Radiografia Digital para Inspeção de Soldas de Dutos - Melhor Sensibilidade

(Digital Radiography to Inspect Weld Seams of Pipelines - Better Sensitivity)

Edson Vasques Moreira[1], Heleno Ribeiro Simões[1], José Maurício Barbosa Rabello[2], José Rubens de Camargo[2], Marcelo dos Santos Pereira[3]

[1]TenarisConfab, Pindamonhangaba, São Paulo, Brasil, emoreira@confab.com.br

[2]Universidade de Taubaté – UNITAU, Taubaté, São Paulo, Brasil

[3]Universidade Estadual Paulista – UNESP, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, São Paulo, Brasil

Resumo

A técnica radiográfica convencional, utilizando filmes radiográficos industriais, está com seus dias contados. A Radiografia Digital, ultimamente, tem tomado o seu lugar em vários segmentos de produtos e serviços, tais como da medicina, aeroespacial, segurança, automobilístico, etc. Além de uma tendência tecnológica, a técnica digital tem comprovado que traz benefícios em termos de produtividade, sensibilidade, meio ambiente, ferramentas de tratamento de imagem, redução de custos, etc. Se a solda a ser inspecionada é de um produto seriado, como por exemplo, tubos, a melhor opção para a implantação da Radiografia digital é o detector plano, pois com a sua utilização pode-se reduzir o tempo de ciclo de inspeção devido ao seu alto grau de automação. Este trabalho testou e avaliou os resultados desta nova técnica comparando-a com a radiografia convencional. Neste estudo, foram testadas juntas soldadas pelo processo de arco submerso que foram especialmente preparadas de forma a apresentarem pequenas trincas artificiais, que serviram para comparar as sensibilidades das técnicas envolvidas. Após a execução de vários experimentos, o método digital obteve uma maior sensibilidade ao Indicador de Qualidade de Imagem (IQI) de arame e também na detecção de pequenas descontinuidades, indicando que o uso da radiografia digital utilizando o detector plano supera com vantagens a técnica convencional [1, 2]. Os trabalhos foram realizados tomando-se como base as especificações de tubos para gasodutos e oleodutos API 5L edição de 2004[3] e ISO 3183 edição de 2007[4].

Palavras-chave: *Radiografia digital. Soldagem. Filme radiográfico. Gasodutos. Oleodutos.*

Abstract: *The conventional radiographic technique using industrial radiographic films is with the days finishing. The Digital Radiography is taking place in several sectors, e.g., the medical, aerospace, security, automotive, etc. In addition to representing a technological trend, it has been demonstrated that digital radiography offers a series of benefits in terms of productivity, sensitivity, environmental aspects, image treatment tools, cost reduction, etc. If one weld seam to be inspected is from a serried product, as example a pipe, the best option to be implemented is the Flat Panel Detector, with this equipment is possible to reduce the obtaining digital radiographic images in place of films and reducing the inspection cycle time due to its high degree of automation. In the experiments described in this paper, this new technique was tested and the results were compared with those obtained by the conventional radiography. The welded specimens were prepared using the submerged-arc welding process and small artificial cracks of the most varied dimensions, present in the specimens, were used to establish a comparison of the sensitivities presented by the techniques employed. After conducting several experiments, the digital method presented the highest sensitivity to the wire-type Image Quality Indicator (IQI) and in the detection of small defects, leading to the conclusion that the use of digital radiography using the flat-panel detector offers advantages over the conventional technique [1, 2]. This work was carried out based on the API 5L Edition 2004 [3] and ISO 3183 Edition 2007 [4] specifications.*

Key-words: *Digital radiography, welding, industrial radiographic films, gas-lines, oil-lines*

1. Introdução

A técnica da radiografia convencional, que utiliza filmes radiográficos industriais, está com seus dias contados. Um grande movimento, debates, avaliações, qualificações de sistemas digitais e suas respectivas implementações têm acontecido no mundo em vários segmentos. Na última Conferência Pan-Americana de Ensaios Não Destrutivos, realizada em Outubro de 2007 na cidade de Buenos Aires, pôde-se notar que o tema está evoluindo rapidamente em várias empresas e instituições de renome, as quais tiveram oportunidade de mostrar o estágio atual da Radiografia Digital través de seus trabalhos e apresentações [5-8]. A aplicabilidade da radiografia digital em juntas soldadas

(Recebido em 01/08/2007; Texto Final em 30/07/2008).

de gasodutos e oleodutos terrestres e marítimos foi avaliada como nos segmentos da medicina, aeroespacial, segurança, automobilístico e petroquímico.

Dentro das opções atuais, o detector digital plano, Radiografia Direta (DR) é considerada como a melhor solução para substituição da técnica convencional para as linhas de fabricação de tubos por agregar uma tecnologia que traz vários benefícios, destacando-se: uma melhoria da sensibilidade radiográfica, não só em termos dos Indicadores de Qualidade de Imagem como na percepção de pequenas descontinuidades; um forte impacto positivo em termos ambientais, pois é ecologicamente mais adequada devido à eliminação de filmes, químicos e rejeitos decorrentes da técnica atual; uma solução mais econômica, chegando a casos com redução dos custos de cerca de 60% [9]; redução do tempo de ciclo de inspeção devido ao seu alto grau de automação [5] e um aumento significativo da produtividade do ensaio. Com estes fortes apelos, cada segmento industrial tem procurado entender esta tecnologia e buscado a melhor aplicação para a inspeção de seus produtos.

Neste artigo é apresentado um estudo sobre o tema, onde foram testados corpos-de-prova de juntas longitudinais de tubos soldados pelo processo de arco submerso. Os corpos-de-prova foram preparados de forma a apresentarem trincas artificiais nas mais variadas dimensões, para possibilitar a comparação entre as sensibilidades da técnica digital e da técnica convencional, que utiliza filmes industriais.

2. O processo de fabricação dos tubos

Para tubos soldados de grandes diâmetros, que são fabricados de acordo com as especificações API 5L e ISO 3183, o processo mais importante e produtivo é o processo de fabricação conhecido como UOE. Este processo recebe este nome por ter na linha de fabricação uma prensa que deixa a chapa na forma de "U", posteriormente uma prensa que deixa a chapa em forma de "O". Após a soldagem longitudinal o produto, já na forma de tubo, recebe uma expansão "E".

Na Figura 1 pode ser observado o processo de fabricação da **Tenaris**Confab, localizada em Pindamonhangaba no estado de São Paulo.

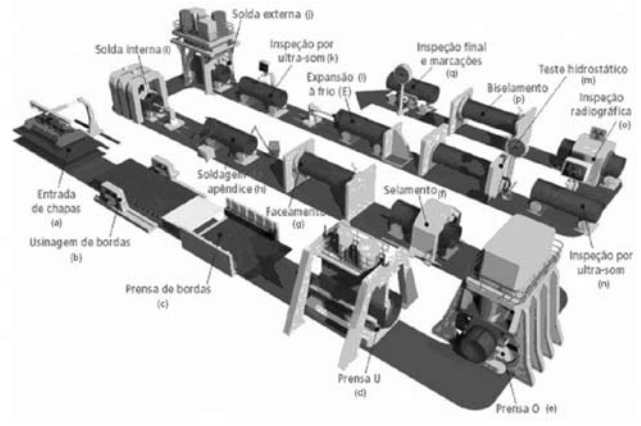


Figura 1. Fluxograma do processo "UOE".

De forma resumida, o processo se inicia na preparação das extremidades das chapas para soldagem, que em seguida são prensadas e soldadas interna e externamente pelo processo de arco submerso com até 04 arames. Após isto o tubo passa pelo processo de expansão, é testado hidrostaticamente, o cordão de solda é inspecionado por ultra-som automatizado e por radiografia nas suas extremidades. Vários outros controles são executados, sendo que as demais etapas do processo podem ser observadas no fluxograma mostrado.

Especificamente, o ensaio radiográfico é realizado com filmes industriais Classe 1 ou 2 [11], utilizando fonte de Raios-X conforme a especificação aplicável, sendo o processo de revelação feito por processadoras automáticas, de acordo com as recomendações do fabricante. A qualidade da técnica radiográfica é avaliada por Indicadores de Qualidade de Imagem (IQI) [12]de arame, que são colocados transversalmente sobre o cordão de solda.

As chapas de aço carbono laminadas, que são utilizadas para a fabricação dos tubos, são fabricadas de acordo com as exigências estabelecidas nas especificações citadas ou de acordo com a especificação do cliente, devidamente discutida e avaliada pela **Tenaris**Confab e seus fornecedores. Para tubos de alta resistência, as usinas produzem aços microligados com alto nível de controle dos parâmetros fundamentais durante todo o processo de fabricação [13] e são constituídos por um grupo específico de aços com composição química e outras características especiais para alcançar valores elevados de propriedades mecânicas.

3. Radiografia Digital com detector plano

Depois de anos de desenvolvimentos para que as soluções digitais apresentassem uma excelente sensibilidade com a segurança da inviolabilidade, os sistemas de radiografias digitais atuais oferecem a possibilidade de obtenção de imagens que detectam descontinuidades menores com exigências de exposição muito menos rigorosas do que os sistemas convencionais. As variações das espessuras da peça ou do tempo de exposição provocam normalmente radiografias escuras ou claras, que são facilmente melhoradas com as técnicas digitais. As vantagens destes sistemas de radiografias digitais são as seguintes: exibição da imagem em tempo real, redução das doses recebidas, modo de aquisição, processamento e melhoria da imagem, avaliação parcial ou totalmente automatizada, possibilidade de armazenamento e recuperação da imagem [14]. Com o uso do detector plano toda a operação é simplificada, desde a eliminação do manuseio do filme na área de radiação, obtenção da imagem, até o tempo de integração, avaliação e arquivamento de cada imagem. O esquema da radiografia digital utilizando detector plano para a avaliação das amostras preparadas para este estudo pode ser observado na Figura 2.

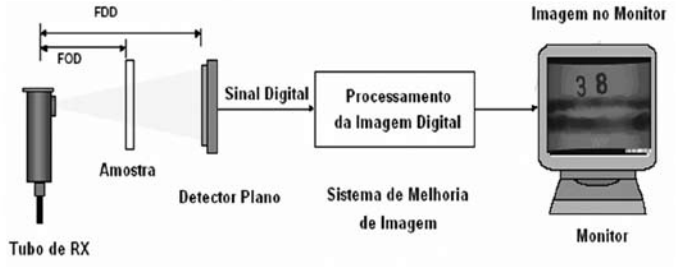


Figura 2. Radiografia direta digital [15].

Na Figura 3, podem-se observar os detalhes de funcionamento do detector digital plano, que consiste de milhões de pixels sensíveis a luz e que é distribuída em uma matriz de diodos em uma grade retangular.

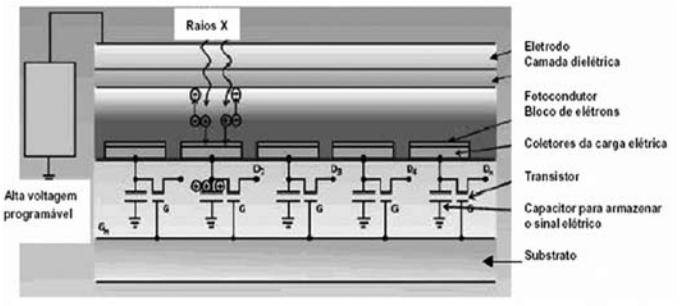


Figura 3. Esquema do detector digital plano [16].

4. Materiais e técnicas utilizadas

Para o desenvolvimento deste trabalho, foram utilizados corpos-de-prova de tubos fabricados nas espessuras de 0,500" (12,7 mm) e 1,000" (25,4 mm) conforme a especificação API 5L Edição 2004 grau X70. Observam-se na Tabela 1 os valores especificados para este grau de material, para o metal base. Na Tabela 2 são apresentados os resultados encontrados das análises químicas dos tubos, metal base. Estas análises foram realizadas de acordo com o método indicado na norma ASTM A 751 [17].

Tabela 1. Composição química especificada para o tubo API 5L – Metal base.

Material	%	C	Mn	P	S	Ti	Nb+V+Ti	CE
API 5L X70	**Max**	0,22	1,65	0,025	0,015	0,06	0,15	0,25

Tabela 2. Análise química dos tubos.

Material	Dimensões	%	C	Mn	P	S	Ti	Nb+V+Ti	CE
API 5L X70	**32"x 0,500"**	**x**	0,09	1,62	0,021	0,001	0,019	0,103	0,20
	48" x 1,000"	**x**	0,10	1,61	0,016	0,004	0,014	0,100	0,20

4.1 Preparações das amostras

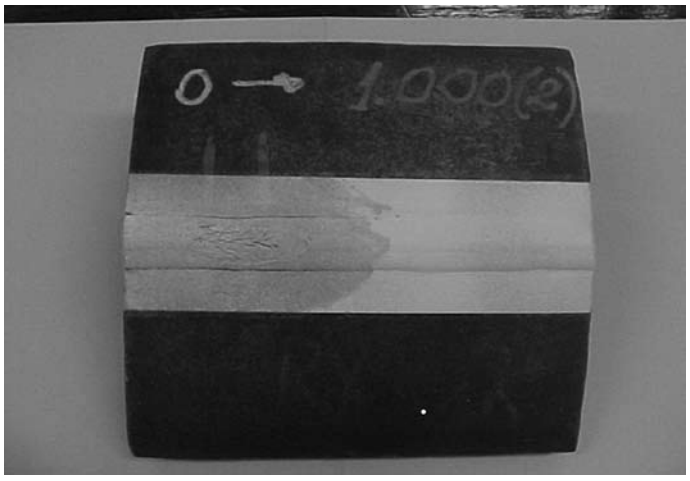
Foram retiradas 06 amostras nas dimensões aproximadas de 250 x 250 mm da região soldada longitudinalmente por arco submerso (SAW), de tubos com os diâmetros externos de 32" (813 mm) e 48" (1219 mm) , nas espessuras nominais de 0,500" (12,7 mm) e 1,000" (25,4 mm) respectivamente. Após o corte, foram criadas nas amostras regiões com grupos de trincas. Em seguida, estas regiões foram inspecionadas por partículas magnéticas e posteriormente radiografadas com a técnica convencional utilizando filmes radiográficos, conforme é mostrado na Figura 4.

4.2 Técnicas utilizadas

Nesse trabalho, foram avaliadas e comparadas duas técnicas radiográficas. Na técnica convencional, atualmente empregada, utilizaram-se filmes radiográficos industriais. Na técnica digital utilizou-se um detector plano. Os testes foram realizados com a técnica de Parede Simples – Vista Simples.

4.2.1 Técnica convencional

Para avaliação da técnica convencional foram radiografadas as seis amostras, utilizando-se quatro tipos de filmes da Classe I, conforme ASTM E 1815, como mostrado na Tabela 3. Todos os trabalhos envolvendo a execução dos ensaios, o processamento dos filmes e as avaliações foram realizados na unidade da **Tenaris**Confab.



(a)

(b)

Figura 4. (a) Corpo-de-prova – 1,000” (25,4 mm). (b) Região de trincas detectadas por PM.

Tabela 3. Filmes utilizados.

Marca	Modelo	CLASSE ASTM E 1815-96	Velocidade	Contraste	Grão
Kodak Industrex	T200	I	Média	Alto	Muito Fino
Kodak Industrex	MX125	I	Baixa	Alto	Muito Fino
AGFA	D4	I	Baixa	Muito Alto	Extra Fino
AGFA	D5	I	Média	Alto	Muito fino

Os filmes utilizados, com as dimensões de 17” x 3,5” (430 x 89 mm), foram expostos obedecendo às instruções dos fabricantes e objetivando o menor tempo de exposição, observando-se que os valores da densidade ótica final das radiografias, nas regiões com reforço e nas áreas esmerilhadas, estivessem entre 2,0 a 3,5 H&D, simulando os parâmetros utilizados nas linhas de produção. Estes parâmetros de exposições médios utilizados como corrente, tensão, tempo e distância foco-filme estão indicados na Tabela 4. Para assegurar a adequada avaliação das radiografias, em todas as etapas deste trabalho foram utilizados profissionais com experiência, qualificados e certificados conforme as normas ISO 9712 e EN 473.

Tabela 4. Parâmetros médios utilizados das exposições.

Corpo de prova (in)	Corrente (mA)	Tensão (kV)	Tempo (s)	Distância foco filme (mm)
0,500	13	201	12	700
1,000	13	218	60	700

“Para execução das radiografias convencionais, foram utilizados os equipamentos e acessórios descritos a seguir:

- Equipamento de raios-X marca YXLON International, modelo MG 325, potencial constante com ampola Y.TU 320D03 e foco com dimensão de 5,5 mm, conforme EN 12543 [18].
- Ecran de chumbo, com espessura de 0.027 mm.
- IQI de arame conforme DIN 54 109.
- Processadora Kodak X-OMAT B.
- Densitômetro AGFA Gevaert D102.
- Negatoscópio BRASREMKO AT II ”.

4.2.2 Técnica digital

“Para execução das radiografias digitais, foram utilizados os equipamentos e acessórios descritos a seguir:

- Equipamento de raios-X marca YXLON International, modelo MG 165, potencial constante com ampola Y.TU 160D05 e foco com dimensão de 1,0 mm conforme EN 12543.
- Detector Plano Y. Panel XRD 0820.
- Sistema de Imagem 3500FR – YXLON.
- IQI de arame conforme DIN 54 109.
- IQI de Arame Duplo conforme BS EN 462-5 [19] - Resolução Espacial”.

Para os experimentos propostos, foi utilizado um detector plano fabricado pela PerkinElmer, modelo XRD 0820 NA (Figura 5), nas dimensões de 8” x 8” (203 mm x 203 mm), que é baseado em sensores de silício amorfo, com mais de 1 milhão de pixels e com tamanho do pixel de 200 μm.

Figura 5. Detector plano XRD 0820 NA.

A informação é digitalizada em até 16 bits (65.536 níveis de cinza), de forma a obter a mais alta faixa dinâmica e contraste, gerando uma imagem de ultra-alta sensibilidade. O tempo de integração da imagem pode ser variado de 133 μs a 5 segundos, em intervalos de 1 μs.

Na Tabela 5 são apresentados os parâmetros utilizados para execução do ensaio radiográfico digital para as espessuras envolvidas. Para a espessura de 0,500" (12,7 mm), a integração foi de 200 telas e o tempo de integração por tela foi de 0,2 segundos. Para a espessura de 1,000" (25,4 mm), visando a redução do nível de ruído, a integração foi de 100 telas e o tempo de integração por tela foi de 1 segundo. Os tempos de processamento resultantes foram de 40 e 60 segundos, respectivamente.

Tabela 5. Parâmetros utilizados na técnica digital.

AMOSTRA	1,000"	0,500"
Distância Detector Foco (DFD), mm	550	550
Distância Foco Objeto (DFO), mm	400	400
Tamanho focal (EN 12543), mm	1,0	1,0
Ampliação	1,4	1,4
Voltagem, kV.	160	160
Corrente, mA	6,25	6,25
Integração, segundos.	100	200
Tempo de integração por tela, segundos	1,0	0,2

Além de um profissional especialista em aplicações das radiografias digitais, para assegurar a adequada avaliação das imagens e uma padronização com a técnica convencional, em todas as etapas do trabalho foram utilizados profissionais experientes e devidamente qualificados e certificados conforme as normas ISO 9712 e EN 473.

5. Resultados

Foram analisadas as especificações API 5L e ISO 3183 no que tange a aceitabilidade do uso da radiografia digital para substituir a técnica convencional, que atualmente emprega filme radiográfico. Estas especificações aceitam outro meio de imagem, desde que a sensibilidade conseguida seja equivalente à obtida com o uso dos filmes radiográficos. A seguir, são apresentados os resultados obtidos a partir dos experimentos realizados, comparando-se a técnica digital com a técnica convencional.

5.1 Experimento 1 – Espessura de 1,000" (25,4 mm)

5.1.1 Técnica convencional

Na Figura 6 é apresentada a radiografia devidamente escaneada do filme AGFA D4, referente ao corpo-de-prova de espessura de 1,000" (25,4 mm). Observou-se no momento da avaliação da radiografia no negatoscópio que a sensibilidade obtida para a técnica convencional, medida por meio do Indicador da Qualidade de Imagem de arame, foi o arame 12 (W12). Na região delimitada pelo retângulo pode-se observar ainda a existência de um grupo de trincas.

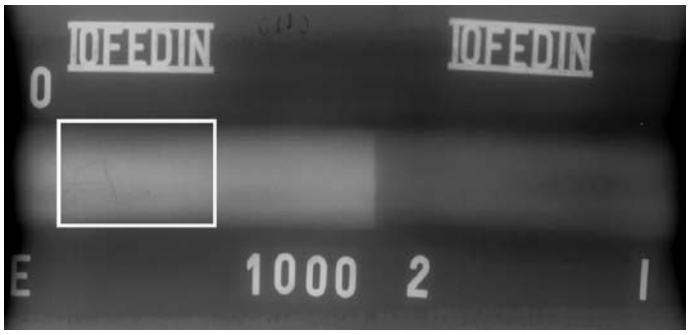


Figura 6. Imagem radiográfica obtida com a técnica radiográfica convencional, indicando a região contendo um grupo de trincas e a imagem do IQI, indicando uma sensibilidade radiográfica W12.

Na Figura 7 pode-se observar uma ampliação da região contendo trincas ramificadas, delimitada pelo retângulo da Figura 6.

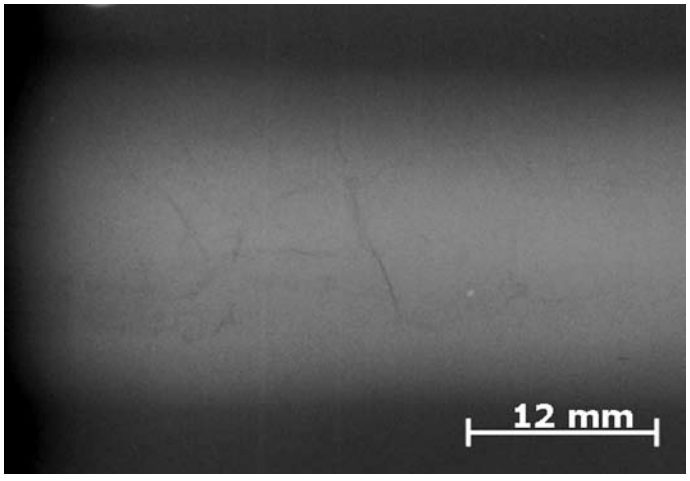


Figura 7. Imagem radiográfica ampliada da região contendo trincas, indicada na Figura 6.

5.1.2 Técnica digital

Na Figura 8 é apresentada a imagem radiográfica do corpo-de-prova de 1,000" (25,4 mm), obtida utilizando-se a técnica digital. Observou-se, durante a avaliação da imagem digital, que a sensibilidade obtida, também medida por meio do Indicador de Qualidade de Imagem de arame, foi o arame 13 (W13). Na região delimitada pelo retângulo podem ser observadas as trincas ramificadas.

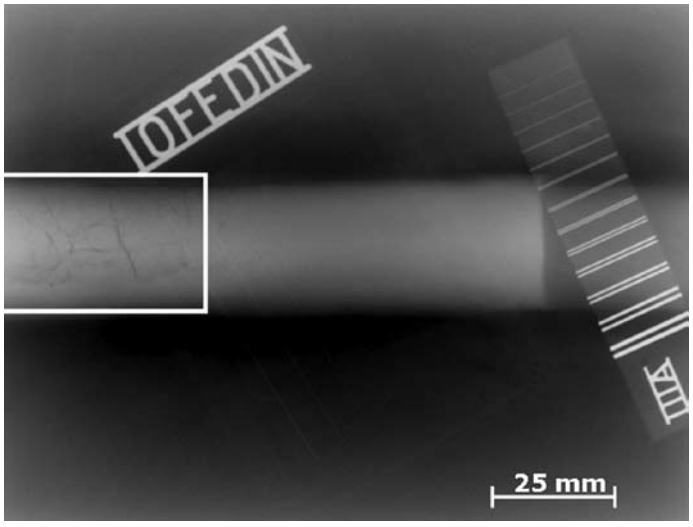


Figura 8. Imagem radiográfica obtida com a técnica radiográfica digital, indicando a região contendo as trincas ramificadas e a imagem do IQI, indicando uma sensibilidade radiográfica W13.

Na Figura 9 é apresentado o resultado da utilização do filtro passa alto 17x17p, podendo-se observar com mais detalhes a região das trincas ramificadas, e os indicadores de qualidade de imagem de arame simples e duplo.

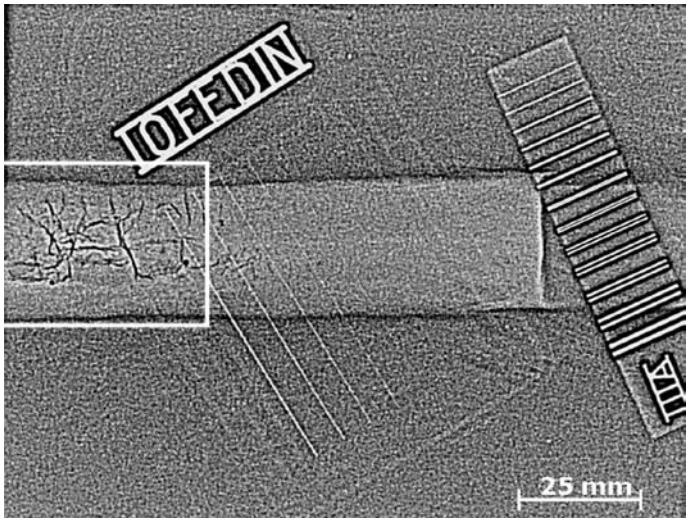


Figura 9. Imagem radiográfica apresentada na Figura 8, com o uso do filtro passa alto 17 x 17p.
A sensibilidade radiográfica obtida foi W13.

Na Figura 10, pode-se observar uma ampliação da região delimitada pelo retângulo na Figura 8, contendo as trincas ramificadas. Observando-se a escala utilizada, é possível estimar o tamanho e formato das trincas detectadas.

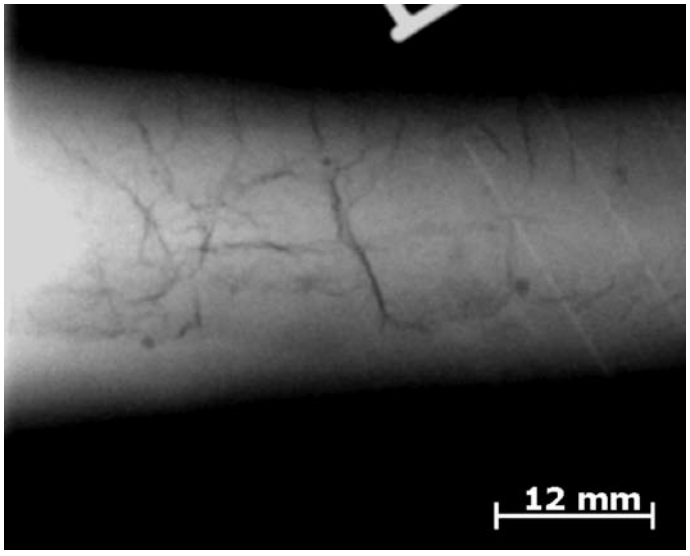


Figura 10. Imagem radiográfica ampliada da região contendo trincas ramificadas, indicada na Figura 8, obtida pela técnica digital.

Na Figura 11, pode-se observar a mesma região apresentada na Figura 10. Com base na escala utilizada e com o uso do filtro passa alto 17x17p, é possível estimar com um nível maior de detalhes o tamanho das trincas detectadas.

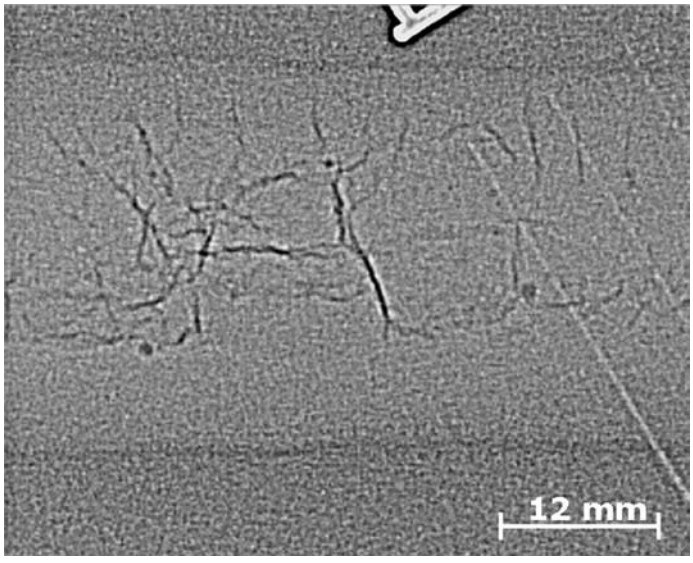


Figura 11. Imagem radiográfica apresentada na Figura 10, com o uso do filtro passa alto 17 x 17p.
A sensibilidade radiográfica obtida foi W13.

Em termos da sensibilidade radiográfica determinada pelo Indicador de Qualidade de Imagem de arames utilizado, comparando-se os resultados obtidos na técnica convencional e as imagens da técnica digital, observa-se que a sensibilidade conseguida na técnica digital (W13), foi superior à obtida pela técnica convencional (W12). A sensibilidade obtida para a técnica digital com a utilização do filtro passa alto 17x17p (W13) também foi superior à obtida pela técnica convencional. Em termos de sensibilidade para detectar pequenos defeitos, quando são comparadas as radiografias obtidas na técnica convencional e as imagens obtidas na técnica digital, mostradas nas Figuras 7, 10 e 11, pode-se concluir que a capacidade para a percepção de pequenas trincas é maior na técnica digital que na técnica convencional. Na Figura 10, podem-se observar regiões de trincas com menores dimensões que as observadas na Figura 7. Quando se observa a Figura 11 nota-se que, com a aplicação do filtro passa alto 17x17p, a sensibilidade para a detecção de pequenas trincas é aumentada consideravelmente.

5.2 Experimento 2 – Espessura de 0,500” (12,7 mm)

5.2.1 Técnica convencional

Na Figura 12 é apresentada a cópia digitalizada do filme AGFA D4, referente ao corpo-de-prova de espessura de 0,500” (12,7 mm). Durante a avaliação da radiografia no negatoscópio, verificou-se que a sensibilidade conseguida medida por meio do Indicador de Qualidade de Imagem de arame para a técnica convencional foi o arame 13 (W13). Na região delimitada pelo retângulo, pode-se observar a existência de um grupo de trincas.

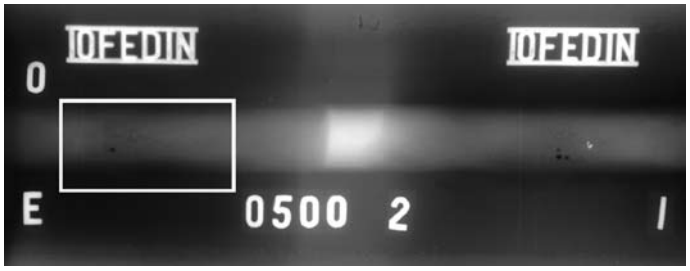


Figura 12. Imagem radiográfica obtida com a técnica radiográfica convencional, indicando a região delimitada pelo retângulo, contendo um grupo de trincas e a imagem do IQI, indicando uma sensibilidade radiográfica W13.

Na Figura 13, pode-se observar uma ampliação da região contendo trincas ramificadas, delimitada pelo retângulo da Figura 12.

5.2.2 Técnica digital

Na Figura 14 é apresentada a imagem radiográfica do corpo-de-prova de 0,500” (12,7 mm), obtida utilizando-se a técnica digital. Observou-se, durante a avaliação da imagem digital que a sensibilidade obtida, medida por meio do Indicador de

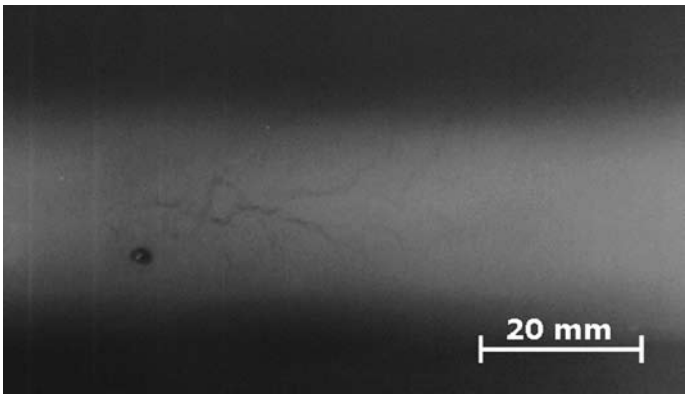


Figura 13. Imagem radiográfica ampliada da região contendo trincas ramificadas, indicada na Figura 12.

Qualidade de Imagem de arame foi o arame 15 (W15). Na região delimitada pelo retângulo podem ser observadas trincas ramificadas e o cordão de solda.

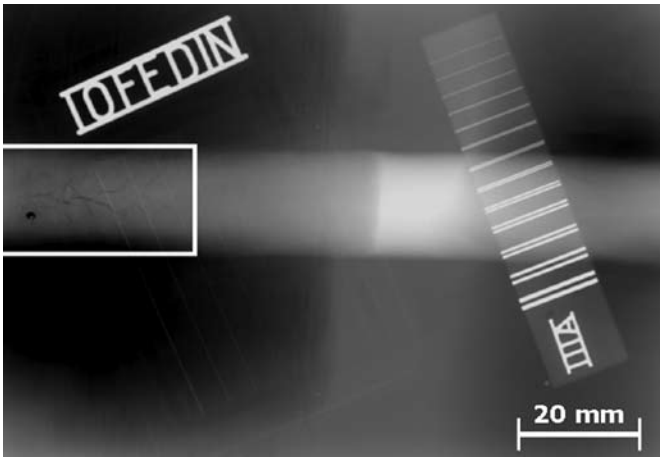


Figura 14. Imagem radiográfica obtida com a técnica radiográfica digital, indicando a região contendo as trincas ramificadas e a imagem do IQI, indicando uma sensibilidade radiográfica W15.

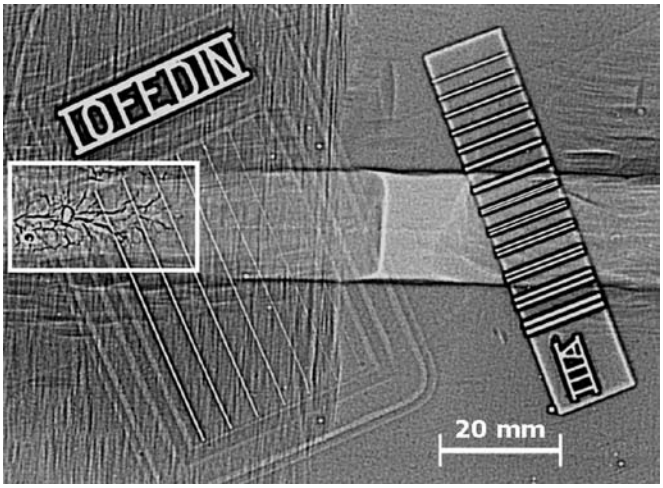


Figura 15. Imagem radiográfica apresentada na Figura 14, após o uso do filtro passa alto 17 x 17p.
A sensibilidade radiográfica obtida foi W16.

Na Figura 15 é apresentado o resultado da utilização do filtro passa alto 17x17p, podendo-se observar com mais detalhes a região das trincas ramificadas, e os indicadores de qualidade de imagem de arame simples e duplo. Durante a avaliação da imagem digital que a sensibilidade conseguida por meio do Indicador de Qualidade de Imagem de arame foi o arame 16 (W16).

Na Figura 16, pode-se observar uma ampliação da região delimitada pelo retângulo na Figura 14, contendo as trincas ramificadas no cordão de solda. Observando-se a escala utilizada, é possível estimar o tamanho e formato das trincas detectadas.

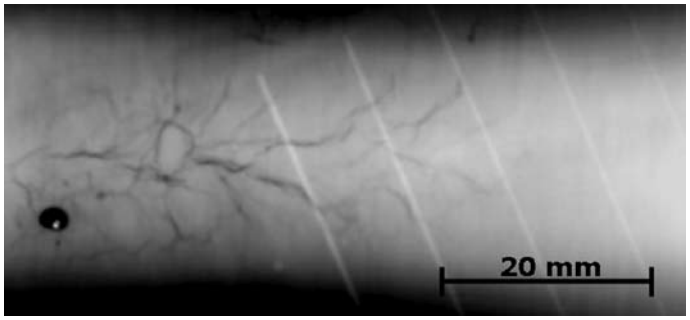


Figura 16. Detalhe da região mostrada na Figura 14 (Trincas).

Na Figura 17, pode-se observar a mesma região apresentada na Figura 10, após o uso do filtro passa alto 17 x 17p. ampliada das trincas ramificadas no cordão de solda que é indicada pelo retângulo da Figura 15. Com base na escala utilizada e com o uso do filtro passa alto 17x17p, é possível estimar com mais detalhes o tamanho e formato das trincas detectadas.

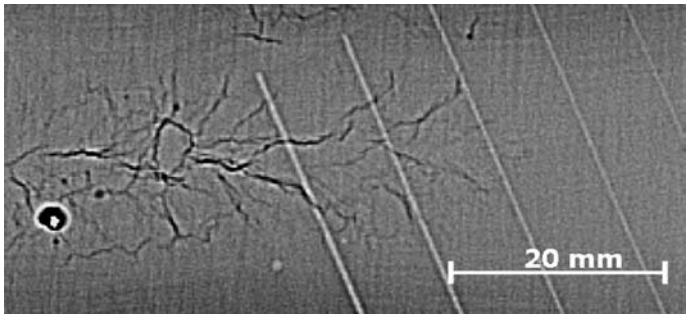


Figura 17. Imagem radiográfica apresentada na Figura 16, após o uso do filtro passa alto 17 x 17p.

Em termos da sensibilidade radiográfica determinada pelo Indicador de Qualidade de Imagem de arames utilizado, comparando-se os resultados obtidos na técnica convencional e as imagens da técnica digital, observa-se que a sensibilidade conseguida na técnica digital (W15) foi superior à obtida pela técnica convencional (W13). A sensibilidade obtida para a técnica digital com a utilização do filtro passa alto 17x17p (W16) também foi superior à obtida pela técnica convencional (W13). Em termos de sensibilidade para detectar pequenos defeitos, quando são comparadas as radiografias utilizadas na técnica convencional e as imagens obtidas na técnica digital, mostradas nas Figuras 13, 16 e 17, pode-se concluir que a capacidade para a percepção de pequenas trincas é maior na técnica digital que na técnica convencional. Na Figura 16, podem-se observar regiões de trincas com menores dimensões que as observadas na Figura 13. Quando se observa a Figura 17, nota-se que, com a aplicação do filtro passa alto 17x17p, a sensibilidade para a detecção de pequenas trincas é aumentada consideravelmente.

5.3 Avaliação da sensibilidade - IQI de arame

A sensibilidade radiográfica, determinada pelo uso de indicadores da qualidade da imagem de arames, corresponde ao arame de menor diâmetro que pode ser visualizado como imagem radiográfica em uma radiografia. No caso dos indicadores da qualidade da imagem de arames utilizados neste estudo, especificados de acordo com a norma DIN 54109, quanto maior o número que designa um determinado arame do indicador, menor o seu diâmetro.

Na Tabela 6 são apresentados os resultados obtidos nos experimentos realizados. Na coluna 1 são indicadas as espessuras dos corpos-de-prova utilizados nos experimentos. Na coluna 2 são especificados os arames do indicador da qualidade da imagem utilizado nos experimentos que devem ser visualizados na imagem radiográfica, para cada uma das espessuras examinadas, exigidos pelas especificações API 5L Edição 2004 e ISO 3183 Edição 2007. Na coluna 3 são apresentados os resultados obtidos para a sensibilidade radiográfica utilizando-se a radiografia convencional. Nas colunas 4 e 5 são apresentados os resultados obtidos para a sensibilidade radiográfica utilizando-se a radiografia digital com a imagem normal e com a aplicação de filtro 17x17p.

Os resultados obtidos com o uso da técnica digital, em termos de sensibilidade, são na sua totalidade melhores que os obtidos com o uso da técnica convencional. Pode-se notar também que uma melhoria expressiva, em termos do arame de menor visualizado, foi obtida para a espessura de 0,500" (12,7 mm), com o uso do filtro passa alto 17x17p.

Tabela 6. Exigências e resultados obtidos com método convencional e digital.

Espessura do	**Arame no Indicador de Qualidade da Imagem**			
Corpo de prova	**Exigido**	**Filme**	**Radiografia Digital**	**Radiografia Digital**
(in)			**(Normal)**	**(Filtro Passa Alto)**
1,000	W10	W12	W13	W13
0,500	W12	W13	W15	W16

O uso da radiografia digital possibilitou um aumento significativo da sensibilidade radiográfica, determinada pelo uso de indicadores da qualidade da imagem de arames, nas

radiografias obtidas dos corpos-de-prova examinados. Este efeito pode ser verificado pela análise do gráfico apresentado na Figura 18, onde a sensibilidade radiográfica, determinada pelo arame de menor diâmetro que pode ser visualizado nas radiografias realizadas, é apresentada por cada uma das técnicas utilizadas e para cada uma das espessuras dos corpos-de-prova usados nos experimentos.

Como quanto menor o diâmetro do arame visível maior a sensibilidade radiográfica obtida, observa-se que para a espessura de 1,000" (25,4 mm) foi obtida uma melhoria da sensibilidade radiográfica com o uso da técnica digital, demonstrada pela visualização, na radiografia, do arame com diâmetro de 250 µm utilizando-se a técnica convencional e do arame com diâmetro de 200 µm utilizando-se a técnica digital. Para a espessura de 0,500" 12,7 mm), estes valores foram de de 200 µm para a técnica convencional e de 100 µm para a técnica digital.

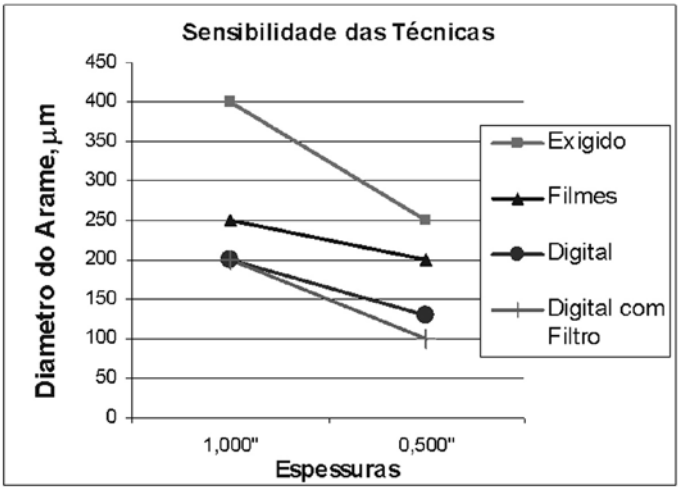


Figura 18. Sensibilidade radiográfica apresentada pelas diferentes técnicas radiográficas estudadas.

6. Conclusões

Pelos resultados apresentados pode-se concluir que a técnica da radiografia digital direta foi mais sensível que a técnica convencional, tanto em termos do menor arame visível dos indicadores da qualidade da imagem quanto na detecção de pequenos defeitos reais, existentes nas soldas. Assim, como é previsto pelas especificações API 5L Edição 2004 e ISO 3183 Edição 2007, o uso da radiografia digital utilizando o detector plano pode ser empregado diretamente nas linhas de fabricação de tubos do segmento de petróleo e gás, com vantagens sobre a técnica convencional. Portanto, o uso da técnica digital apresentou um avanço de qualidade no ensaio radiográfico que é atualmente empregado, além de um alto grau de automação, que irá melhorar a produtividade, segurança, armazenamento das imagens e os fatores relacionados ao meio ambiente.

7. Agradecimentos

Os autores agradecem a empresa Yxlon International pela execução dos testes, bem como aos responsáveis pelo programa de mestrado da Universidade de Taubaté e a Universidade Estadual Paulista – UNESP da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá. Finalmente, agradecem à **Tenaris** Confab pelo apoio em termos de recursos técnicos e financeiros para que este trabalho pudesse ser realizado.

8. Referências bibliográficas

[1] MOREIRA, E.V.; SIMÕES, H.; CAMPINHO, H.; RABELLO, J.; CAMARGO, J.; Radiografia digital, O uso de detectores planos para a inspeção de soldas de oleodutos e gasodutos, 9ª COTEQ e XXV Congresso Nacional de Ensaios de Ensaios Não Destrutivos e Inspeção, Salvador, Bahia, Brasil, Junho 2007.

[2] BAVENDIEK, K.; HEIKE, U.; MEADLE, W.; ZSCHERPEL, U.; EWERT, U. New digital radiography procedure exceeds film sensitivity considerably in aerospace applications, ECNDT, Berlin, 2006.

[3] AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. API 5L: Specification for Line Pipe. Forthy Edition, March 2004. 155p.

[4] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, ISO 3183, Petroleum and gas industries – Steel pipes for pipelines transportation systems, March 2007. 143 p.

[5] MOREIRA,E.V.; SIMÕES, H.R.; FRITZ, M.C.; RABELLO, J.M.; CAMARGO, J.; Flat-panel detectors are accepted for digital radiography in place of conventional radiography in pipeline weld inspection, IV Conferência Panamericana de END, Buenos Aires, Outubro 2007.

[6] RABELLO, J.M.; CAMPINHO, H.S.; IGUSHI, E.T.; MOREIRA, E.V.; CAMARGO, J.R.; Utilização da técnica de radiografia computadorizada na inspeção de soldas circunferenciais na técnica de parede dupla – vista simples, IV Conferência Panamericana de END, Buenos Aires, Outubro 2007.

[7] EWERT, U.; ZSCHERPEL, U.; BAVENDIEK, K; Strategies for film replacement in radiography – A comparative study, IV Conferência Panamericana de END, Buenos Aires, Outubro 2007.

[8] MANGO, S.; How to evaluate the radiographic performance and long term stability of a computed radiography system, IV Conferência Panamericana de END, Buenos Aires, Outubro 2007.

[9] DIAMOND, A. Stationary & portable use of a-Si Flat panels in NDT industries, http://www.ndt.net. The NDT Database & Journal, ISSN: 1435-4934, ECNDT November 2006.

[10] BAVENDIEK, K. Film, CR and Flat Panel Detectors, BAM, Berlin, April 2006.

[11] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, ASTM E 1815, Classification of film systems for industrial Radiography, 2006. 6 p.

[12] DEUTSCHE INSTITUTE FOR NORMALIZATION, DIN 54109, Non-Destructive testing - Image quality of radiographs. Image quality classes for iron material, 1989. 8 p.

[13] ROZA, J.; Desenvolvimento de tubos de alta resistência com espessura de 19,05 mm, 61º Congresso Anual da ABM, Rio de Janeiro, Julho 2006.

[14] ROCHA,J.; Microdetectores de silício baseado em cintiladores para radiografia digital, Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, 2003.
[15] ANDREUCCI, R. Radiologia Industrial, 6ª Edição, Julho 2003.
[16] BAVENDIEK, K. Flat panel detector – Calibration for a high SNR, BAM, Berlin, April 2005.
[17] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, ASTM A-751, Standard test methods, practices, and terminology for chemical analysis of steel products, 2001.5 p.
[18] EUROPEAN STANDARD, EN 12543, Nondestructive testing – characteristics of focal spots in industrial X-ray systems for use in nondestructive testing – Part 1 Scanning method, 1999. 12 p.
[19] BRITSH STANDARD, BS EN-462-5, Non-destructive testing – Image quality of radiographs Part 5 Image quality indicators (duplex wire type), determination of image unsharpness value, 1996. 10 p.