

DESENVOLVIMENTO DE TUBOS DE ALTA RESISTÊNCIA GRAU API 5L X70 PSL2 OFFSHORE PELO PROCESSO DE SOLDAGEM HFIW (HIGH FREQUENCY INDUCTION WELDING)¹

*Wilson Rosa Cordeiro²
Luis Carlos Rodrigues de Melo³
Igor de Oliveira Gomes⁴
Luiz Paulo Bonf⁵
Marco Aurélio Miguel di Sanctis⁶*

Resumo

Tubos de alta resistência podem ser produzidos com excelência em tolerâncias dimensionais, rapidez e eficiência através do processo HFIW (High Frequency Induction Welding). Os tubos API 5L 6 5/8 X 0,374 pol. foram produzidos a partir de chapas finas laminadas e bobinadas a quente nas dimensões 9,300 X 1040,0 X 140000 mm. Foram realizados ensaios mecânicos, químicos e microestruturais. A análise microestrutural detectou a presença de ferrita e perlita. Foi verificado que todos os resultados estão de acordo com a norma API 5L, 44^a Edição, 2008 para o grau API 5L X70 PSL2 Offshore.

Palavras-chave: HFIW; Soldagem; X70; Offshore.

DEVELOPMENT OF HIGH STRENGTH PIPES GRADE API 5L X70 PSL2 OFFSHORE BY THE HFIW PROCESS (HIGH FREQUENCY INDUCTION WELDING)

Abstract

High strength pipes can be manufactured with excellency in dimensional tolerances, rapidity and efficiency through HFIW (High Frequency Induction Welding) process. API 5L 6 5/8 x 0,374 pipes were made of thin, hot rolled and coiled plates with dimensional 9,300 x 1040,0 x 140000 mm. Mechanical tests, chemical and microstructural analysis were performed. For the microstructural analysis, ferrite and perlitic structure were detected. All the results obtained are according to API 5L, 44th edition, 2008 for the grade API 5L X70 PSL2 Offshore.

Key words: HFIW; Welding; X70; Offshore.

¹ *Contribuição técnica ao 64^o Congresso Anual da ABM, 13 a 17 de julho de 2009, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

² *Engenheiro Mecânico, Diretor Apolo Tubulars; Lorena, SP.*

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

⁴ *Técnico em Metalurgia, Gerente da Qualidade da Apolo Tubulars; Lorena, SP*

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

⁶ *Estagiário Engenharia de Materiais da Apolo Tubulars; Lorena, SP.*

1 INTRODUÇÃO

Um dos produtos de maior valor agregado que um produtor de tubo pode produzir são tubos certificados para aplicações petroquímicas, ou seja, com a certificação API (American Petroleum Institute) para especificação 5L ou 5CT.⁽¹⁾ Contudo alguns clientes possuem requisitos mais restritos. No presente artigo trataremos de aplicações voltadas para a especificação 5L.⁽²⁾

Atualmente no Brasil utilizam-se dois processos para a produção de tubos até 9 5/8" aplicados ao mercado de petróleo e gás: soldados (ERW / HFIW) e sem costura. Com o desenvolvimento da tecnologia verifica-se que o processo de fabricação de tubos soldados atende aos requisitos da aplicação em questão, além de vantagens que não podem ser conferidos pelo processo sem costura.

Ao produzir tubos para dutos vários fatores devem ser levados em conta. Além da resistência, soldabilidade, resistência à fadiga nas juntas soldadas e corrosão (sour service), o aumento da tenacidade vem sendo cada vez mais explorado. Algumas características presentes nos tubos para line pipe com excelência em tecnologia são composição química restrita com baixa quantidade de elementos residuais, como fósforo e enxofre, controle de segregação na bobina do material, valores de propriedades mecânicas restritas.⁽³⁾

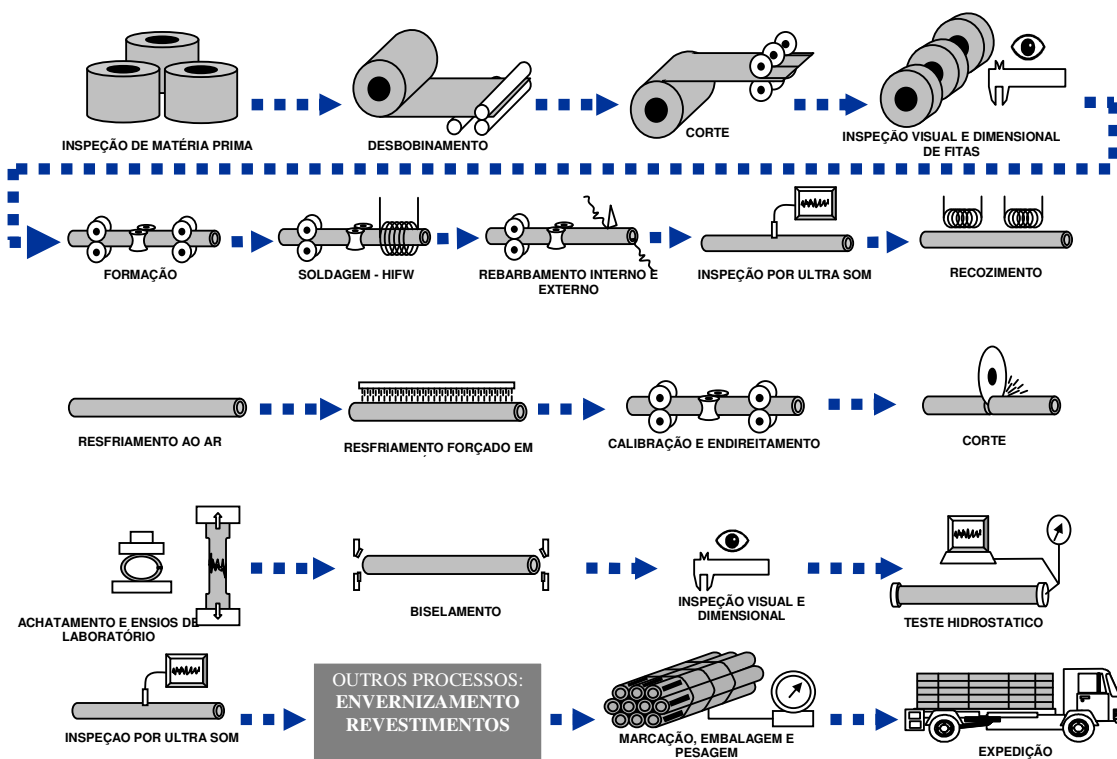


Figura 1. Produção dos tubos pelo processo HFIW.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Foram fabricadas três corridas de aços ARBL fornecidos pela Companhia Siderúrgica Nacional (CSN), desenvolvidas em conjunto com a Apolo Tubulars. Utilizou-se chapas processadas termomecânicamente e laminadas a quente⁽⁴⁾ de dimensão 9,300 x 1040,0 x 140000 mm, com excelente acabamento superficial.

Posteriormente as chapas foram dobradas (perfiladas) na forma cilíndrica por meio de uma matriz⁽⁵⁾ e em seguida soldadas nas extremidades em todo o seu comprimento até se formar um tubo pelo processo HFIW (High Frequency Induction Welding).⁽⁶⁾

As amostras foram retiradas dos tubos 6 5/8 x 0,374 pol. produzidos. A quantidade dos ensaios realizados, número de ensaios requeridos pela API 5L, normas de ensaio, tamanho das amostras e equipamentos utilizados estão descritos abaixo.

Ensaio de HIC: 1 teste para cada uma das três primeiras corridas, análise de uma corrida, NACE TM0284, 100 mm², célula de teste.

Composição Química: 10 análises química por corrida, 2 análise por corrida, ASTM A 751, 50 mm², Spectrometro de emissão ótica.

Dimensional: 10 análises dimensionais por corrida, uma a cada 4 horas de produção, API 5L, anel, paquímetro e micrometro.

Tração: 15 ensaios por corrida, 1 ensaio longitudinal por corrida, ASTM A 370, longitudinal 240 mm², Kratos capacidade 1.000 ton.

Charpy: 3 ensaios para a corrida A e B e 21 ensaios para uma corrida C, 1 ensaios transversal por corrida, ISO 148 – 1, transversal 10,0 x 7,5 x 55,0 mm, Pantec capacidade 300 J.

Dobramento: 6 ensaios por corrida, não requisitado, API 5L / ASTM A 370, transversal na linha de solda 38,0 x 9,5 x 150,0 mm, Kratos capacidade 1.000 ton.

Achatamento 0°: 6 ensaios por bobina, 2 ensaios por bobina, API 5L / ASTM A 370, 150 mm, prensa hidráulica.

Achatamento 90°: 6 ensaios por bobina, 2 ensaios por bobina, API 5L / ASTM A 370, 150 mm, prensa hidráulica.

Dureza: 1 ensaio por corrida, não requisitado, ISO 6508 – 1, anel, Durometro Rockwell.

Microdureza: 1 ensaio por corrida, 1 ensaio por corrida, ISO 6507 – 1, 30,0 x 30,0 x 9,5 mm, Microdurometro.

Metalografia: 1 amostra por corrida, 1 amostra por turno, API 5L / ASTM E3 / ASTM E112 / ASTM E45 51, 30,0 x 30,0 x 9,5 mm, policorte e politriz.

No presente artigo são apresentados os resultados dos ensaios mecânicos, metalográficos e químicos. Poderá ser verificado que todos os resultados obtidos estão de acordo com a norma API 5L, 44ª Edição para o grau X70MO.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Análise Química

Pelos dados mostrados na Tabela 1 verifica-se que todos os resultados não somente atenderam a norma API 5L 44ª edição para Offshore (X70MO), como também a DNV-OS-F101 2007.⁽⁷⁾

Tabela 1. Composição Química do material

Elemento Químico	API 5L PSL2 X70M 44ª Edição	API 5L PSL2 X70MO 44ª Edição	API 5L PSL2 X70MS 44ª Edição	DNV-OS SMYS 485 2007	DNV - SS SMYS 485 2007	Composição Química Tubos Apolo (Max.)
C	0,12	0,12	0,10	0,12	0,10	0,10
Mn	1,70	1,75	1,60	1,75	1,60	1,36
Si	0,45	0,45	0,45	0,45	-	0,25
P	0,025	0,02	0,02	0,02	-	0,01
S	0,015	0,01	0,002	0,01	0,002 ^a	0,004*
Ti	-	0,06	0,06	-	-	0,004
V	-	0,10	0,10	0,10	-	0,004
Nb	-	0,08	0,08	0,08	-	0,05
Nb+V+Ti	0,15	0,15	0,15	0,15	-	0,06
Ca/S	-	-	1,5	-	1,5	0,45
Pcm	0,25	0,22	0,22	0,22	-	0,19

^{a)} O limite máximo para concentração de enxofre pode ser aumentado, se acordado, até 0,006% para tubos soldados. Para esses níveis altos de enxofre em tubos soldados, razões mais baixas de Ca/S podem ser acordadas.

* Tubos aprovados no ensaio de HIC conforme NACE TM 0284 realizados na COPPE/UFRJ, PEMM – 11.927.

3.2 Ensaio de HIC

Todos os procedimentos foram realizados de acordo com a norma NACE TM0284-2003. Foi utilizada a solução A para o ensaio durante 96 horas. O pH foi medido após o preparo da solução, após a saturação da solução com H₂S e após o término do ensaio e a temperatura ambiente controlada de acordo com exigência da norma.

A solução e a célula de teste foram desaeradas com nitrogênio. O fluxo de H₂S foi mantido durante todo período do ensaio e contava com um sistema de vedação para impedir a entrada de oxigênio durante todo o período do mesmo. Os corpos de prova (cps) foram usinados de acordo com a norma NACE TM0284-2003 e as amostras foram analisadas em microscópio ótico com um aumento de 100X.

De acordo com os critérios da norma NACE TM 0284 o material foi considerado aprovado devido à ausência de trincas nas 6 seções analisadas.

3.3 Análise Dimensional

Os ensaios foram realizados dentro das especificações da norma API 5L 44ª edição e os resultados obtidos encontram-se na tabela 2. O perfil dos ensaios pode ser visto na Figura 2. Os valores de ovalização permaneceram muito abaixo do máximo exigido (1,683 mm para ponta do tubo e 2,52 mm para o corpo do tubo) e os valores de espessura e diâmetro em uma faixa central (Figuras 3 e 4). Todos os resultados obtidos estão de acordo com o especificado pela norma API 5L 44ª edição para o grau X70MO, DNV SMYS 485 e apresentaram baixa dispersão.

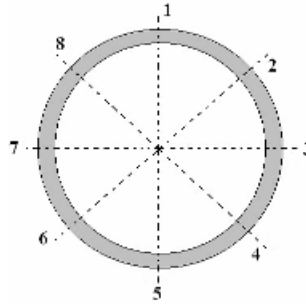


Figura 2. Perfil dos ensaios dimensionais.

Tabela 2. Análise dimensional para o corpo e para ponta dos tubos.

Corrida	Dimensional Corpo do tubo (mm)							Dimensional Ponta do tubo (mm)						
	Total de amostras: 30							Total de amostras: 30						
	Posição	Média Ø	Desv. Pad. Ø	Média #	Desv Pad #	Média Ov.	Desv Pad Ov.	Posição	Média Ø	Desv Pad Ø	Média #	Desv Pad #	Média Ov.	Desv Pad Ov.
A 10 amostras	1	169,10	0,36	9,76	0,30	0,60	0,13	1	168,96	0,22	9,88	0,63	0,45	0,22
	2	168,83	0,40	9,65	0,26			2	168,78	0,33	9,61	0,25		
	3	169,05	0,38	9,59	0,25			3	168,93	0,30	9,64	0,26		
	4	168,83	0,49	9,59	0,24			4	168,70	0,37	9,64	0,26		
	5			9,61	0,25			5			9,60	0,26		
	6			9,64	0,27			6			9,57	0,26		
	7			9,62	0,25			7			9,62	0,27		
	8			9,63	0,24			8			9,62	0,27		
B 10 amostras	1	168,91	0,26	10,10	0,63	0,69	0,42	1	168,95	0,20	10,08	0,28	0,52	0,11
	2	168,72	0,10	9,94	0,48			2	168,56	0,30	10,05	0,21		
	3	168,79	0,20	9,89	0,47			3	168,83	0,17	10,01	0,25		
	4	168,64	0,16	9,84	0,48			4	168,50	0,21	10,07	0,27		
	5			9,88	0,48			5			10,03	0,09		
	6			9,84	0,47			6			10,03	0,22		
	7			9,89	0,49			7			9,96	0,24		
	8			9,91	0,49			8			10,08	0,32		
C 10 amostras	1	169,00	0,30	10,04	0,31	0,74	0,36	1	168,97	0,20	10,10	0,60	0,50	0,22
	2	168,65	0,46	9,96	0,39			2	168,60	0,30	10,09	0,24		
	3	168,97	0,35	9,98	0,23			3	168,96	0,17	9,97	0,20		
	4	168,66	0,45	9,84	0,48			4	168,69	0,21	9,95	0,21		
	5			9,88	0,48			5			9,95	0,21		
	6			9,84	0,47			6			9,98	0,26		
	7			9,98	0,25			7			9,99	0,23		
	8			9,98	0,36			8			9,99	0,23		

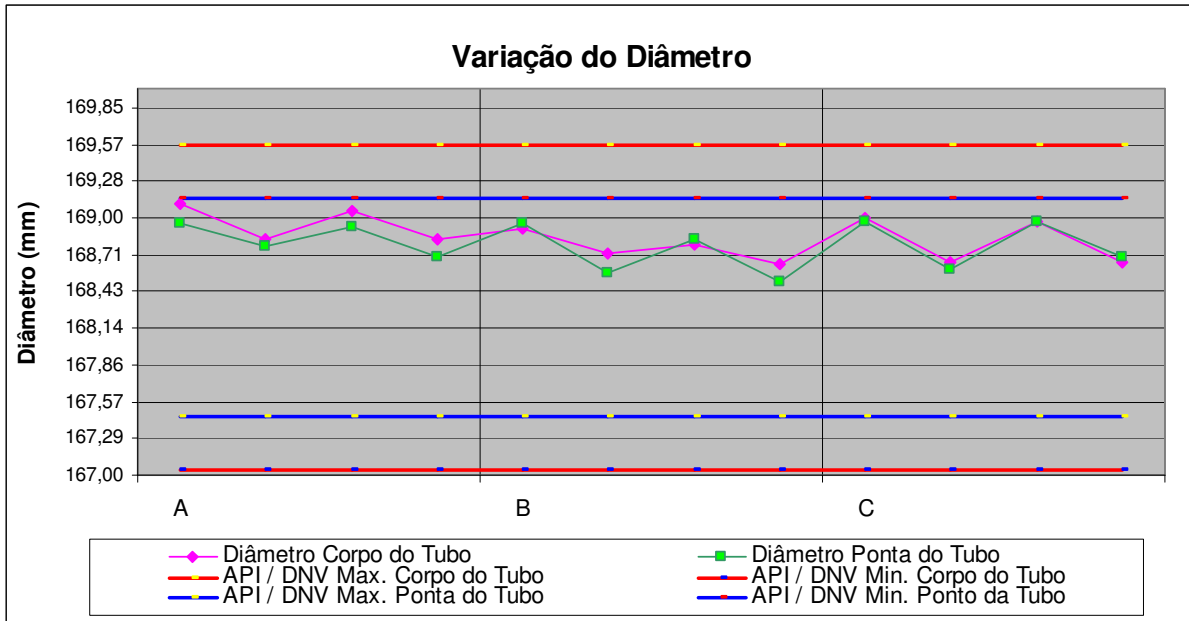


Figura 3. Variação do diâmetro no corpo e na ponta tubo para as três corridas.

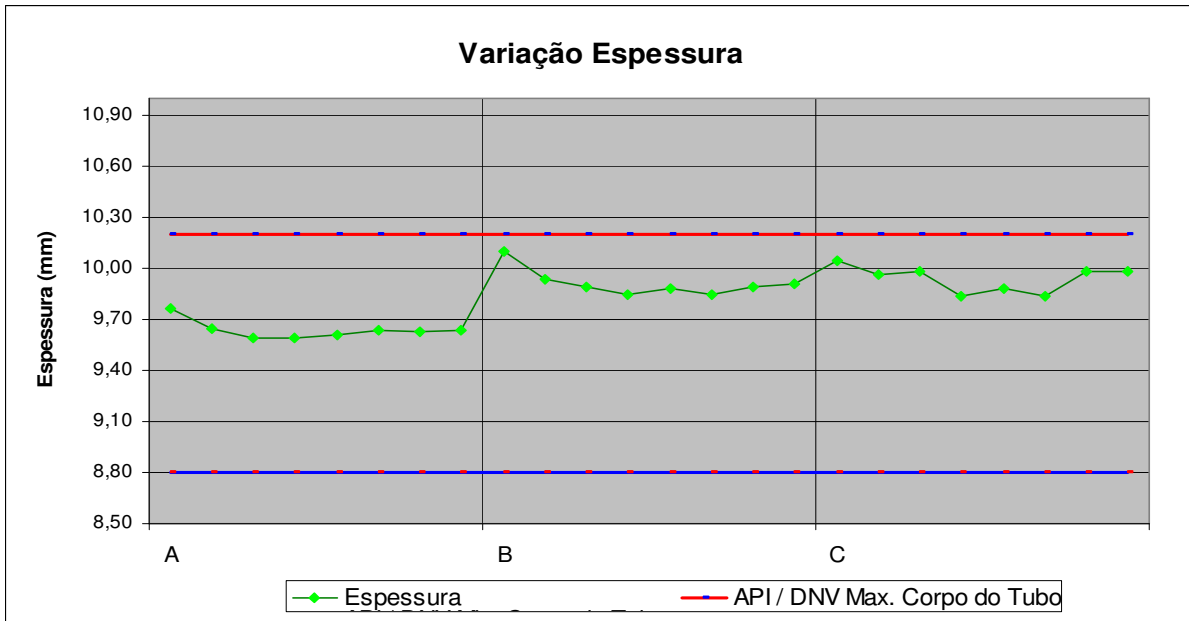


Figura 4. Variação da espessura dos tubos para as três corridas

3.4 Ensaio de Tração Longitudinal

Os ensaios foram realizados dentro das especificações da norma API 5L 44ª edição. Após análise estatística dos dados verificou-se que houve pequeno desvio padrão dos resultados conforme mostrado nas Figuras 5 e 6. Como mostrado todos os valores estão de acordo com o especificado pela norma API 5L 44ª edição para o grau X70 PSL2 e também atenderam os requisitos da DNV SMYS 485.

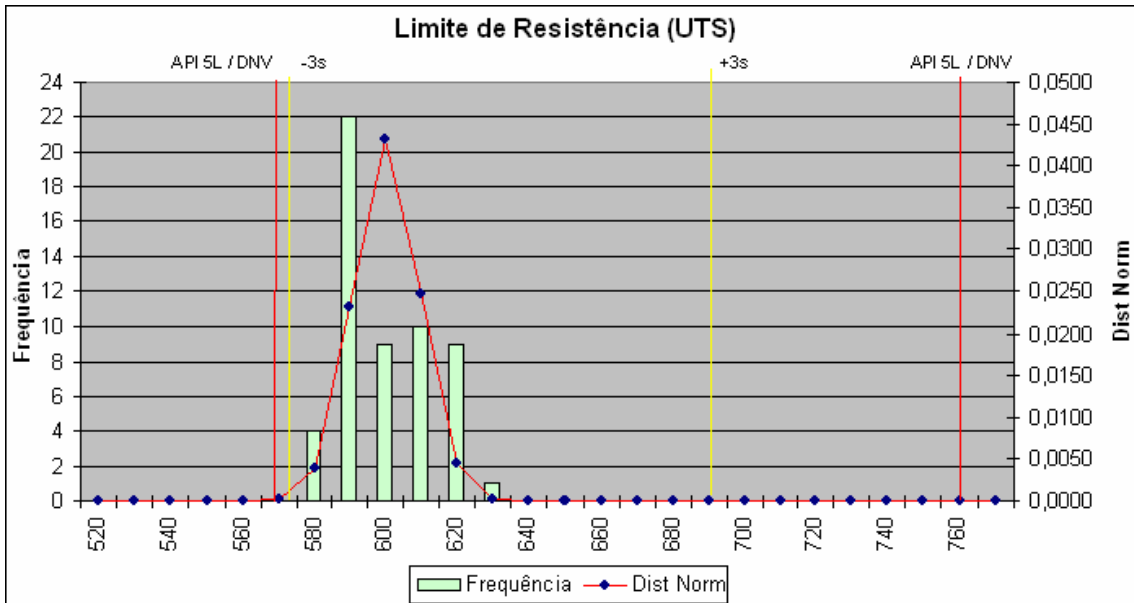


Figura 5. Ensaio de tração longitudinal mostrando os valores do limite de resistência do material.

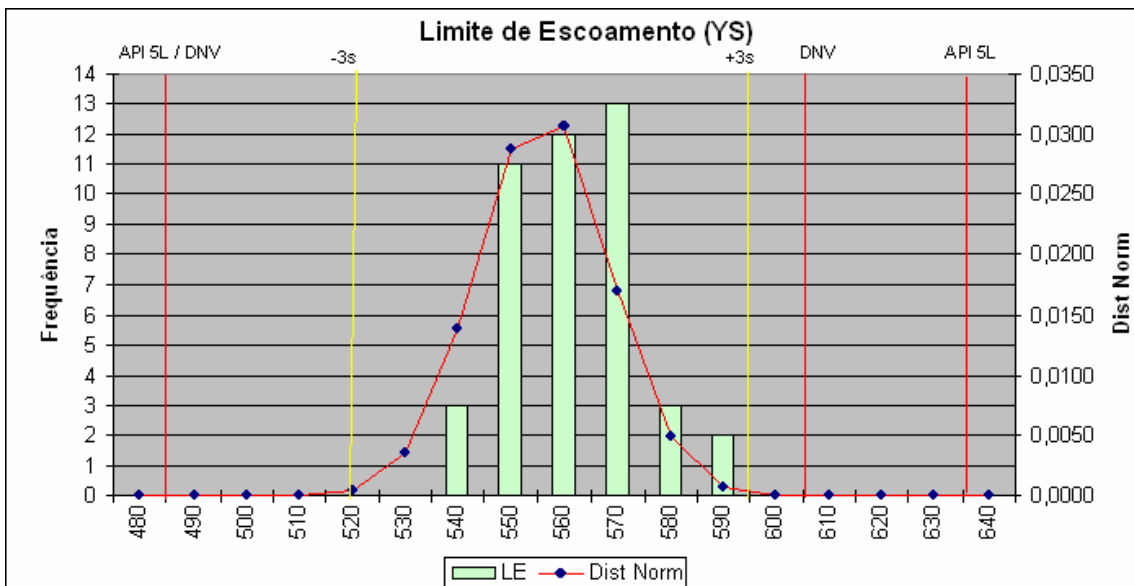


Figura 6. Ensaio de tração longitudinal mostrando os valores do limite de escoamento do material.

3.5 Ensaio de Impacto Charpy

Os ensaios foram realizados dentro das especificações da norma API 5L 44ª edição sendo que as amostras foram retiradas transversalmente no metal base e na solda. As dimensões dos corpos de prova foram feitos no tamanho reduzido 10 X 7,5 X 55 mm e seus valores corrigidos para o full size de acordo com as especificações da API 5L 44ª edição. Na tabela 3 podem-se ver os resultados obtidos. Para as corridas A e B os resultados foram ensaiados na temperatura de 0°C. Todos estão de acordo com o especificado pela norma API 5L 44ª edição e DNV SMYS 485, apresentando resultados elevados para a temperatura exigida (27J transversal 0°C e 50J transversal a Tmin, respectivamente) (Figura 7).

Tabela 3. Ensaio de Impacto Charpy para diferentes corpos de prova e temperaturas.

Temperatura (°C)	Energia Absorvida (J)											
	Transversal MB (J)				Linha de Solda (J)				Zona Termicamente Afetada (J)			
	1	2	3	Média	1	2	3	Média	1	2	3	Média
0	160	197	219	192	184	203	203	197	273	260	252	262
0	180	177	196	184	188	169	196	184	248	254	246	249
0	179	189	198	189	190	204	196	197	268	274	256	266
-20	205	173	195	191	176	195	133	168	272	232	280	261
-30	192	149	197	179	179	184	120	161	255	260	257	257
-40	165	203	149	172	123	139	165	142	243	248	245	245
-50	104	101	121	109	96	83	120	100	248	239	239	242
-60	107	144	120	124	29	27	28	28	176	272	272	240
-70	119	72	83	91	35	22	24	27	171	184	181	179

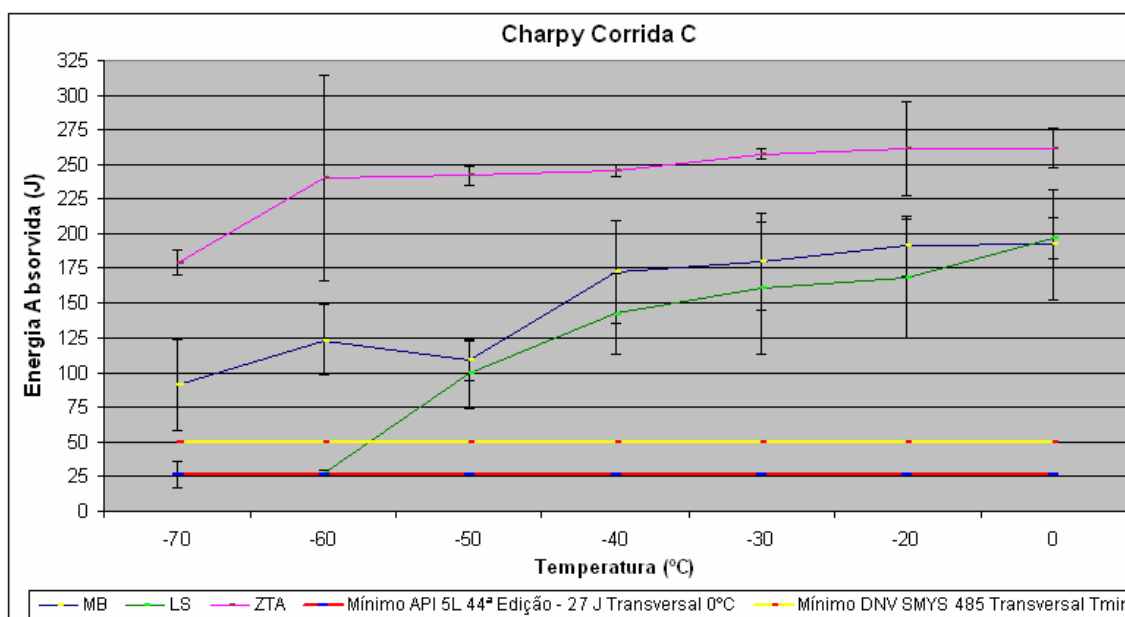


Figura 7. Ensaio de impacto Charpy para os corpos de prova ensaiados em diferentes temperaturas.

3.6 Ensaio de Dobramento e Achatamento

Os ensaios de dobramento e achatamento foram realizados dentro das especificações da API 5L 44ª edição. Os resultados de dobramento a 180°, tanto na face quanto na raiz, e os de achatamento foram aprovados e encontram-se de acordo com o especificado pela norma API 5L 44ª edição.

3.7 Ensaio de Dureza

Os ensaios de dureza foram realizados utilizando-se dois métodos, Rockwell B e Vickers. A dureza Vickers (HV10) foi realizada no metal base, na linha de solda e na ZTA, conforme mostra a Figura 8. Foram realizados 33 pontos de impressão. Os resultados obtidos são mostrados na Tabela 4. Foram analisados os critérios do anexo J para Offshore e anexo H para Sour Service (máximo de 300 HV10 e 250 HV10, respectivamente). Como pode se visto todos os resultados estão de acordo com o especificado pela norma API5L 44ª Edição para ambos os anexos e para DNV SMYS 485.

Tabela 5. Ensaio de dureza (HRB)

Corrida	Posição	Resultado (HRB)																				Desv. Pad.				
		1			2			3			4			5			6			7			8			
A	O	91	92	92	86	91	90	87	88	88	87	90	90	88	89	89	88	90	89	86	88	89	88	88	88	1,638
	M	89	89	90	85	87	88	87	89	87	86	88	89	86	87	87	86	89	89	85	88	89	86	88	87	1,347
	I	88	87	88	87	90	90	88	89	91	87	91	91	87	88	89	87	90	91	87	91	90	90	91	89	1,519
B	O	92	91	91	90	91	92	90	88	89	90	90	90	90	90	89	90	90	90	90	89	90	90	90	90	0,955
	M	91	89	91	92	91	90	87	88	88	89	88	88	89	90	90	87	87	88	88	90	89	91	91	91	1,437
	I	90	90	90	93	93	93	89	91	91	92	91	91	91	92	91	91	91	91	92	91	93	93	93	93	1,086
C	O	94	93	93	90	90	92	89	91	89	90	90	90	90	89	90	91	90	90	90	91	91	90	91	90	1,194
	M	92	91	91	91	91	91	90	90	90	87	88	89	88	88	90	88	89	89	88	89	90	89	88	90	1,296
	I	91	91	91	93	93	94	92	93	93	90	91	91	91	93	92	92	92	93	92	92	92	92	92	93	0,891

3.8 Análise Metalográfica

A análise metalográfica foi realizada através do microscópio óptico. Foi utilizado o reagente Nital 8% para análises macrográficas e Nital 3% para análises micrográficas. Para a verificação da presença de segregação de fósforo na região da solda, foi usado o reagente Klemms. Foram caracterizadas as fases e/ou microconstituintes presentes no metal base, na solda e na zona termicamente afetada, bem como inclusões e segregações. Utilizou-se a Norma ASTM E112 para análise de tamanho de grão, e para análise de inclusões a Norma ASTM E45-51.

A Figura 10 mostra a linha de solda tratada termicamente através da normalização. Pode-se ver a linha A3 garantindo que o tratamento foi realizado acima de 900°, conforme constatado pelo diagrama Fe-C para a percentagem de carbono em questão. Esta macrografia mostra o estado final do produto caracterizada pelo tratamento uniforme da linha de solda e eliminação completa de rebarba interna.

Na Figura 11 pode-se ver a presença de inclusões caracterizando-as como sendo do tipo óxido globular, série fina e nível 1, de acordo com a classificação ASTM E45-51. Nota-se que devido à disposição dos glóbulos, a fragilização do aço torna-se reduzida.

Na Figura 12 pode-se ver o metal base com um tamanho de grão de 9,5, de acordo com a norma ASTM E112.

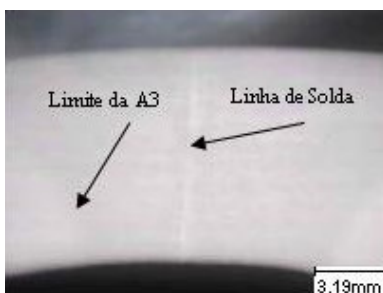


Figura 10. Macrografia da linha da solda.

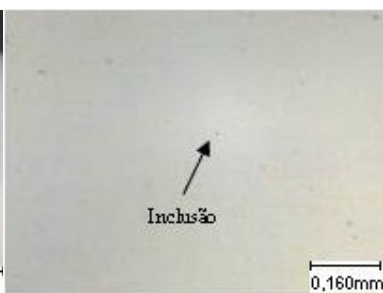


Figura 11 Micrografia de Inclusão. Aumento de 100x.

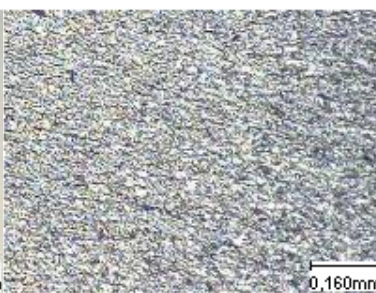


Figura 12. Micrografia do Metal base. Aumento de 100x.

Na Figura 13 pode-se ver a mesma região com um aumento maior. Na Figura 14 a solda encontra-se com tratamento térmico. Já na Figura 15 a zona termicamente afetada está normalizada na A3, garantindo ausência de martensita não revenida. Nota-se a presença de grãos equiaxiais e refinados em relação à solda. Todo material é constituído por ferrita (região clara) e perlita (região escura) nos contornos de grão.⁽⁸⁾

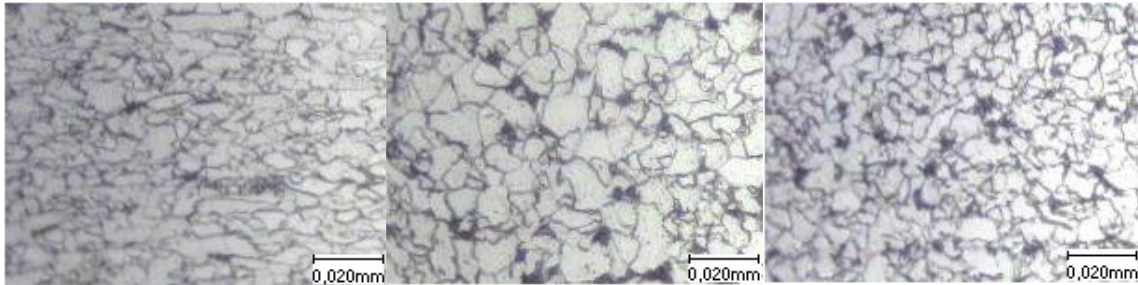


Figura 13. Micrografia do Metal base. Aumento de 800x.

Figura 14. Micrografia da linha da solda. Aumento de 800x.

Figura 15. Micrografia da ZTA. Aumento de 800x.

4 CONCLUSÃO

Realizando análise química pode-se comprovar que o material atende as especificações da API 5L 44ª edição para o grau X70MO sem apresentar valores próximos ao máximo permitido pela norma.

Visando a adequação do produto para o requisito suplementar Sour Service, foi realizado o ensaio de HIC. Todos os resultados obtidos estão de acordo com a norma NACE TM0284-2003 demonstrando potencial para utilização do produto segundo as normas API 5L 44ª edição para o grau X70MS e DNV-SS-F101 para o grau SMYS 485.

Através da análise dimensional pode-se mostrar de forma clara a eficácia do processo HFIW de manter as tolerâncias dimensionais de acordo com a norma API 5L 44ª edição para o grau X70MO e DNV-OS-F101 para o grau SMYS 485.

Com os testes de tração longitudinal pode-se verificar que os resultados obtidos atenderam a norma API 5L 44ª edição para o grau X70 PSL2 e DNV-OS-F101 2007 SMYS 485, mantendo-se em uma faixa restrita, mostrando baixa dispersão dos resultados.

Os valores de impacto Charpy mostraram que o material apresentou valores de energia absorvida elevados em relação aos requisitos da norma API 5L 44ª edição Offshore e DNV-OS-F101 para o grau SMYS 485. O material ainda atende a norma API a -70°C e a DNV a -50°C. A energia absorvida para o corpo de prova transversal no metal base foi de 191J a -20°C, a 2 mm da linha de solda, na ZTA, foi de 261J e na solda foi de 168J, comprovando uma ótima tenacidade do material a temperaturas inferiores a 0°C.

Os valores de dureza mostraram a homogeneidade da solda e do metal base através das durezas Vickers e Rockwell B, respectivamente. Foi verificado que o mesmo é capaz de atender os requisitos da norma API 5L Sour Service, DNV-OS-F101 e DNV-SS-F101.

A análise microestrutural caracterizou a fase e o microconstituente presente no aço e na ZTA. Pode-se observar uma matriz de ferrita com perlita nos contornos de grão.

Após os ensaios mecânicos, químicos e metalográficos pode-se concluir que todos os tubos produzidos atendem a norma API 5L 44ª edição para o grau X70MO de forma segura além de atender também a DNV-OS 2007 SMYS 485 e com grande potencial para atender a norma API 5L 44ª edição para o grau X70MS e a DNV-SS 2007 SMYS 485.

REFERÊNCIAS

- 1 Scott, P.. Making HF Welded Tube for Demanding Applications. Junho. 2004, Thermatool Corp.
- 2 Specification for Line Pipe. API Specification 5L. Forty-Forth Edition. March. 2008. [Effective Date: October 8, 2008].
- 3 Taiss J. M. O Mercado de Aços de Elevado Valor Agregado, Tendências Tecnológicas e a Estratégia da Usiminas no Atendimento as Demandas. Julho, 2007.
- 4 B K PANIGRAHI, Processing of low carbon steel plate and hot strip—an overview Bull. Mater. Sci., Vol. 24, No. 4, August 2001, pp. 361–371. © Indian Academy of Sciences.
- 5 Alves, R.. Estudo dos Defeitos Ocorridos em tubos de aço Baixo Carbono Soldados por Indução de Alta Freqüência (HFIW), 2004 – Universidade de Taubaté (UNITAU).
- 6 Nichols, R. K. (P.E.). High Frequency Welding the Process and Application. 1999.
- 7 Offshore Standard DNV-OS-F101. Submarine Linepipe Systems. October 2007. [Effective Date: October 2008].
- 8 Silva, C. E.. Influência da Velocidade de Soldagem e Temperaturas de Tratamento Térmico nas características Mecânicas e Microestruturais dos Tubos API 5L X65 soldados pelo processo “Electric Resistance Welding”. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia Química de Lorena (FAENQUIL). 2004.