultados (Figuras 4 e 5), onde todos os valores estão de acordo com o especificado pela norma para o grau C90, mantendo-se em uma faixa 20% menor que o limite superior especificado por norma para o limite de escoamento dos tubos para todas as posições analisadas ao longo de seu comprimento.

Os resultados de alongamento encontrados apresentaram média de 23% e desvio 1%, comprovando o atendimento ao requisito de 14% mínimo para o grau em qualificação.

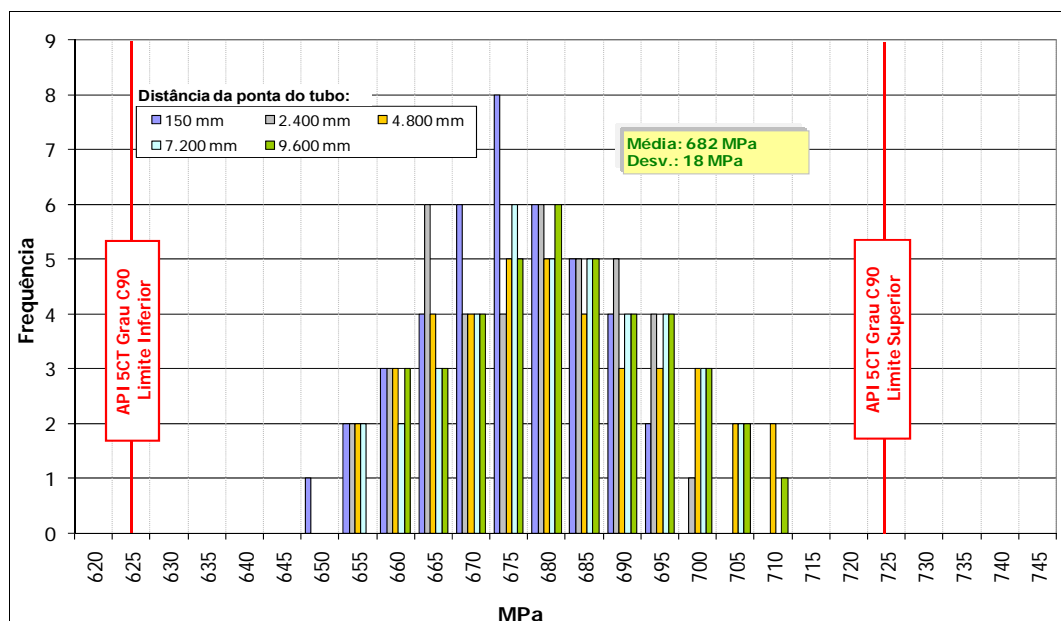


Figura 4. Ensaio de tração longitudinal, valores do Limite de Escoamento do material ao longo do comprimento dos tubos. Fonte: Resultados da qualificação C90 e API 5CT 9ª Edição.

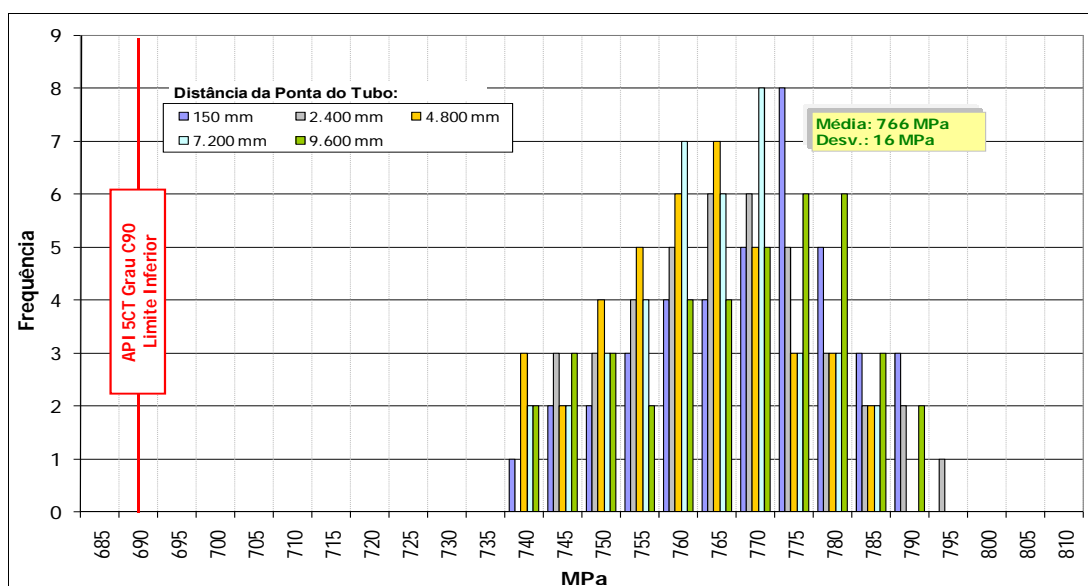


Figura 5. Ensaio de tração longitudinal, valores do Limite de Resistência do material ao longo do comprimento dos tubos. Fonte: Resultados da qualificação C90 e API 5CT 9ª Edição.

3.5 Ensaio de Impacto Charpy

O ensaio de impacto foi realizado conforme as especificações da norma ISO 148-1 em amostras retiradas no sentido longitudinal ao de laminação, no metal de base, devido às dimensões do produto. Os corpos de prova foram usinados no tamanho reduzido de 10 X 3,3 X 55 mm e seus resultados foram corrigidos através de aplicação de um fator de correção de 0,40 para o tamanho *full size*.

Na Figura 6 é possível observar que todos os resultados obtidos atendem os requisitos, mesmo para temperaturas abaixo do especificado para grau, apresentando um comportamento dúctil para todas as temperaturas até -50°C.

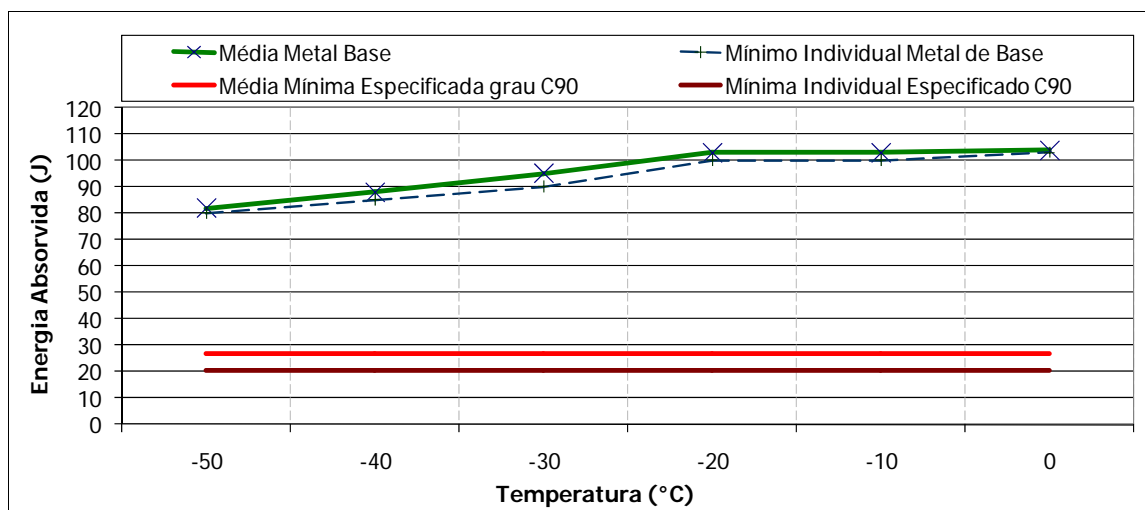


Figura 6. Ensaio de impacto corpo de prova tipo charpy, direção longitudinal, em diferentes temperaturas. Fonte: Resultados da qualificação C90 e API 5CT 9ª Edição.

3.6 Ensaio de Dureza

O método Rockwell C foi aplicado à seção transversal ao eixo do tubo. Para as amostras no corpo do tubo, os ensaios foram realizados na parte central da espessura em quatro quadrantes, conforme especificado na API 5CT para espessuras menores do que 7,62 mm. Na região com *upsetter* foram testadas a posição externa, centro e interna ao longo da espessura, também nos quatro quadrantes da seção transversal.

Como pode ser observado na Figura 7, todos os resultados do tubo na condição temperado estão acima do mínimo especificado de 41 HRC, calculado pela Equação 2, que representa a quantidade mínima de 90% de martensita transformada. Os resultados de dureza demonstram que a quantidade de martensita formada no processo de têmpera atende a porcentagem mínima exigida por norma, gerando uma homogeneidade microestrutural, fator considerável para o desempenho do material nos ensaios de corrosão sob tensão.

Para o tubo na condição de entrega, revenido, o valor máximo médio especificado é de 25,4 HRC, não sendo permitido uma variação maior do que 2,5 HRC entre os pontos que compõem a média do resultado, também não é permitindo uma variação maior do que 3 HRC da média entre os quadrantes de uma mesma seção analisada. Todos os tubos analisados atenderam os requisitos de dureza especificados pela API, os resultados da dureza média nas regiões analisadas são demonstrados a Figura 8.

O ensaio de microdureza foi realizado para avaliar a homogeneidade da dureza no metal de base em relação à região soldada. Os resultados comprovam a baixa dispersão dos resultados encontrados e a homogeneidade do tratamento térmico (Figura 9).

O ensaio de dureza superficial apresentou resultado médio de 21,8 HRC nos ensaios realizados no corpo do tubo e de 22,8 HRC nos ensaios realizados nas pontas.

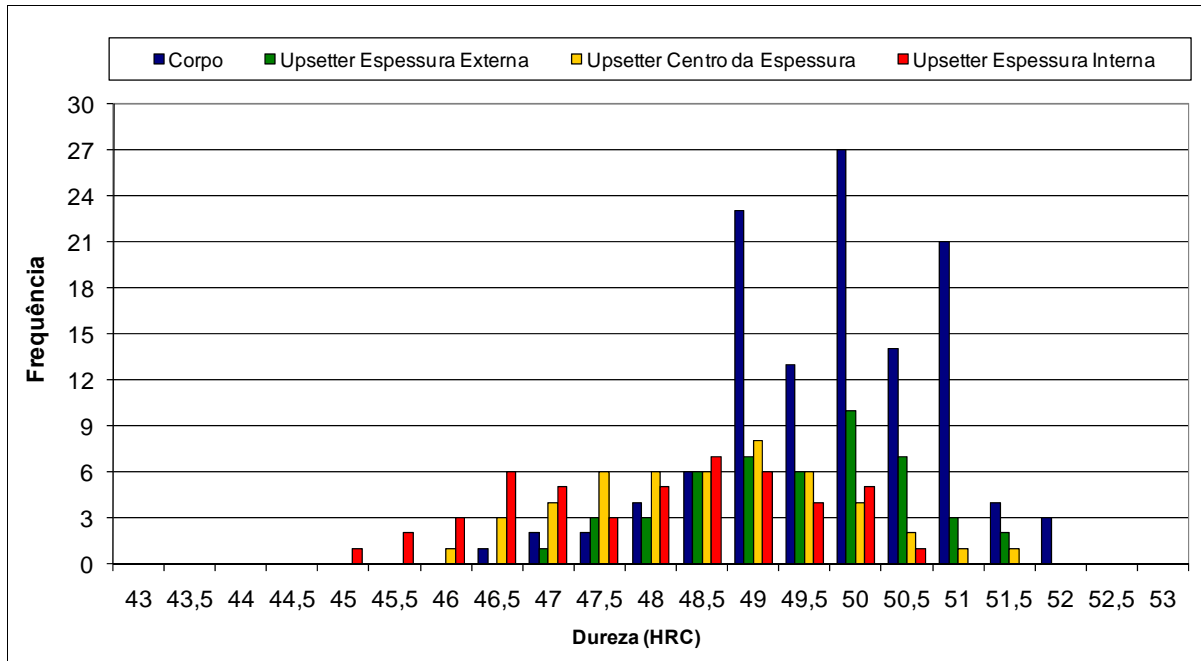


Figura 7. Resultado médio de dureza após tempera nas regiões do corpo e *upsetter* (ponta). Fonte: Resultados da qualificação C90 e API 5CT 9ª Edição.

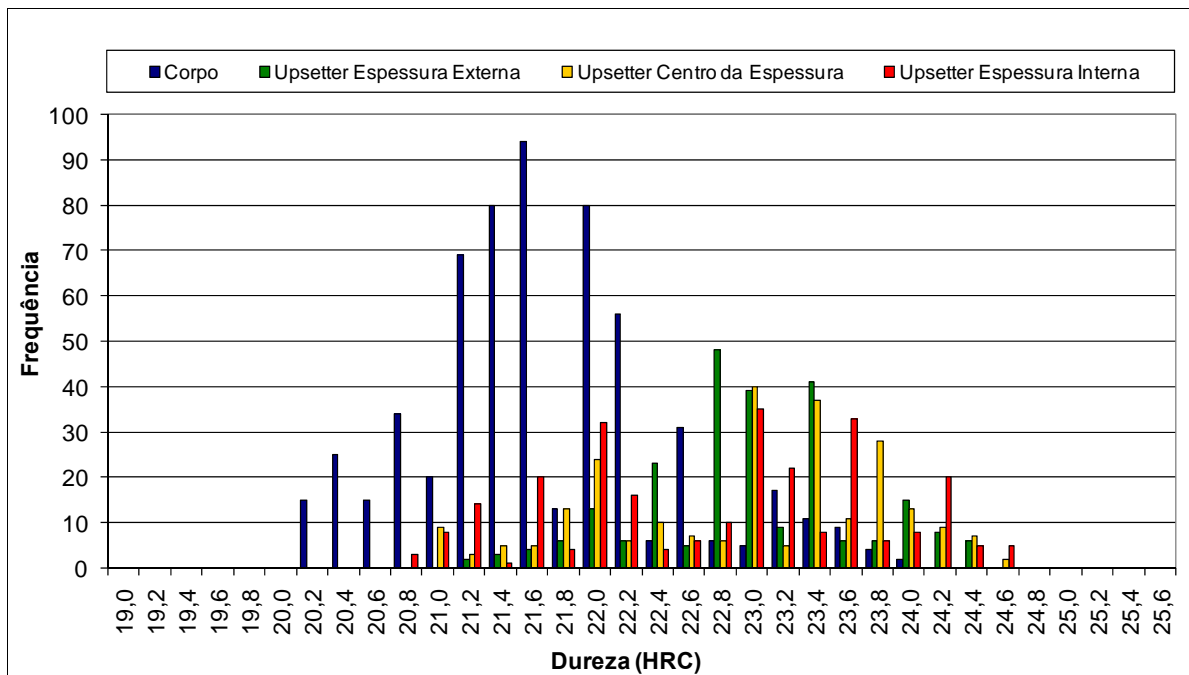


Figura 8. Resultado médio de dureza após tempera e revenimento nas regiões do corpo e *upsetter* (ponta). Fonte: Resultados da qualificação C90 e API 5CT 9ª Edição.

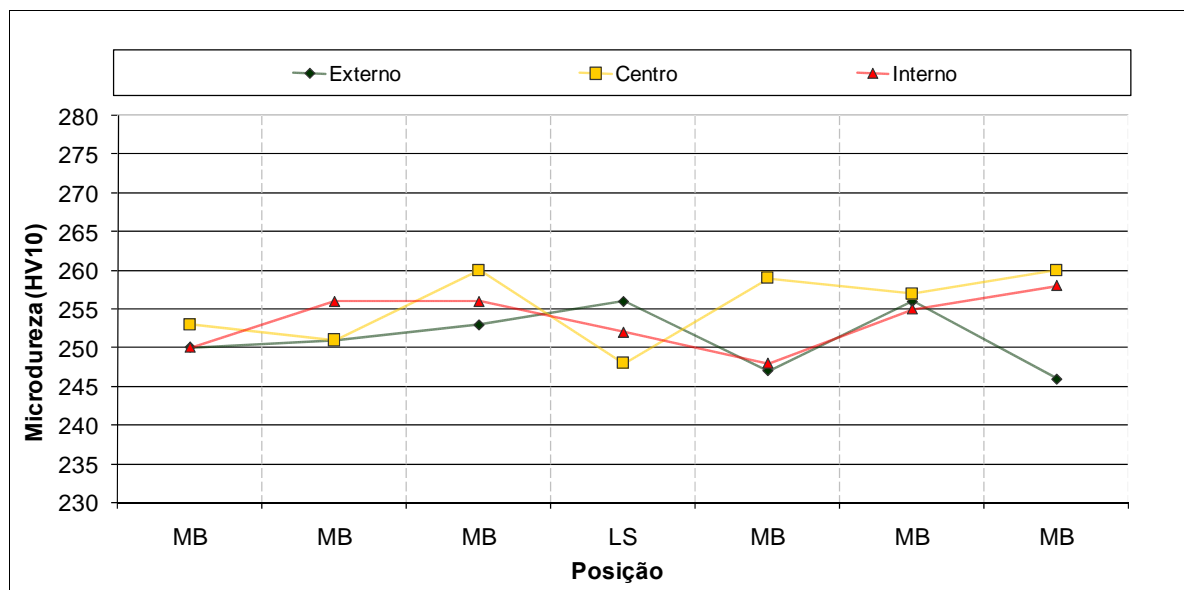


Figura 9. Resultado de microdureza no corpo do tubo ao longo da espessura, na posição metal base (MB) e linha de solda (LS). Fonte: Resultados da qualificação C90.

3.7 Análise Metalográfica

O tamanho de grão austenítico foi avaliado após têmpera do material conforme ISO 643 e ASTM E112, caracterizado pelo método de “Bechet-Beaujuard”, onde foi obtido um tamanho de grão austenítico ASTM 7, mais fino do que o número ASTM 5 definido como mínimo pela API.

Na Figura 10 é possível observar que a região do metal de base apresenta a mesma morfologia ao longo da espessura caracterizada pelo microconstituente martensita revenida.⁽⁵⁾

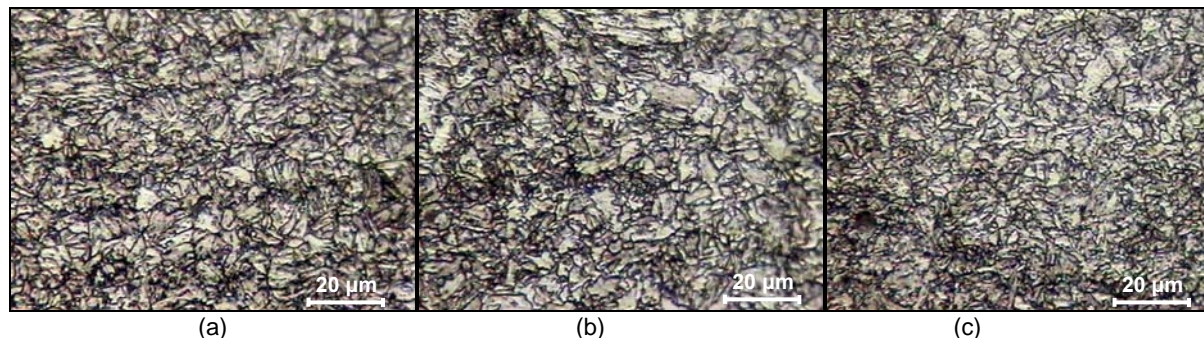


Figura 10. Micrografia com ataque no metal de base, 800x, (a) superior; (b) centro; e (c) interno a espessura. Fonte: Resultados da qualificação C90.

3.8 Corrosão Sob Tensão

Foram retiradas amostras para o ensaio de corrosão sob tensão do tubo no qual foi obtido o maior valor de dureza, para avaliação de falha ou não para a tensão aplicada e tempo de exposição, onde foram avaliadas a solda e o metal de base pela metodologia *C-Ring* e Tração respectivamente.

A superfície dos corpos de prova foram usinadas de forma a se obter uma elevada qualidade de acabamento superficial, sendo as amostras *C-Ring* usinadas como *Full-Size* e as amostras de Tração como *Sub-Size* no meio de espessura.

Foi utilizada a solução de teste A conforme NACE 177 para exposição dos corpos de prova, em uma célula de teste contendo um dispositivo para eliminar o oxigênio do meio e de controle de temperatura 24°C +-3°C.

Tabela 5. Resultados do ensaio de corrosão sob tensão

Identificação	Propriedades do Corpo de Prova						Tensão de Teste Aplicada (% do Limite de escoamento Atual)					Ph da Solução de Teste	
	Local	Orientação	Limite de escoamento (MPa)	Limite de Resistência (MPa)	Alongamento (%)	Dureza (HRC)	72	80	-	-	-	Começo	Fim
C-Ring 1	Solda	T	710	790	19	24,0	-	SF	-	-	-	2,71	3,53
C-Ring 2	Solda	T	709	785	19	23,8	-	SF	-	-	-	2,71	3,53
C-Ring 3	Solda	T	706	783	19	23,8	-	SF	-	-	-	2,71	3,53
Tração 1	MB	L	703	770	19	23,6	SF	-	-	-	-	2,71	3,53
Tração 2	MB	L	704	784	19	23,6	SF	-	-	-	-	2,71	3,53
Tração 3	MB	L	694	763	20	22,8	SF	-	-	-	-	2,71	3,53

Orientação: Transversal (T) e Longitudinal (L)

Fonte: Resultados da qualificação C90 e sugestão próxima revisão API 5CT.

A norma API especifica a porcentagem da tensão de teste em função do valor mínimo exigido para o limite de escoamento do grau em teste. Os resultados apresentados mostram uma resistência à corrosão sob tensão da solda e do metal de base superior aos requisitos da norma, já que a tensão aplicada foi calculada em função do limite de escoamento real obtido durante a análise do tubo.

4 CONCLUSÃO

Após a realização e avaliação de todos os resultados, principalmente dos resultados dos ensaios SSC de Tração no metal base e *C-Ring* na linha de solda, pode-se caracterizar de forma clara e segura que o produto oriundo do processo de qualificação é um *tubing External Upset End* grau C90 2, o que colabora para autenticação do processo ERW/HFIW como parte do escopo do grau C90 pela API. A baixa variação dos resultados, de espessura e diâmetro, no corpo do tubo aliada a homogeneidade microestrutural gerada no processo de têmpera, possibilita uma futura pesquisa no campo de aplicação de tubos resistentes ao colapso, já que estas características são pontos chaves para o bom desempenho neste segmento.

REFERÊNCIAS

- 1 Specification for Casing and Tubing. API Specification 5CT. Ninth Edition, July 1 2011. [Effective Date: January 1, 2012].
- 2 Petroleum and natural gas industries Materials for use in H₂S containing Environments in oil and gas production, First Edition NACE MR0175/ISO15156-1.
- 3 W. Crafts and J.L. Lamont, Hardenability and Steel Selection, Pitman and Sons, London, 1949.
- 4 J.H. Hollomon and L. Jaffe, Ferrous Metallurgical Design, John Wiley and Sons, New York, 1947.
- 5 Metals Handbook, Atlas of Microstructures of Industrial Alloys, Vol. 7, 8th Edition, pp. 20 – 22. © American Society For Metal.

- 6 C.A. Siebert, D. V. Doane and D.H. Breen, The Hardenability of Steels, American Society for Metals, 1977.
- 7 Desenvolvimento de tubos de alta resistência API X70 para serviço ácido. Autor: Posco, KITEC e Seah Steel.