

ESTUDO COMPARATIVO DA SOLDABILIDADE DOS TUBOS API 5CT Q125 E API 5CT C110 PARA APLICAÇÃO EM JUNTA CIRCUNFERENCIAL DE GASODUTO TERRESTRE

Marcy Saturno de Menezes¹ (marcyzao@gmail.com)

Paulo Roberto da Silva¹

José Rubens de Camargo²

¹Petrobras S.A., ENGENHARIA/SL/SEQUI/CI

²Universidade de Taubaté – UNITAU - Dep. de Eng. Mecânica, 12060-440, Taubaté – SP – Brasil

Resumo. No Brasil, a Petrobras tem construído gasodutos e oleodutos para melhor atender a necessidade e a expansão do mercado interno na área de petróleo & gás. Com base nesse cenário, trata-se de um mercado promissor na fabricação de dutos e na montagem de malhas para o escoamento de sua matéria prima, seus produtos e derivados. Na construção de um gasoduto terrestre, houve a necessidade da realização da soldagem do tubo API 5L X65, tradicionalmente utilizado na construção de dutos terrestres, com um tubo de uso específico para poços de petróleo. Esses tubos, em aço temperado e revenido, fabricados pelo processo de laminação, possuem pontas roscadas e não foram desenvolvidos para a união por soldagem. No momento da necessidade da soldagem, os tubos disponíveis eram o API 5CT C110 com CEiiw 0,76% e o API 5CT Q125 com CEiiw 0,61%. Esses tubos apresentam um elevado grau de transformação na ZAC após a operação de soldagem, com aumento elevado da dureza nessa região. Essa elevada dureza associada aos altos valores de carbono equivalente tende a propiciar a ocorrência de fissuração por hidrogênio. O objetivo deste trabalho é relatar em ambos os tubos API 5CT a metodologia utilizada com a aplicação de amanteigamento, pela técnica da meia camada, com eletrodo E 7018-1 e tratamento térmico de revenimento, assim como a caracterização do material soldado por ensaios de tração, dureza Vickers HV10, dobramento de face e raiz, macrografia e micrografia. Esse estudo comprovou que o tubo API 5CT Q125, após a aplicação de amanteigamento em sua extremidade, pode ser soldado ao tubo API 5L X65, desde que seja qualificado um procedimento de soldagem específico para este fim.

Palavras-Chave: Soldabilidade, tubos API 5CT, junta circunferencial, gasoduto, amanteigamento.

1. INTRODUÇÃO

Com as novas descobertas de petróleo e gás em águas territoriais brasileiras ocorre a necessidade de gasodutos para escoamento do gás produzido nas plataformas da Petrobras. Novos gasodutos estão sendo construídos para atender a demanda do mercado. Na construção de um gasoduto terrestre, houve a necessidade específica da realização da soldagem do tubo API 5L X65, tradicionalmente utilizado na construção de dutos terrestres, com um tubo de uso específico para poços de petróleo especificado pela norma API 5CT[1].

Os tubos fabricados segundo a norma API 5CT, que tem como aplicação principal o revestimento (casing) de poços de petróleo. Esses tubos, em aço temperado e revenido, fabricados pelo processo de laminação, possuem pontas roscadas não tendo sido desenvolvido para a união por soldagem. No momento da necessidade da soldagem, os tubos disponíveis eram o API 5CT grau C110 de espessura de parede 13,84mm, com CEiiw 0,76% e o API 5CT grau Q125 de espessura de parede 20,24mm (0.796 polegadas) com CEiiw 0,61%, ambos de diâmetro externo 273mm (10,750 polegadas). Esses tubos apresentam um elevado grau de transformação na ZAC após a operação de soldagem, com aumento elevado da dureza nessa região. Essa elevada dureza associada aos altos valores de carbono equivalente tende a propiciar a ocorrência de fissuração por hidrogênio.

O objetivo deste trabalho é relatar a metodologia utilizada, através da caracterização do material, ensaios mecânicos, aplicação de amanteigamento pela técnica da meia camada e tratamento térmico de revenimento que levaram a decisão pelo uso do tubo API 5CT Q125.

Feita a opção pelo tubo a ser soldado na obra, será qualificado um procedimento de soldagem, segundo a norma API 1104 [2] para união necessária entre o tubo API 5CT e o tubo fabricado segundo os

requisitos da norma API 5L [3] de grau X65 tradicionalmente utilizado na construção de gasodutos e oleodutos. A norma API 1104 é a norma designada pela norma ASME B31.8 [4], norma de projeto de gasodutos terrestres, para a qualificação de procedimentos de soldagem e de soldadores.

Não foi encontrada na literatura, situação onde tenha sido realizada soldagem semelhante à realizada neste trabalho. Esse fato levou a necessidade de definir e aplicar técnica e procedimento de soldagem que tivesse como resultado uma junta soldada que atendesse as propriedades exigidas por normas e especificações técnicas aplicáveis a esse tipo de junta.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Caracterização dos Tubos API 5CT C110 e API 5CT Q125

Os dois metais de base foram caracterizados através de ensaios mecânicos, análise química e exame metalográfico. Os ensaios e exames aos quais cada um dos dois materiais foi submetido são:

- Três CPs de dobramento da face externa - ASTM A370/09 e ASTM E290/09;
- Três CPs de dobramento da face interna - ASTM A370/09 e ASTM E290/09;
- Três Cps de tração - ASTM A 370/09;
- Dezesesseis pontos de dureza HV10 - ASTM E93;
- Três análises químicas - três análises por espectrômetro de emissão ótica - ASTM E415/08 ou ASTM E1086/2005;
- Dez conjuntos de ensaio Charpy a 0° Celsius - ASTM A370/09;
- Uma macrografia da espessura do tubo com corte no sentido longitudinal ao tubo - ASTM E 381;
- Quatro micrografias para caracterização da microestrutura do material - ASTM E7/03;
- Quatro micrografias para determinação do tamanho de grãos - ASTM E7/03 e ASTM E112;

A figura 1 mostra as duas amostras dos tubos preparados para a retirada dos corpos de prova.

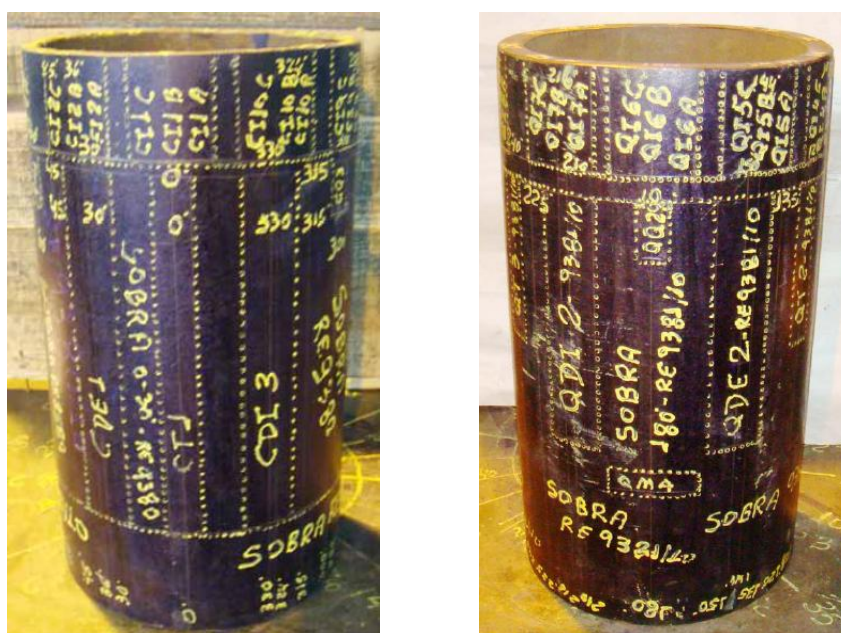


Figura 1. Amostras de tubo API 5CT C110 e API 5CT Q125.

A figura 2 mostra o esquema de localização e retirada dos corpos de prova de dobramento da face externa, de dobramento da face interna, de tração e amostras para análise química.

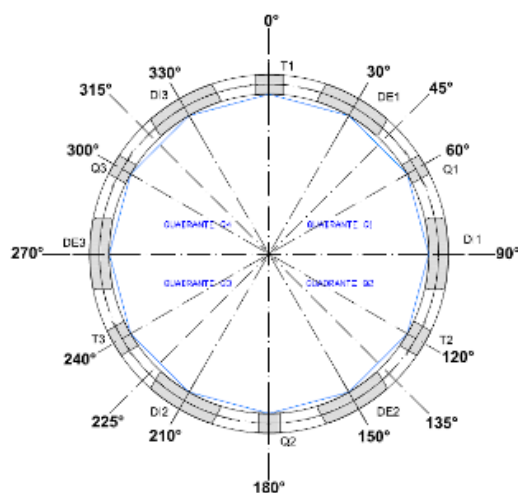


Figura 2. Esquema de retirada de corpos de prova de tração, dobramento e análise química.

A figura 3 mostra o esquema de localização e retirada dos corpos de prova de impacto Charpy.

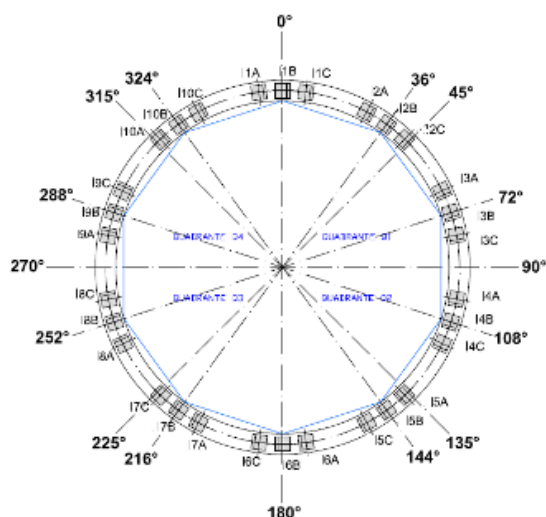


Figura 3. Esquema de retirada de corpos de prova de impacto Charpy.

A figura 4 mostra o esquema de localização e retirada dos corpos de prova de macrografia da espessura do tubo, micrografia para caracterização da microestrutura do material e micrografia para determinação do tamanho de grãos.

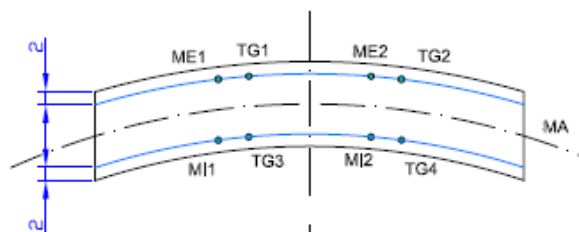


Figura 4. Esquema de localização de micrografias e tamanho de grãos.

Quanto ao ensaio de dureza, dez medições foram realizadas em pontos aleatórios distantes da região amanteigada de cada metal de base. Para o grau C110 o CP foi denominado de C-1 e para o grau Q125 o CP foi denominado Q-1.

2.2. Estudo Preliminar dos Parâmetros de Soldagem

Com base nos resultados obtidos na caracterização dos tubos API 5CT C110 e API 5CT Q125, acima descrita concluiu-se sobre a baixa soldabilidade de ambos os materiais. Assim optou-se por testar o uso da técnica da meia camada (amanteigamento) com o objetivo de que a zona afetada pelo calor (ZAC) da soldagem de união dos tubos não se localizasse no metal de base, isto é, no tubo API 5CT. O amanteigamento foi realizado em duas camadas utilizando o eletrodo revestido E7018-1, marca comercial Simaouro 50 de diâmetro 2,5mm. A figura 5 mostra soldador realizando o amanteigamento.



Figura 5. Soldador realizando amanteigamento na boca do tubo.

Após o depósito da primeira camada, essa tinha aproximadamente um terço de sua espessura removida por esmerilhamento. A redução de espessura da primeira camada teve o objetivo de incrementar o efeito do calor da segunda camada sobre a ZAC do metal de base. A figura 6 mostra o resultado da deposição das duas camadas.

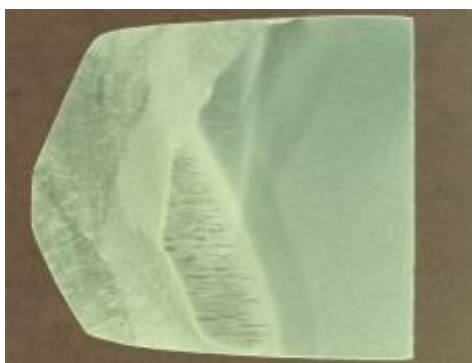


Figura 6. Resultado da deposição de duas camadas de amanteigamento, Nital 10%.

Foram confeccionados dez corpos de prova, cinco de cada material de base com a técnica da meia camada, utilizando-se diferentes aportes térmicos. Os corpos de prova são CPs C-1, C-2, C-3, C-4 e C-5 para o API 5CT C110 e, CPs Q-1, Q-2, Q-3, Q-4 e Q-5 para o API 5CT Q125. A figura 7 mostra os dez CPs amanteigados.



Figura 7. Dez CPs amanteigados.

A Tabela 1 mostra os parâmetros de soldagem utilizados, e seus aportes térmicos, para os tubos API 5CT C110 e API 5CT Q125. Para o cálculo do aporte térmico não foi utilizado o coeficiente de rendimento térmico.

Na deposição das duas camadas, para os dois materiais, os seguintes parâmetros de soldagem mantiveram-se constantes: preaquecimento de 150 a 170°C; temperatura interpasses de 150 a 170°C e pós-aquecimento de 250°C por 15 minutos.

Tabela 1. Aportes térmicos utilizados em capa um dos dez CPs amanteigados.

CP	Camada	Tensão (V)	Corrente (A)	Comprimento (mm)	Tempo médio (s)	Aporte (kJ/mm)
C-1	1 ^a	21 a 25	75 a 80	100	59	1,058
	2 ^a				67	1,194
C-2	1 ^a				58	1,028
	2 ^a				59	1,028
C-3	1 ^a	23 a 26	77 a 82		51	1,000
	2 ^a				57	1,000
C-4	1 ^a				47	0,922
	2 ^a				49	0,942
C-5	1 ^a	22 a 25	77 a 82		38	0,747
	2 ^a				40	0,779
Q-1	1 ^a			54	1,009	
	2 ^a			69	1,284	
Q-2	1 ^a			53	0,995	
	2 ^a			52	0,976	
Q-3	1 ^a			60	1,116	
	2 ^a			63	1,168	
Q-4	1 ^a			42	0,785	
	2 ^a			60	1,116	
Q-5	1 ^a	43	0,803			
	2 ^a	44	0,827			

2.3. Medição de Dureza dos Diferentes Corpos de Prova de Amanteigamento

Após soldagem dos dez CPs da tabela 1 os mesmos foram submetidos a ensaio de dureza. Em cada peça foi medida a dureza HV10 em duas linhas de referência, uma a 1,5mm de distância da face externa do tubo e outra linha a 1,5mm de distância da face interna do tubo. As diferentes regiões do amanteigamento tiveram suas durezas medidas conforme mostrado nas Figuras 8 e 9.

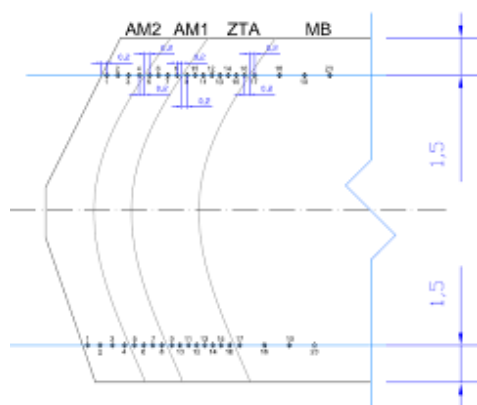


Figura 8. Esquema de localização dos pontos de medição de dureza.

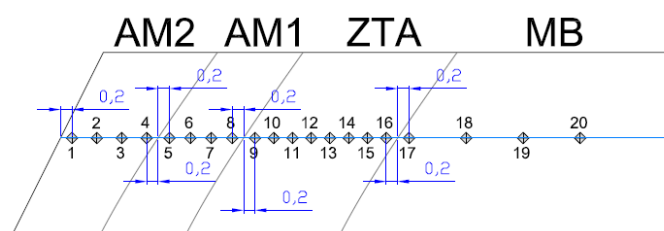


Figura 9. Detalhe do esquema de localização dos pontos de medição de dureza.

3. RESULTADOS

Cada corpo de prova tem a identificação mostrada nas figuras 2 e 3, precedida pela letra “C” ou “Q” significando que trata-se do tubo API 5CT C110 ou API 5CT Q125 respectivamente.

3.1. Ensaios de Tração

Os seis CPs de tração apresentaram valores de limite de escoamento e resistência à tração superior às mínimas especificadas para o tubo API 5L X65 quais são: limite de escoamento 450MPa, resistência à tração 535MPa. Quanto ao alongamento percentual o grau C110 apresentou maior ductilidade, enquanto o grau Q125 apresentou menor ductilidade quando comparadas com a mínima especificada para o tubo API 5L X65 que é de 23,4%.

A Tabela 2 mostra os valores obtidos nos dois materiais testados. Todos os ensaios mostraram valores superiores aos especificados para o tubo API 5L X65. Todos os CPs apresentaram aparência da fratura totalmente dúctil.

Tabela 2. Resultados dos ensaios de tração.

CP	Dimensões (mm)	Seção (mm ²)	Lim. Escoramento		Res. tração		Δl em 50mm	Redução área (%)
			(kgf)	(MPa)	(kgf)	(N/mm ²)		
CT1	13,46 x 12,49	168,12	13028	760	13768	803	26	64
CT2	13,82 x 12,47	172,34	13391	762	14307	814	26	64
CT3	13,56 x 12,46	168,96	12879	747	14003	813	27	64
QT1	Ø 12,68	126,28	12837	997	13886	1078	18	63
QT2	Ø 12,66	125,88	12777	995	13834	1078	18	63
QT3	Ø 12,66	125,88	12894	1004	13936	1086	18	63

3.2. Ensaios de Dobramento Externo e Interno

Os oito CPs de dobramento testados conforme os valores abaixo descritos para diâmetro do cutelo e distância entre roletes, conforme a tabela 3, para os metais API 5CT C110 e API 5CT Q125

respectivamente, foram aprovados. Os ensaios assim realizados são mais rigorosos que os que serão futuramente utilizados na qualificação do procedimento de soldagem segundo a norma API 1104.

Tabela 3. Dados e resultados do ensaio de dobramento.

CP	Espessura (mm)	Largura (mm)	Comprimento (mm)	Ø cutelo (mm)	Distância roletes (mm)	Ângulo	Resultado
CDE1	13,00	38,00	210,0	39,0	68,0	180°	Isentos de Descontinuidades
CDE2							
CDI1							
CDI2							
QDE1	22,00	38,00	210,0	66,0	113,0	180°	
QDE2							
QDI1							
QDI2							

3.3. Análise Química

Para a determinação da composição química de cada um dos metais de base foram realizadas três análises químicas. Cada análise química é composta por três queimas de amostras no equipamento espectrômetro de emissão ótica, e o resultado de cada análise é apresentado como a média entre as três queimas. Foi também objetivo das análises químicas a determinação do Carbono Equivalente (CE_{iiw}) de cada material. A equação 1 descreve o método de cálculo do CE_{iiw}. A tabela 4 mostra os resultados das três análises químicas do tubo API 5CT C110 e API 5CT Q125 respectivamente.

$$CE_{iiw} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{(Cr + Mo + V)}{5} + \frac{(Ni + Cu)}{15} \quad (1)$$

Tabela 4. Resultado das análises químicas e carbono equivalente.

CP	C	Mn	Cr	Mo	V	Ni	Cu	P	S	CE _{iiw}
CQ1	0,339	0,454	0,920	0,826	0,045	0,021	0,032	0,011	0,002	0,776
CQ2	0,332	0,449	0,993	0,808	0,044	0,021	0,032	0,011	0,002	0,767
CQ3	0,330	0,447	0,934	0,801	0,044	0,020	0,031	0,011	0,002	0,763
QQ1	0,250	0,517	0,833	0,498	0,005	0,015	0,023	0,012	0,005	0,605
QQ2	0,250	0,516	0,843	0,498	0,004	0,015	0,023	0,012	0,005	0,607
QQ3	0,252	0,519	0,867	0,506	0,004	0,015	0,022	0,012	0,005	0,618

3.4. Ensaios de Impacto

Os dez conjuntos de impacto Charpy, cada conjunto contendo três CPs de espessura 10 mm, testados a 0°C, de cada material apresentaram valores de energia absorvida superiores àquelas especificados pela Petrobras [5] para juntas soldadas com o tubo API 5L X65 que são 36J para o valor médio e 29J para o valor mínimo individual. Os gráficos 1 e 2 mostram os valores obtidos para os tubos API 5CT C100 e API 5CT Q125 respectivamente. Todos os CPs apresentaram fratura totalmente dúctil exemplificado através das fraturas do conjunto de CPs CI1 mostrados na figura 10.



Figura 10. Cps mostrando aspecto de fratura totalmente dúctil.

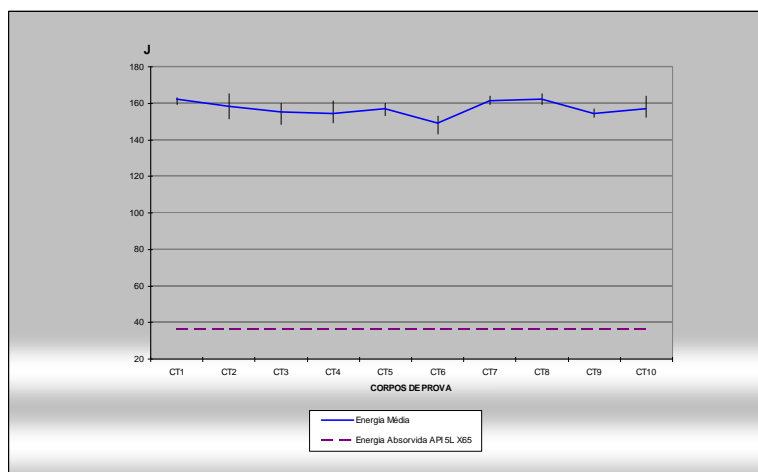


Gráfico 1. Resultados do ensaio de impacto Charpy “V” a 0°C do API 5CT C110.

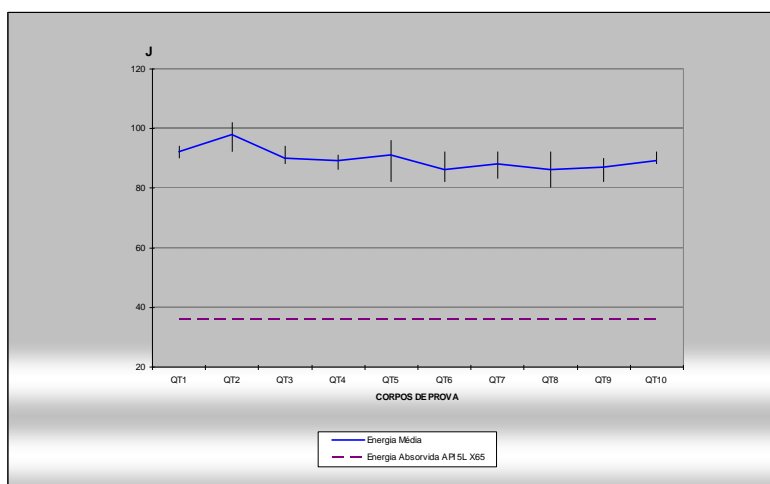


Gráfico 2. Resultados do ensaio de impacto Charpy “V” a 0°C do API 5CT Q125.

3.5. Macrografia

Os CPs de macrografia apresentaram uma textura típica de material fabricado por laminação conforme mostrado na Figura 11 para os tubos API 5CT C100 e API 5CT Q125, conforme norma de preparação ASTM E381 e ataque HCl + H₂O (1:1), respectivamente:



Figura 11. Aspecto macrográfico os tubos API 5CT C100 e API 5CT Q125, respectivamente.

3.6. Caracterização Metalográfica

A caracterização metalográfica concluiu que a microestrutura dos dois materiais consiste em uma matriz de martensita revenida, preparada e analisada conforme as normas ASTM E3/07 e ASTM E7/03, mostrada na Figura 12.

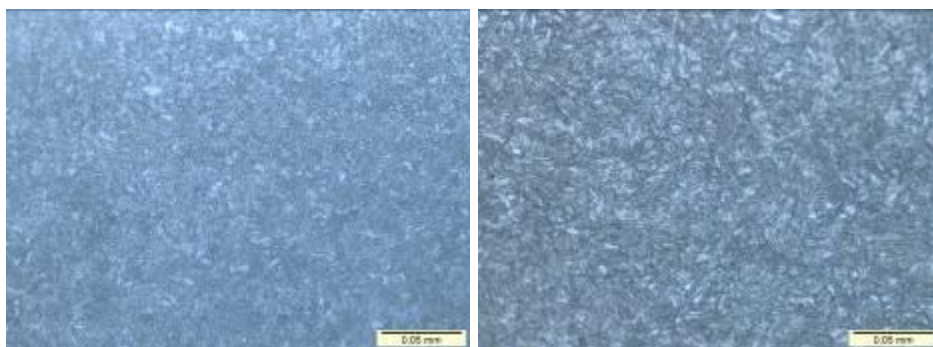


Figura 12. Fotomicrografia. Aumento 500X. Ataque Nital 2%. Observa-se uma microestrutura constituída de martensita revenida em ambos materiais API 5CT C110 e API 5CT Q125, respectivamente.

3.7. Tamanho de grãos dos CPs

A Figura 13 apresenta a análise do tamanho de grão conforme ASTM E112, analisado em 100X e registrado em 500X.

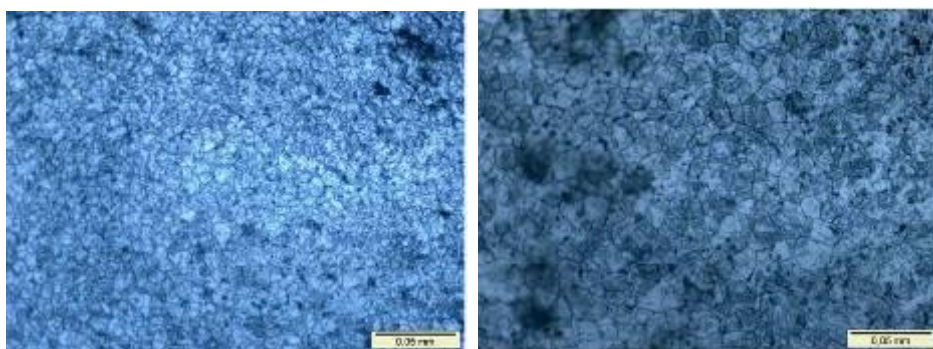


Figura 13. Fotomicrografia. Aumento 500X. Ataque HCl + H₂O (1:1). Observa-se o tamanho de grão 8 em ambos materiais API 5CT C110 e API 5CT Q125, respectivamente.

3.8. Dureza (Metais de Base)

A medição dos dez pontos de dureza HV10 de cada material obteve os resultados mostrados na tabela 5.

Tabela 5. Resultado dos ensaios de dureza dos tubos API 5CT C110 e API 5CT Q125.

HV10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Média ± D.P.
C110	272	268	268	265	265	267	268	268	271	267	267,9 ± 2,23
Q125	338	343	339	339	339	339	333	335	334	349	338,8 ± 4,64

3.9. Perfil de Dureza dos CPs Amanteigados

Os gráficos 3 e 4 mostram os resultados de dureza nos dez CPs amanteigados. Os pontos 1 a 20 são aqueles mostrados nas Figuras 8 e 9.

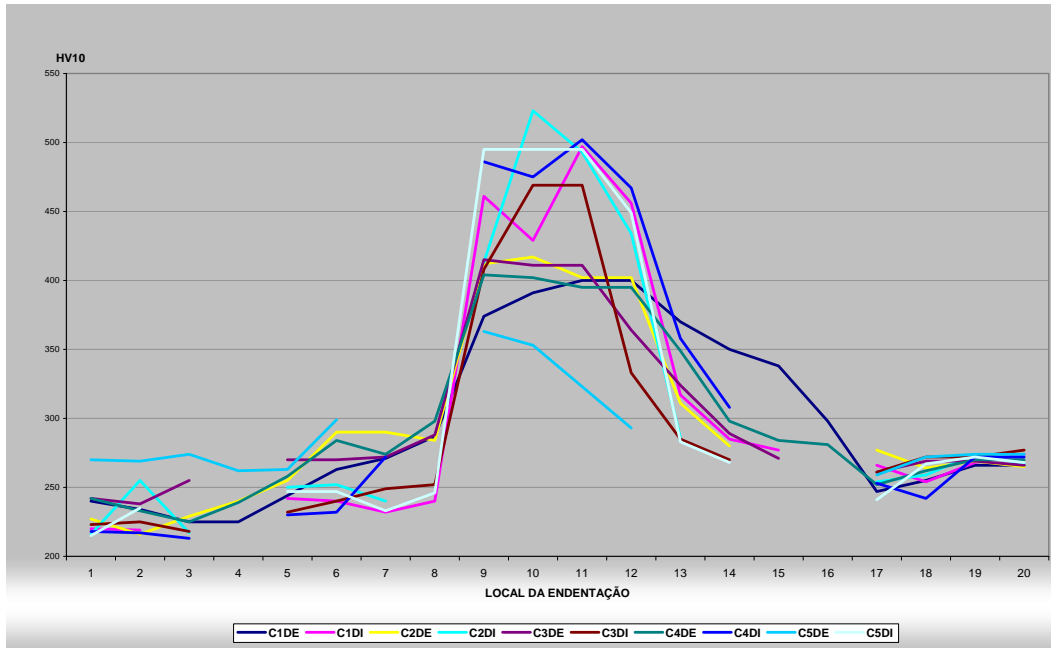


Gráfico 3. Perfil de dureza do amanteigamento do tubo API 5CT C110.

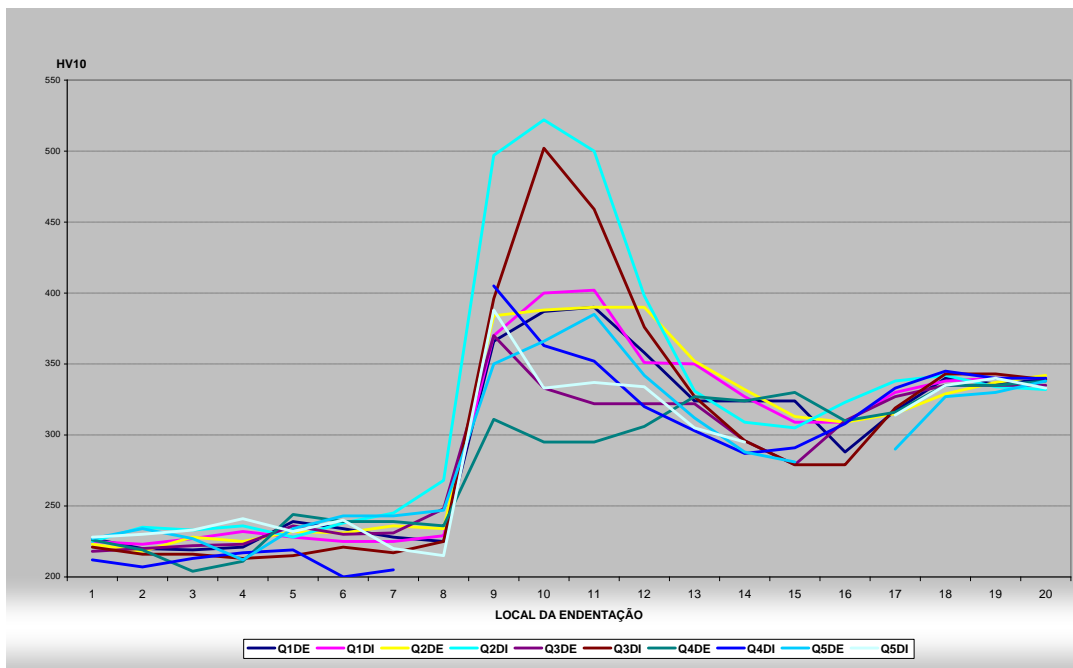


Gráfico 4. Perfil de dureza do amanteigamento do tubo API 5CT Q125.

3.10. Opção Preliminar pelo Tubo API 5CT Q125 com Aporte do CP Q-2

Baseado no fato de que o carbono equivalente do tubo API 5CT C110 ser mais elevado (CE_{iiv} 0,76%), esse material foi descartado. Sendo assim, foi necessária a opção por um dos cinco CPs amanteigados do material API 5CT Q125. Foi feita a opção pelo CP Q-02 pelo fato de na soldagem desse CP terem sido utilizados na primeira e na segunda camada os aportes térmicos de 0,995 e 0,976kJ/mm respectivamente. Esses aportes térmicos foram os escolhidos por serem os mais naturais para o soldador, diminuindo assim a probabilidade de descontinuidades de soldagem como falta de fusão e porosidade. Como esse CP, assim como os demais CPs amanteigados do material API 5CT Q125, apresentou dureza

elevada na ZAC, com valor máximo de 522 HV10, foi necessária a realização de tratamento térmico de revenimento.

3.11. Análise Metalográfica do CP Q-2 Antes do Tratamento Térmico

A microestrutura do metal de base possui uma matriz com estrutura de martensita revenida. Após a deposição das duas camadas de amanteigamento, com os aportes térmicos controlados obtiveram-se diferentes microestruturas. A figura 14 mostra as regiões, as dimensões e os pontos das análises metalográficas, com aumento de 500X, ataque Nital 2%, normas ASTM E3/07 e ASTM E7/03, enquanto as figuras 15 a 23 mostram cada ponto analisado.

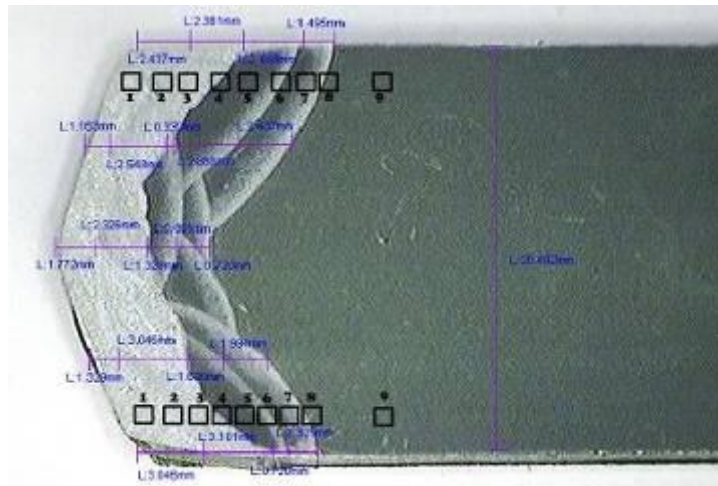


Figura 14. Perfil macrográfico e regiões de análise micrográfica CP Q-2.

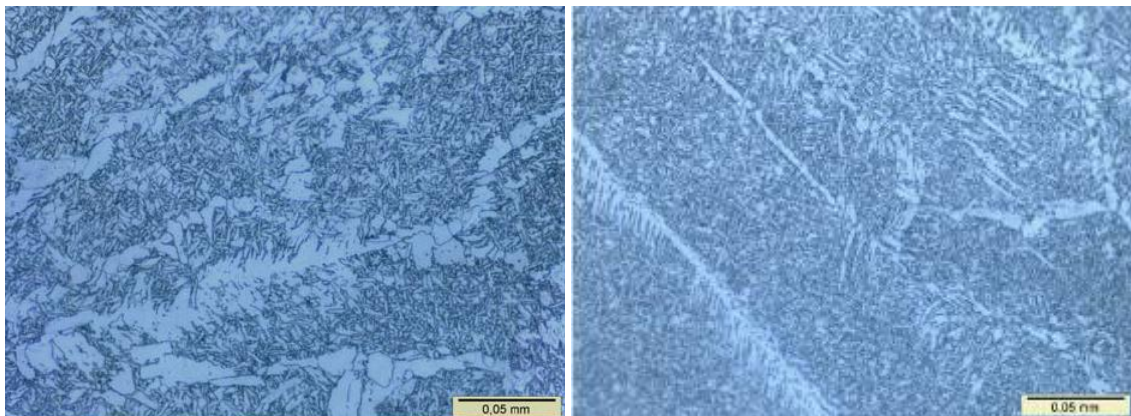


Figura 15. Ponto 1, camada 2 externa e interna respectivamente.

Externo - Matriz com estrutura de bainita, ferrita em contorno de grão e acicular.

Interno - Matriz com estrutura de bainita, ferrita com segunda fase alinhada, ferrita em contorno de grão e acicular.

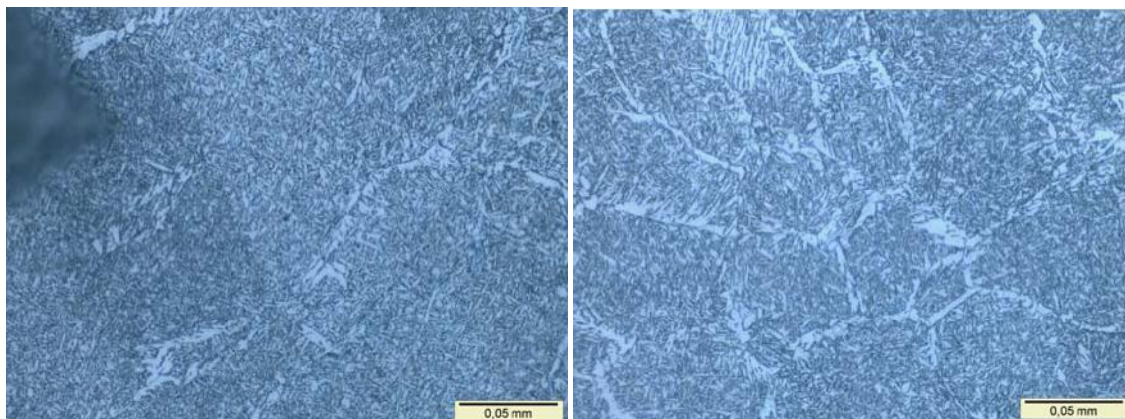


Figura 16. Ponto 2, interface camada 2/camada 1 externa e interna respectivamente.

Externo - Matriz com estrutura de bainita, ferrita em contornode grão e acicular.

Interno - Matriz com estrutura de bainita, ferrita em contornode grão, ferrita poligonal intragranular e acicular.

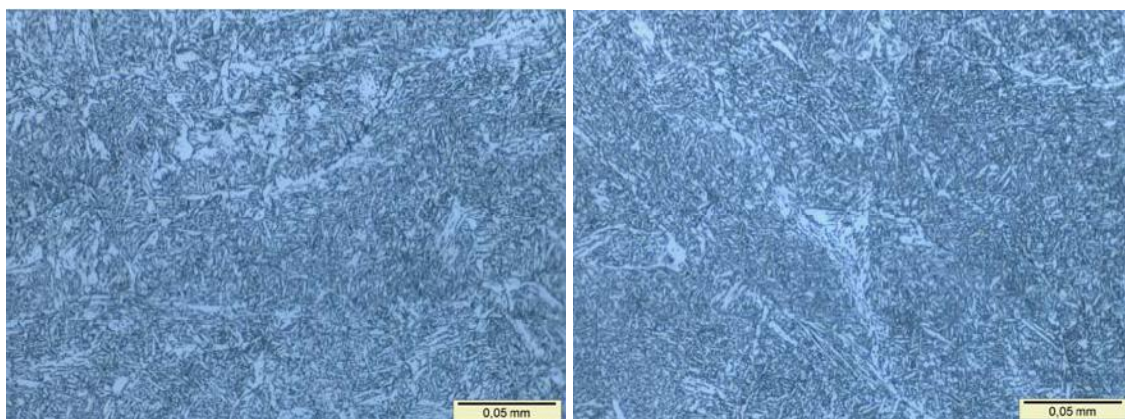


Figura 17. Ponto 3, camada 1 externa e interna respectivamente.

Externo - Matriz com estrutura de bainita, ferrita poligonal intragranular e acicular.

Interno - Matriz com estrutura de bainita, ferrita com segunda fase não alinhada e acicular.

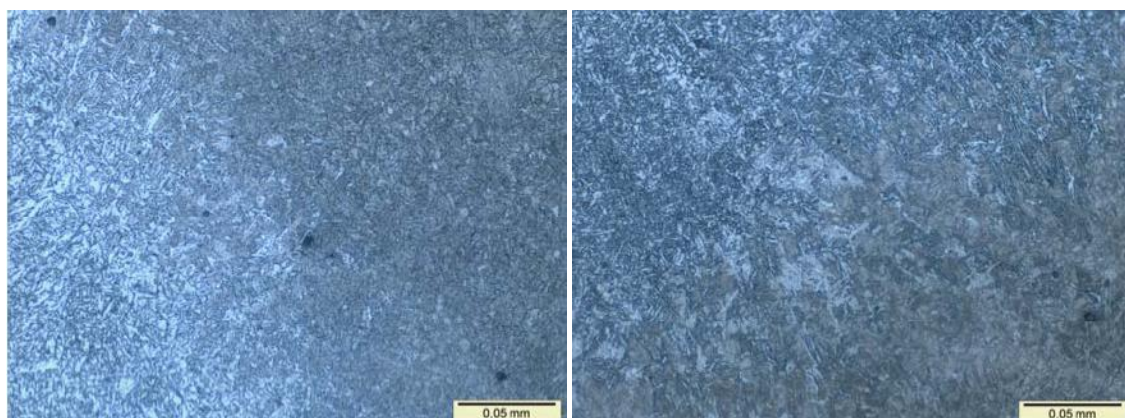


Figura 18. Ponto 4, interface camada 1/metal base externa e interna respectivamente.

Externo e Interno - Matriz com estrutura de bainita, ferrita acicular e martensita revenida.

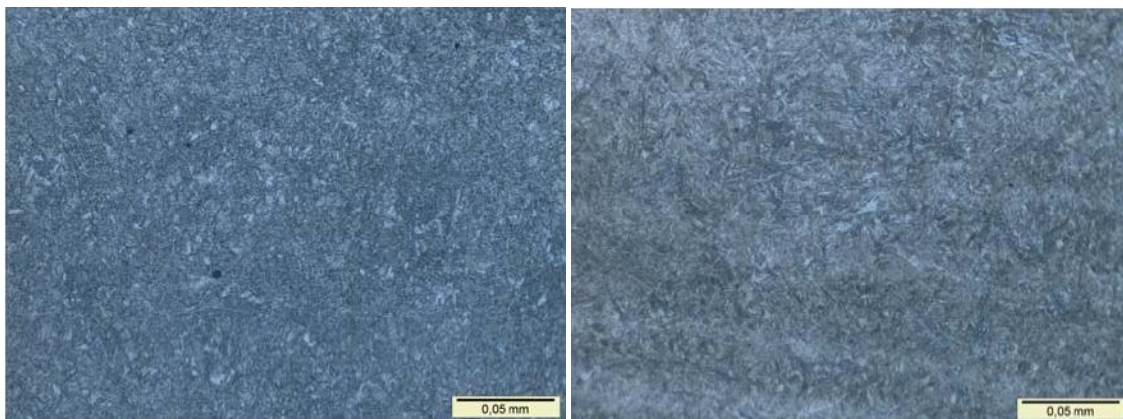


Figura 19. Ponto 5, ZAC 1 externa e interna respectivamente.

Externo - Matriz com estrutura de martensita revenida.

Interno - Matriz com estrutura de martensita revenida.

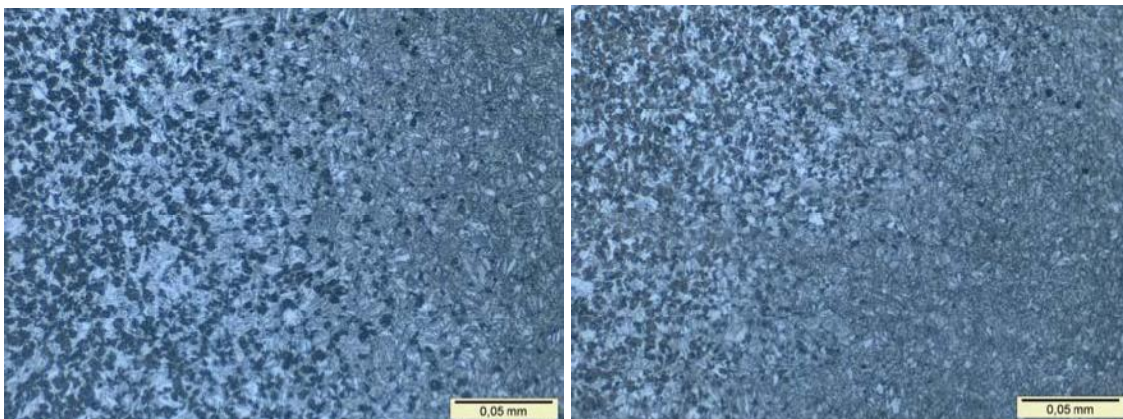


Figura 20. Ponto 6, ZAC 2 externa e interna respectivamente.

Externo e Interno - Matriz com estrutura de perlita, ferrita acicular e martensita.

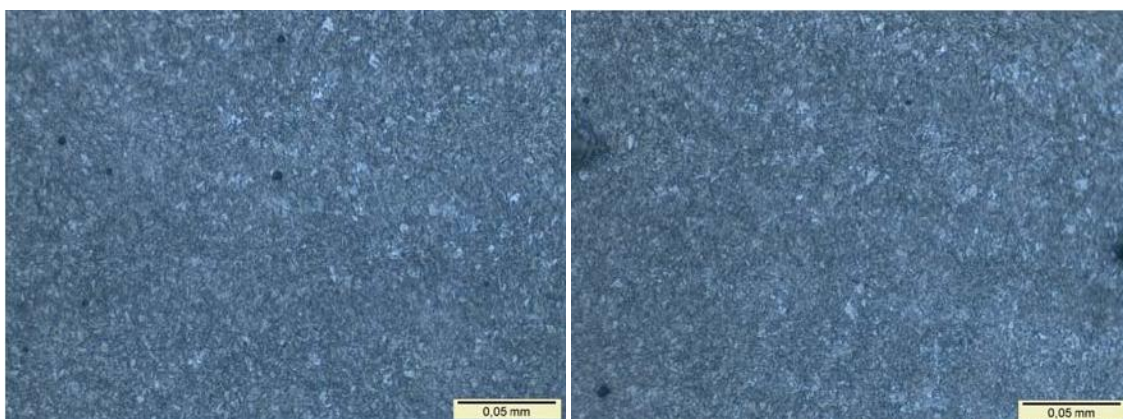


Figura 21. Ponto 7, ZAC 3 externa e interna respectivamente.

Externo e Interno - Matriz com estrutura de martensita revenida.

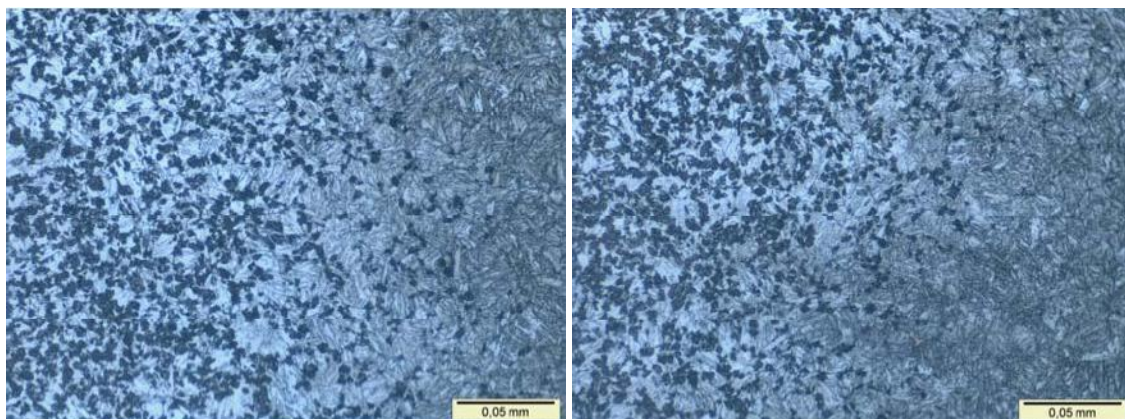


Figura 22. Ponto 8, ZAC 4 externa e interna respectivamente.

Externo - Matriz com estrutura de perlita, ferrita acicular e martensita revenida.

Interno - Matriz com estrutura de perlita, ferrita acicular, martensita revenida.

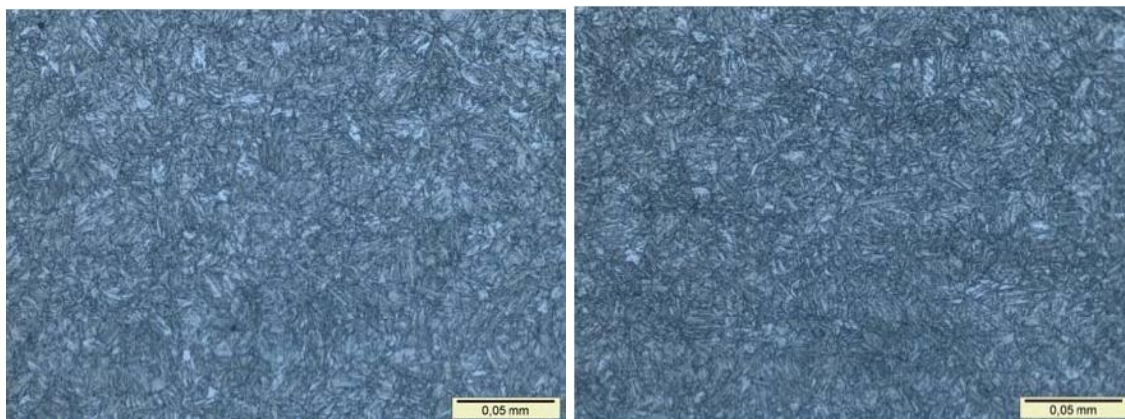


Figura 23. Ponto 9, MB externa e interna respectivamente.

Externo e Interno - Matriz com estrutura de martensita revenida.

3.12. Tratamento Térmico de Revenimento do CP Q-2

O tratamento térmico de revenimento realizado consistiu de temperatura de patamar de 650°C por um período de 1h e 15 minutos, com taxa de aquecimento de 90°C/h a partir de 280°C a taxa de resfriamento de 120°C/h até 280°C, conforme mostra a figura 24. Esse tratamento térmico reduziu os valores de dureza do CP-2, agora denominado de CP Q-2-T, para valores máximos de 324 HV10, conforme mostrado na tabela 6.

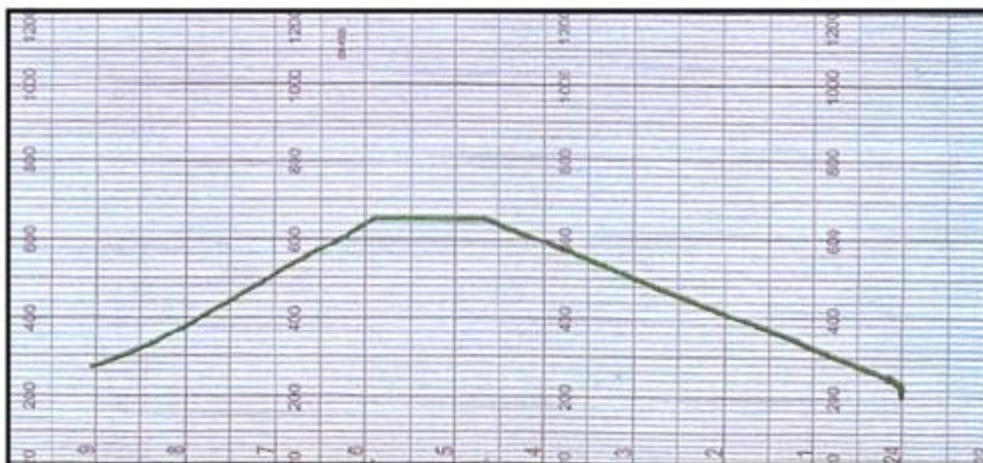


Figura 24 – Registro do tratamento térmico de revenimento

Tabela 6. Valores de dureza do CP Q-2-T após tratamento térmico.

CP	Regiões																			
	Camada 2				Camada 1				ZAC								Metal base			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Q2TDE	213	238	232	222	221	225	220	226	324	322	322	322	322	319	265	252	289	289	296	296
QT2DI	203	192	210	213	204	201	201	215	303	314	314	309	279	251	281	281	296	296	296	294

3.13. Análise Metalográfica do CP Q-2 Após o Tratamento Térmico

Após o tratamento térmico de revenimento obteve-se mudança na microestrutura. A figura 25 mostra as regiões, as dimensões e os pontos das análise metalográficas, com aumento de 500X, ataque Nital 2%, normas ASTM E3/07 e ASTM E7/03, enquanto as figuras 26 a 34 mostra cada ponto analisado.



Figura 25. Perfil macrográfico e regiões de análise micrográfica CP Q-2-T.

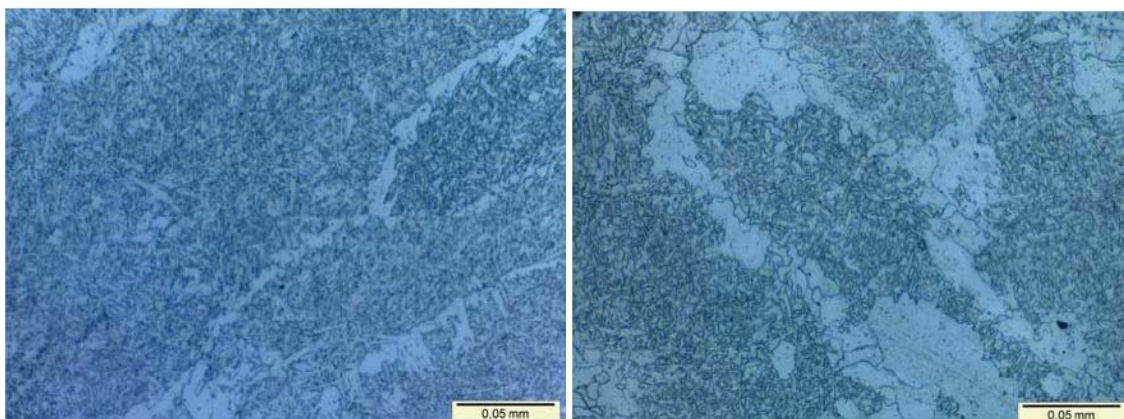


Figura 26. Ponto 1, camada 2 externa e interna respectivamente.

Externo e Interno -Matriz consiste em estrutura de bainita revenida, ferrita com segunda fase não alinhada e acicular.

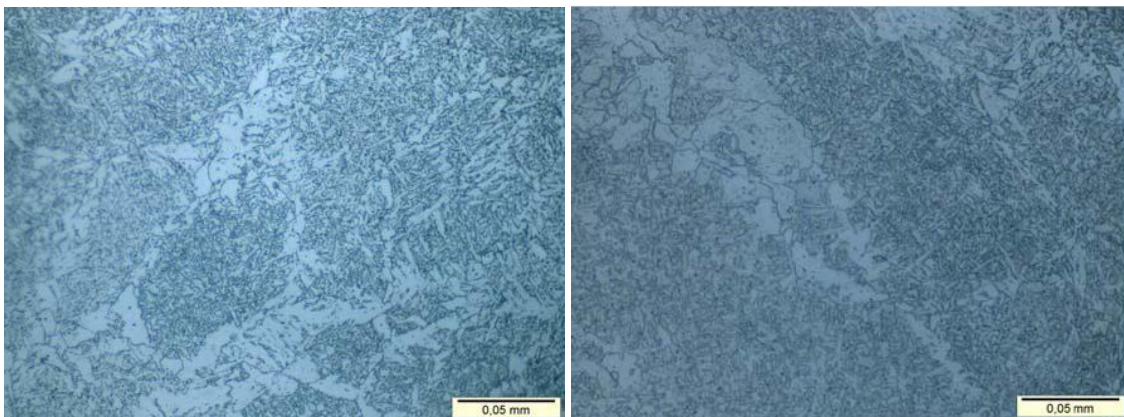


Figura 27. Ponto 2, interface camada 2/camada 1 externa e interna respectivamente

Externo e Interno -Matriz consiste em estrutura de bainita revenida, ferrita com segunda fase não alinhada e acicular.

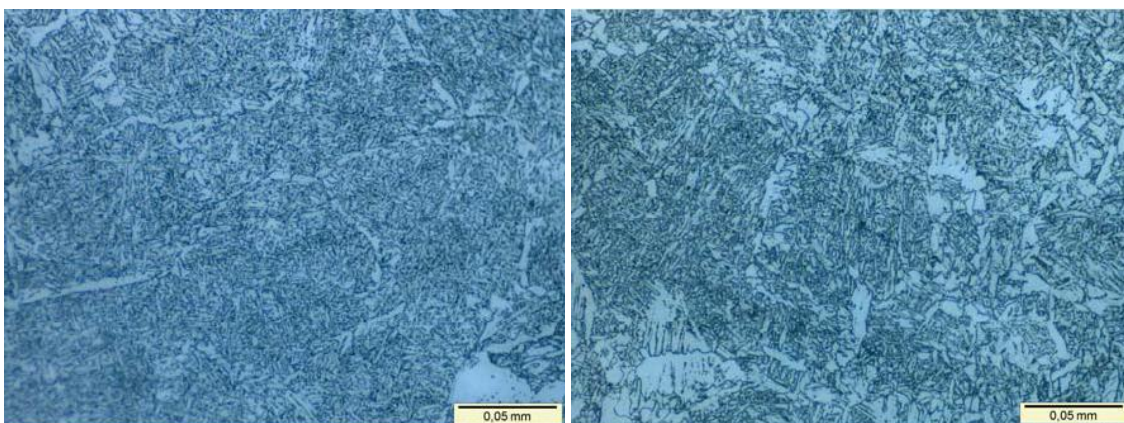


Figura 28. Ponto 3, camada 1 externa e interna respectivamente.

Externo - Matriz consiste em estrutura de bainita revenida, ferrita em contorno de grão e acicular.
Interno - Matriz consiste em estrutura de bainita revenida, ferrita com segunda fase não alinhada, ferrita intragranular e acicular.

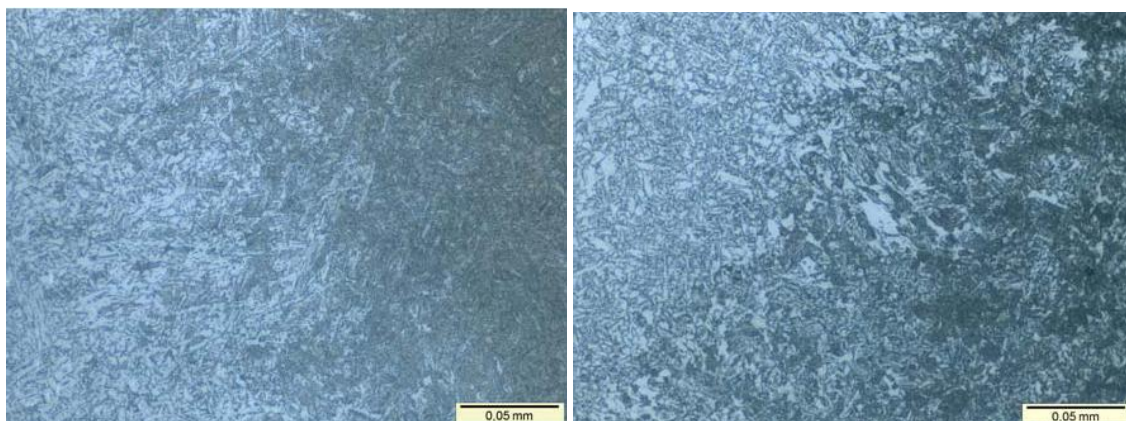


Figura 29. Ponto 4, interface camada 1/metal base externa e interna respectivamente.

Externo - Matriz consiste em estrutura de bainita, ferrita acicular e martensita revenida.

Interno - Matriz consiste em estrutura de bainita revenida, ferrita poligonal intragranular, ferrita acicular e martensita ou bainita revenida.

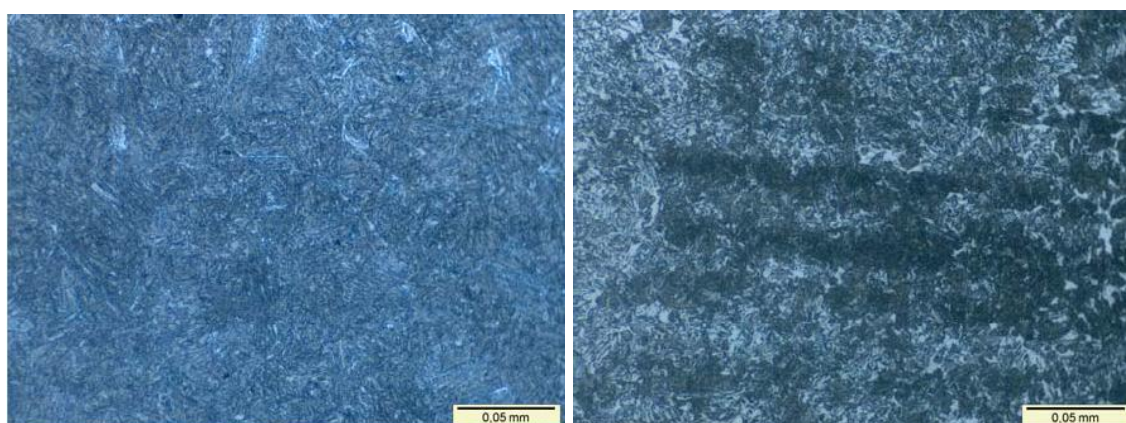


Figura 30. Ponto 5, ZAC 1 externa e interna respectivamente.

Externo - Matriz consiste em estrutura de martensita revenida e ferrita acicular residual.

Interno - Matriz consiste em estrutura de martensita revenida, possivelmente bainita, ferrita poligonal intragranular e acicular.

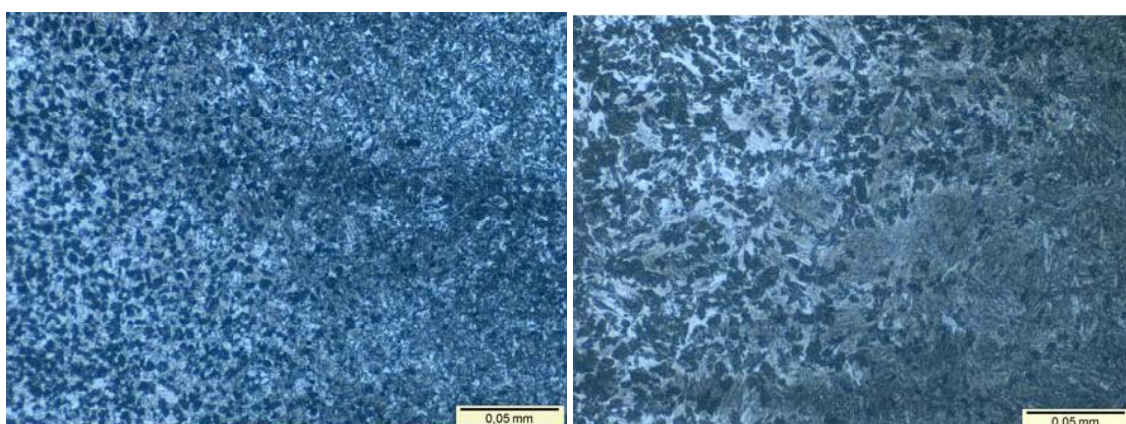


Figura 31. Ponto 6, ZAC 2 externa e interna respectivamente.

Externo e Interno - Matriz consiste em estrutura de perlita, ferrita acicular e martensita revenida.

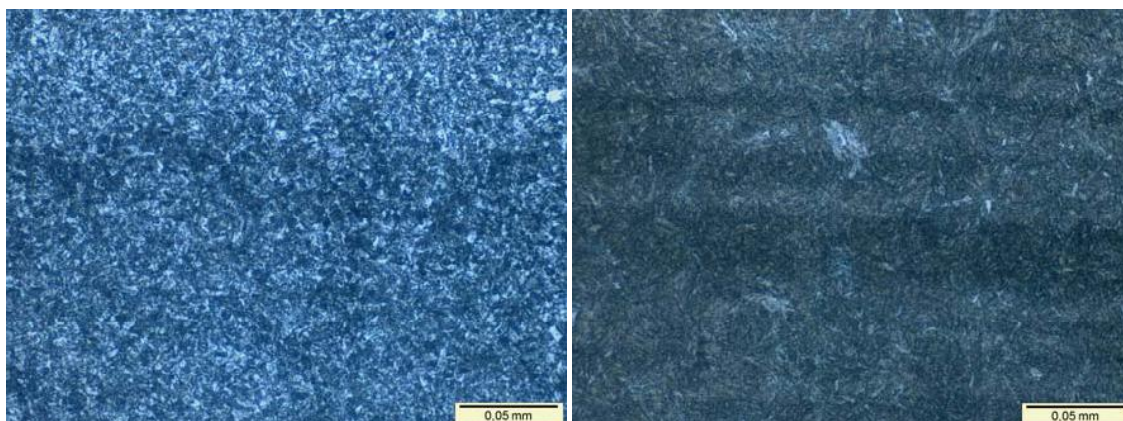


Figura 32. Ponto 7, ZAC 3 externa e interna respectivamente.

Externo – Matriz consiste em estrutura de martensita revenida ou bainita e ferrita acicular.
Interno - Matriz consiste em estrutura de martensita revenida e ferrita acicular residual.

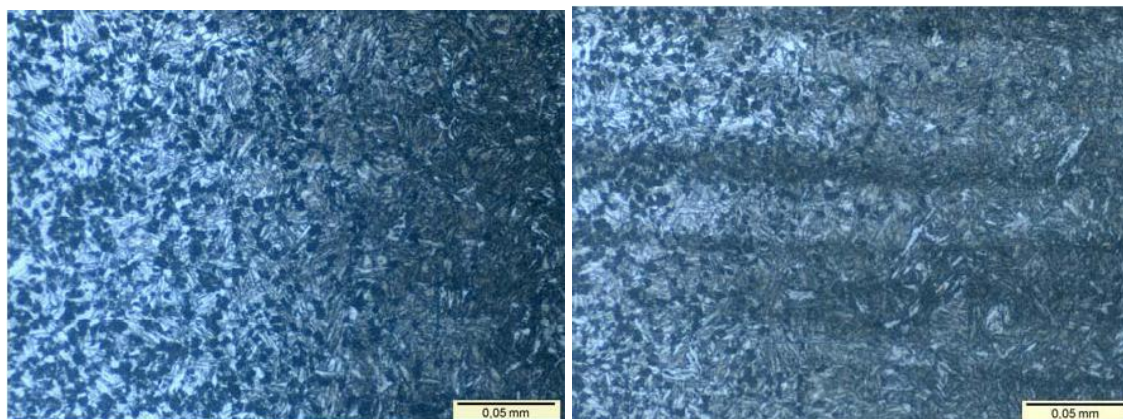


Figura 33. Ponto 8, ZAC 4 externa e interna respectivamente.

Externo e Interno - Matriz consiste em estrutura de perlita, ferrita acicular e martensita revenida.

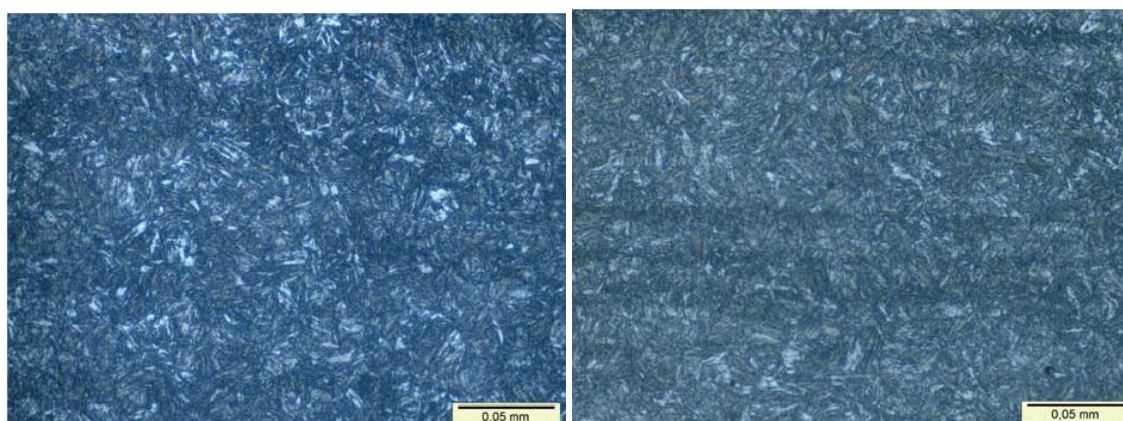


Figura 34. Ponto 9, MB externa e interna respectivamente.

Externo - Matriz consiste em estrutura de martensita revenida e ferrita acicular residual.
Interno – Matriz consiste em estrutura de martensita revenida.

4. DISCUSSÃO

Neste item serão discutidos os resultados obtidos nos ensaios mecânicos, ensaio macrográfico, análise química, análise metalográfica e parâmetros de soldagem.

- **Ensaio mecânicos.** Os ensaios mecânicos realizados no tubo API 5CT C110 e API 5CT Q125 apresentaram como resultados características mecânicas compatíveis com os ensaios mecânicos aos quais os mesmos serão submetidos quando da futura qualificação do procedimento de soldagem conforme os requisitos da norma API 1104. Conforme esperado todos os resultados de tração e dureza apresentaram resultados significativamente superiores ao especificado para o tubo API 5L X65. Todos os ensaios de dobramento foram aprovados mesmo tendo sido esse mais rigoroso ao ensaio que será realizado no momento futuro da qualificação do procedimento de soldagem. Quanto ao ensaio de impacto Charpy, ensaio esse não exigido pela norma API 1104, porém importante no contexto desse trabalho, os valores de energia absorvida obtidos para os dois materiais são superiores aos valores especificados para o tubo API 5L X65.
- **Ensaio Macrográfico.** Os ensaios macrográficos realizados no tubo API 5CT C110 e API 5CT Q125 apresentaram como resultados texturas compatíveis com tubos produzidos pelo processo de laminação, apresentando também linhas de segregação no sentido do comprimento do tubo.
- **Análise metalográfica.** As análises metalográficas demonstraram que as microestruturas dos dois materiais eram compatíveis com materiais temperados e revenidos e os tamanhos dos grãos dos dois materiais eram 8 conforme ASTM E 112 plate I.
- **Análise química.** As análises químicas são um importante aspecto desse estudo considerando que a norma API 5CT possui requisitos bastante flexíveis para essa composição. Uma importante informação fornecida pela análise química é o carbono equivalente (CE_{iiw}). O carbono equivalente é um fator de determinação da probabilidade de ocorrência em juntas soldadas, em aços carbono e baixa liga, do trincamento induzido pelo hidrogênio. A literatura considera que o carbono equivalente de até 0,40% propicia uma boa soldabilidade quanto ao aspecto do trincamento induzido pelo hidrogênio. Nesse estudo, concluiu-se que os carbonos equivalentes dos materiais eram de CE_{iiw} 0,76% para o API 5CT C110 e de CE_{iiw} 0,61% para o API 5CT Q125. Esses resultados determinaram a opção pelo uso do tubo API 5CT Q125.
- **Parâmetros de soldagem e dureza dos CPs amanteigados.** Os CPs amanteigados C-1, C-2, C-3, C-4 e C-5 para o API 5CT C110 e, CPs Q-1, Q-2, Q-3, Q-4 e Q-5 para o API 5CT Q125, tiveram a deposição das duas camadas com diferentes aportes térmicos. Os resultados das durezas na ZAC dos dois metais de base foram elevados, sendo o maior valor obtido de 523 HV10 para o material C110 e de 522 HV10 para o material Q125. Esses dois valores são significativamente superiores à dureza máxima admissível pelo projetista para esse caso que é de 350 HV10. Conclui-se que a técnica da meia camada não foi suficiente para reduzir a dureza para os valores desejados. Baseado no fato de que o carbono equivalente do tubo API 5CT C110 ser mais elevado (CE_{iiw} 0,76%), esse material foi descartado. Sendo assim, foi necessária a opção por um dos cinco CPs amanteigados do material API 5CT Q125. Foi feita a opção pelo CP Q-02 pelo fato de na soldagem desse CP terem sido utilizados na primeira e na segunda camada os aportes térmicos de 0,995 e 0,976 kJ/mm respectivamente. Esses aportes térmicos foram os escolhidos por serem os mais naturais para o soldador, diminuindo assim a probabilidade de descontinuidades de soldagem como falta de fusão e porosidade. Como esse CP, assim como os demais, apresentou dureza elevada na ZAC, na faixa de 305 a 522 HV10, foi necessária a realização de tratamento térmico de revenimento.
- **Análise microestrutural da região amanteigada.** Antes da realização do amanteigamento a microestrutura nas regiões próximas a superfície externa e interna do tubo API 5CT Q125 observou-se a mesma microestrutura, ou seja, matriz de martensita revenida. Com a realização do amanteigamento utilizando-se a técnica da meia camada houve a criação de uma ZAC caracterizada por duas bandas de transformação, sendo que cada banda está relacionada a cada uma das duas camadas depositadas no amanteigamento. Essas bandas de transformação apresentaram a formação de perlita, possivelmente causada pela permanência dessas bandas em tempo e temperatura que propiciaram um segundo revenimento visto ser o metal de base um temperado e revenido. Observa-se que a primeira banda,

mais próxima da linha de fusão, apresenta perlita de maior tamanho quando comparada com a perlita da segunda banda.

- **Tratamento térmico de revenimento do CP Q-2.** O CP-2 foi submetido a tratamento térmico de revenimento a 650°C por uma hora e 15 minutos. Esse tratamento, reduziu significativamente os valores de dureza na ZAC do tubo API 5CT Q125, sendo o valor máximo medido de 324 HV10.
- **Influência do tratamento térmico na microestrutura.** Após a realização do tratamento térmico observou-se algumas mudanças na microestrutura de algumas regiões. No metal de solda, depositado pelo eletrodo revestido E7018-1, as mudanças observadas foram o revenimento da bainita e a poligonização da ferrita acicular, principalmente na região interna do tubo. Na ZAC houve o aparecimento de fases tais como bainita revenida, ferrita acicular e perlita. Quanto à primeira banda da ZAC, observou-se um significativo aumento do tamanho da perlita, principalmente na região interna do tubo. Quanto à segunda banda da ZAC não houve mudança significativa. No metal de base MB houve o aparecimento de ferrita acicular. Quanto às modificações microestruturais mais significativas na região interna do tubo, pode-se atribuir tal fato ao resfriamento mais lento nesta região, devido ao tubo, no momento da soldagem, ter suas extremidades fechadas, evitando assim a circulação de ar e a consequente permanência por maior tempo a temperaturas mais elevadas e à diminuição da velocidade de resfriamento.

5. CONCLUSÕES

- a) Apesar de possuir resistência mecânica especificada superior à do tubo API 5CT C110, o tubo API 5CT Q125 demonstrou neste trabalho apresentar propriedades mais apropriadas para ser submetido à operação de soldagem. A propriedade mais importante para orientar a opção foi o seu menor carbono equivalente. Outro fator primordial, foi a redução da dureza após o tratamento térmico de revenimento onde foram obtidos menores valores de dureza na ZAC, conforme tabela 6.
- b) Foram escolhidos os parâmetros de soldagem utilizados no CP Q-2, com tratamento térmico de revenimento, para a qualificação do procedimento de soldagem de união do tubo API 5CT Q125, com o tubo do gasoduto construído com o tubo API 5L X65. Tal escolha se deu pelo fato do CP Q-2, dentre os cinco CPs soldados ter sido soldado com parâmetros de soldagem mais apropriados para o soldador. A realização do tratamento térmico de revenimento foi necessária, pois os cinco CPs amanteigados apresentaram elevada dureza na ZAC.

6. REFERÊNCIAS

- AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, Specification for casing and tubing, API Standard 5CT, 8th Ed. 2005.
- AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, Welding of pipeline and related facilities, API Standard 1104, 20th Ed. 2005.
- AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, Specification for line pipe, API Standard 5L, 44th Ed. 2007.
- AMERICAN SOCIETY FOR MECHANICAL ENGINEERS, Gas transmission and distribution piping systems - ASME B31.8, 2007.
- PETROBRAS, Especificação técnica - Requisitos adicionais à norma N-464.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à PETROBRAS através de seus órgãos ENGENHARIA/SL/SEQUI e ENGENHARIA/IETEG/IESE pelo apoio à realização deste trabalho, sem o qual a realização do mesmo seria impossível.

DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído neste trabalho.