

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA METALÚRGICA E MATERIAIS

Tese de Mestrado

Desenvolvimento da aplicação da Radioscopia em Ensaios Não Destrutivos



Trabalho realizado por: Paulo Salvador Pereira

Orientador: Eng.º Acácio Lima

Data: 30 de Junho de 2009

Local: FEUP - Porto

<i>CANDIDATO</i>	Paulo Salvador Pereira		<i>Código</i>	040508032
<i>TÍTULO</i>	Desenvolvimento da Aplicação da Radioscopia em Ensaios Não Destrutivos			
<i>DATA</i>	23 de Julho de 2009			
<i>LOCAL</i>	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto - Sala C-603 - 10.00h			
<i>JÚRI</i>	<i>Presidente</i>	Professor Doutor Henrique Manuel Cunha Martins dos Santos	DEMM/FEUP	
	<i>Arguente</i>	Professor Doutor Altino de Jesus Roque Loureiro	DEM/FCTUC	
	<i>Orientador</i>	Engenheiro António Acácio Couto Jorge Lima	DEMM/FEUP	

A mente que se abre a uma nova ideia,
jamais volta ao seu tamanho original.

Albert Einstein

Agradecimentos

Dedico este espaço a todos aqueles que de uma forma ou de outra contribuíram para a realização deste trabalho. A todos eles, o meu sincero obrigado, e em particular:

Ao Eng.º Acácio Lima, orientador desta tese, que apoiou a realização da mesma desde o primeiro momento, com sugestões, correcções e críticas, que contribuíram de forma preponderante para o resultado final desta tese.

À Ana Brandão, pelo apoio desde o primeiro momento em que entrei na empresa e por ter proporcionado uma fácil integração no decorrer deste trabalho.

Ao Fernando Quintela, pela infinita paciência, pela partilha de conhecimentos, e pela ajuda na interpretação das radiografias, que possibilitou a realização desta tese.

Ao Bruno Moreira pela ajuda preciosa na realização dos ensaios, na adaptação aos equipamentos, e pela amizade demonstrada no decorrer deste trabalho.

Ao Eng.º Flávio Silva, pela colaboração na realização dos ensaios, pelo apoio e amizade, e pelas discussões construtivas e estimulantes, que muito contribuíram para este trabalho.

A todos os colaboradores da Ajorgelima lda, por facilitarem a integração na empresa, pela disponibilidade demonstrada em todos os momentos, e pelos momentos de enriquecimento profissional, e mais importante, pessoal, que todos proporcionaram.

Um agradecimento especial aos meus pais, a quem tudo devo, pelo incondicional apoio, pela motivação, e pelo carinho, que sempre me transmitiram e continuam a transmitir, na busca dos meus objectivos e metas.

Por último, mas não menos importante, à minha namorada, Ana Santos, pela compreensão e pelo apoio demonstrado, mesmo nos momentos mais difíceis, em que o cansaço e a falta de paciência se denotaram.

Resumo

Este trabalho tem como objectivo principal a avaliação da qualidade radiográfica obtida por radioscopia em comparação com a radiografia de filme. Tal estudo vem suportar uma maior aplicação desta técnica na indústria dos ensaios não destrutivos. A obtenção de valores de qualidade radiográfica semelhantes à radiografia de filme é uma prova inequívoca da aplicabilidade deste processo que apresenta diversas vantagens em relação ao tradicional filme. Os dados obtidos comprovaram um contraste radiográfico semelhante ao filme, para diversos materiais, e diversas espessuras. Estudou-se ainda a resolução espacial básica e a penumbra, que apresentam melhores valores na radiografia convencional, para baixas espessuras de material, dada a limitação de resolução do detector, ou seja, o tamanho de pixel. Para espessuras maiores, a penumbra já é semelhante à radiografia de filme. A qualidade radiográfica obtida para a radioscopia cumpre as normas existentes e aplicáveis nestes ensaios, tornando-a deste modo um possível substituto do filme convencional em determinadas aplicações.

Palavras-chave: Radioscopia, Radiografia digital, Indicadores de qualidade de imagem, Detectores de área plana, Detectores de silício Amorfo.

Abstract

This work has as a primary goal the evaluation of the radiographic quality obtained by radioscopy compared to conventional radiography. This study supports a bigger application of this technique in non destructive testing industry. The quality obtained with this technique is similar to the one obtained with film, supporting its applicability, while presenting other advantages in relation to the film. The data obtained during this work shows similar radiographic contrast in several materials as well as several thicknesses. The basic spatial resolution and umbra obtained are better in conventional film, to small thicknesses, due to the detector pixel size which limits the resolution. When using bigger thicknesses the umbra on radioscopy is similar to the film. The radiographic quality obtained is within the limits of the applicable standards to this test, which enables it to replace the conventional film in certain applications.

Keywords: Radioscopy, digital radiography, image quality indicators, Flat Panel detectors, Amorphous Silicon detectors.

Índice

Agradecimentos	iii
Resumo	iv
Abstract	iv
1 Introdução	1
1.1 Nota Histórica	1
1.2 Radiação electromagnética.....	3
1.3 Radiografia.....	4
1.4 State-of-the-Art	5
2 Fontes de Radiação Ionizante	9
2.1 Raios X.....	10
3 Interacção da Radiação com Matéria	11
4 Detectores de radiação	14
4.1 Detectores analógicos	15
4.2 Detectores digitais.....	17
4.2.1 Detectores de área Plana.....	18
4.2.1.1 Método directo	19
4.2.1.2 Método Indirecto	20
5 Indicadores de Qualidade de Imagem - IQI's.....	22
5.1 Indicador de Fios - NP EN 462-1.....	22
5.2 Indicador de fios duplos - NP EN 462-5	24
6 Ensaio Práticos	25
6.1 Motivação	25
6.2 Procedimento Experimental.....	25
6.2.1 Radioscopia com fonte pulsada.....	26
6.2.2 Radioscopia com fonte continua.....	26
6.2.3 Radiografia com filme convencional	27
6.3 Provetes de teste	28
6.4 Dados obtidos.....	29
7 Análise de Resultados	33
7.1 Comparação entre a qualidade radiográfica obtida por diferentes técnicas, para diferentes materiais.	33
7.2 Influência da espessura na qualidade radiográfica obtida	40
7.3 Tempos de exposição.....	42
8 Conclusões	45
9 Bibliografia	47

1 Introdução

1.1 Nota Histórica

A descoberta dos Raios X remonta a 1895 pelas mãos de Wilhem Roentgen, quando no decorrer dos seus estudos sobre a radiação emitida pelo cátodo de um tubo de “Crookes”, notou que o painel contendo uma tinta fluorescente e que estava afastado cerca de um metro do tubo, brilhou ligeiramente. O tubo de Crookes utilizado estava coberto por um cartão negro, para que não houvesse influência da radiação visível no painel, e Roentgen, rapidamente, descobriu que a radiação “invisível” atravessava o cartão e mesmo alguns livros que possuía na sua secretária, fazendo cintilar o painel fluorescente. A primeira radiografia “médica” foi efectuada por Roentgen, em 22 de Dezembro de 1895, à mão da sua esposa, figura 1. Esta imagem despertou diversos cientistas e os primeiros estudos efectuados rapidamente revelaram a elevada importância desta radiação, que era capaz de atravessar corpos que a luz visível não atravessava. Desde logo as aplicações médicas começaram a surgir, pois os raios x permitiam, de uma forma não evasiva, observar o interior do corpo humano, em especial o esqueleto que possuía uma densidade muito distinta dos restantes tecidos orgânicos (SHULL, 2002).



Figura 1 - Primeira radiografia, realizada por Roentgen à mão da sua esposa, e que despertou a comunidade científica para a importância da radiação X.

A descoberta foi de tal forma considerada importante, que despertou não só a comunidade científica, mas também a população geral, o que, num curto espaço de tempo, fez com que os raios X se tornassem uma moda, que rapidamente se propagou a áreas que nada tinham a ver com aplicações médicas, com a promessa de ser a maior revolução do século. Exemplos disso foram sapatarias que recorreram a equipamentos de raio x para determinar o tamanho do sapato do cliente, cigarrilhas de material radioactivo, para se poder inalar fumo radioactivo, água que havia estado em contacto com isótopos radioactivos, entre outras tantas aplicações, todas elas alegando benefícios para a saúde, que mais tarde se vieram a comprovar letais ou muito prejudiciais para os utilizadores (SHULL, 2002).

Só em 1904, com a morte do assistente de Thomas Edison, devido a envenenamento por radiação, é que a comunidade científica despertou para a necessidade de uma utilização racional e mais cuidada da radiação X. Estudos, desenvolvidos a partir desse momento, vieram provar que a exposição excessiva a essa radiação podia estar na origem de problemas de saúde muito severos, ou mesmo causar a morte. No entanto, desde que utilizados com as devidas precauções, abriam a porta a um mundo novo completamente por explorar no campo da medicina e também no da indústria.

Na altura do seu surgimento, acreditava-se que a radiação X podia curar todo e qualquer tipo de doença, embora, na prática, se tenha provado que na maioria dos casos esta radiação era extremamente prejudicial. Existem raras excepções, como por exemplo o cancro do peito, que foi a primeira doença curada através da radiação x, e a qual, em alguns casos, ainda hoje recorre a esta técnica.

Os ensaios radiográficos surgiram pela primeira vez na indústria em 1920, altura em que foram utilizados para detectar fissuras e porosidades em materiais, bem como defeitos internos. A evolução e aplicação destes ensaios na indústria acompanhou de perto os desenvolvimentos nas áreas médicas, que tem sido os principais impulsionadores da utilização dos Raios X.

1.2 Radiação electromagnética

Os raios x e gama são uma radiação electromagnética, figura 2, de natureza igual à da radiação visível, ultravioleta ou de rádio, embora com um comprimento de onda e frequência distintas das restantes radiações que fazem parte do espectro electromagnético, figura 3.

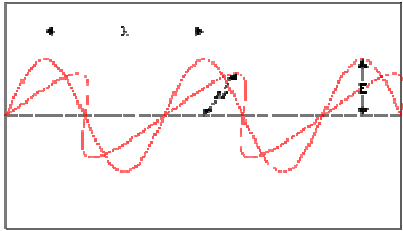


Figura 2 - Onda electromagnética

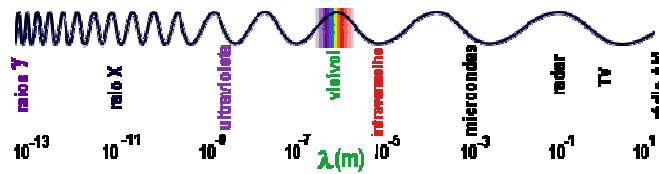


Figura 3 - Espectro electromagnético

A radiação X possui um comprimento de onda extremamente pequeno que se encontra fora do espectro visível, pelo que não se consegue ver. É possível relacionar o comprimento de onda (λ) com a frequência (ν) por meio da equação,

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \quad (1.1)$$

Dado que o seu comprimento de onda é muito pequeno, a sua energia (E) é muito mais elevada que a radiação do espectro visível, daí o facto de ter um poder de penetração na matéria, muito superior. É possível relacionar a energia com a constante de Planck (h), cujo valor é de $6,63 \times 10^{-34}$ Js, por meio da seguinte expressão,

$$E = h\nu \quad (1.2)$$

A energia dos raios x é geralmente medida em electrão-Volt ($1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$), que corresponde à energia adquirida por um electrão quando este é acelerado por um potencial de um Volt.

Em radiografia, as energias utilizadas situam-se na faixa dos 10 KeV e 100 KeV.

Sendo uma radiação muito energética, implica também cuidados adicionais com questões de segurança, em particular com a exposição de seres vivos a esta radiação.

1.3 Radiografia

O princípio de funcionamento da radiografia assenta na absorção diferencial que a radiação sofre ao atravessar um dado material. Isto é, desde que a radiação deixa a fonte emissora, vai sendo atenuada à medida que atravessa o meio. Cada meio tem uma absorção característica, directamente proporcional à sua densidade, e dado que a absorção se baseia em probabilidades de choques entre as partículas elementares do meio atravessado, esta aumenta exponencialmente com a espessura do meio que a radiação teve de atravessar. No entanto este assunto será abordado com mais detalhe no capítulo 3. Podemos ver na figura 4, uma curva que representa a atenuação linear de um dado material. Importa referir os factores que influenciam a absorção da radiação, entre eles:

- A energia inicial dos fotões;
- A espessura de material a atravessar;
- Densidade do material;
- Número Atómico.

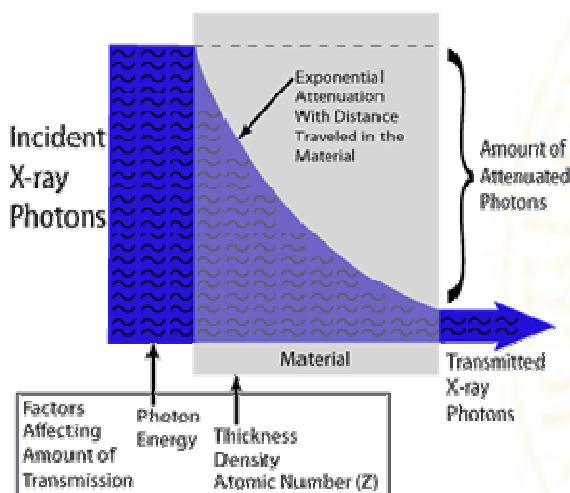


Figura 4 - Esquema representando a atenuação linear que a radiação sofre ao atravessar um dado material. A curva representa a lei exponencial de Lambert-Beer que rege a atenuação que os fotões sofrem ao atravessar a matéria.

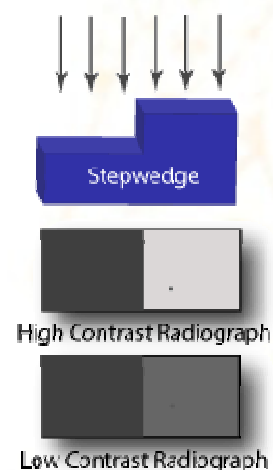


Figura 5 - diferença no contraste obtida por diferenças nas espessuras. O contraste pode variar de intensidade dependendo da energia da radiação incidente.

É possível relacionar esses elementos por meio da Lei de Lambert-Beer,

$$I = I_0 e^{-\mu X} \quad (1.3)$$

que envolve a intensidade inicial do feixe (I_0), com o coeficiente de absorção linear (μ), característico de cada material e energia dos fotões utilizados, bem como a espessura atravessada (X).

1.4 State-of-the-Art

O state-of-the-art em termos de radiografia pode ser avaliado pela utilização da mesma em áreas e sectores tipicamente exigentes e que requerem as melhores técnicas, com vista à obtenção de melhores qualidades, mais dados e maior resolução. Uma área caracteristicamente exigente é a Indústria Aeronáutica e Aeroespacial. Neste campo, os esforços têm sido elevados no sentido de introduzir melhorias. A conversão para a Radioscopia é um dos primeiros passos, à medida que se vão conseguindo obter resultados qualitativos equivalentes à radiografia convencional de filme. A redução de custos devido a menores tempos de exposição, armazenamento e a eliminação da etapa de processamento químico (DIAMOND, 2006), bem como os problemas de tratamento dos resíduos, criados por esta última etapa, são factores que reduzem fortemente o custo associado a cada ensaio radiográfico.

Tabela 1 - Comparativo do custo total (€) entre as três técnicas radiográficas mais comuns (BOIY, 2006), a radiografia computadorizada (RC), radioscopia (RD) e radiografia de filme.

Item	ANÁLISE DE CUSTOS Filme - RC - RD		
	Filme	RC	RD
Recursos Necessários	1,8	1,0	0,9
Equipamento	1,8	1,2	0,9
Equipamento para Análise	2,0	1,0	1,0
Custos por exposição	8,6	3,8	3,3

A análise de custos que podemos ver na tabela 1, retirada de bibliografia citada anteriormente, pressupõe ainda um consumo anual de 67200 filmes, o que se reflecte numa poupança anual de 61% (352806 €) quando utilizada a radioscopia, em comparação com a radiografia convencional de filme. Este e outros estudos semelhantes têm impulsionado a utilização da radioscopia nas áreas referidas

anteriormente, mas sem nunca ter verdadeiramente explorado os ganhos qualitativos desta técnica. Neste âmbito, estudos realizados recentemente em cooperação com a indústria aeronáutica (BAVENDIEK, et al., 2006), demonstraram que é possível, com recurso à radioscopia, superar consideravelmente a sensibilidade da radiografia de filme. Neste estudo, é possível identificar alterações na espessura do material até um milésimo da espessura total de material atravessado, valor que supera claramente o da radiografia convencional de filme (um centésimo), mesmo com a melhor classe de filmes. Estes valores advêm de uma elevada razão entre o sinal e o ruído obtido com os detectores planos de radioscopia. Nesse mesmo trabalho, é realizado um estudo de probabilidade de detecção de defeitos, utilizando diversas técnicas de radiografia.

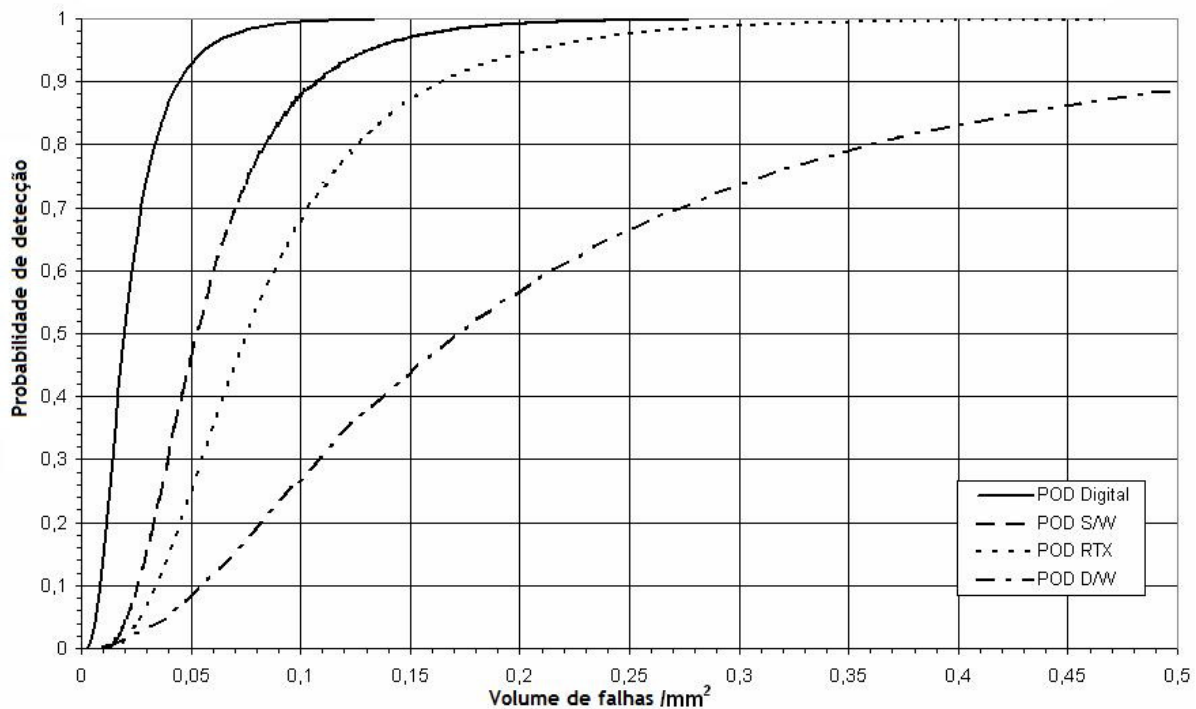


Figura 6 - Estudo comparativo da probabilidade de detecção entre radiografia de dupla parede (D/W), parede simples (S/W), radiografia computadorizada (RTX) e radioscopia (Digital).

Numa amostragem de 648 defeitos, a radioscopia foi capaz de detectar 608 defeitos, que corresponde a cerca de 94% de detecções, devido em grande parte ao elevado contraste, à capacidade de melhorar digitalmente as imagens, e à automatização que o processo permite, garantindo desta forma a reprodutibilidade do mesmo. Já a radiografia convencional, de parede simples, atingiu os 79%, com

509 detecções. Em sectores mais exigentes, este factor tem sido preponderante na adopção deste método para a análise das peças mais críticas e cuja qualidade radiográfica pedida é sempre a melhor possível e existente no mercado.

Outra vertente a considerar é a utilização da radiografia em sectores com elevadas cadências de produção, nos quais não só a qualidade é um requisito, mas também o custo e a velocidade de obtenção dos dados são factores preponderantes na escolha dos equipamentos. Neste âmbito, a indústria automóvel tem necessidade de analisar alguns componentes, críticos para o desempenho do automóvel, a 100%, e em períodos de tempo curto, perfeitamente aceitáveis para a sua cadência de produção. Estudos de inspecção automatizada em peças de fundição de alumínio (MERY, 2007) estão agora a ser implementados nos maiores fabricantes mundiais. O sistema radiográfico utilizado é a radioscopia, com recurso a programas de análise de imagem, desenvolvidos especialmente para cada fabricante. A peça é radiografada, e a imagem digital, obtida instantaneamente, é analisada por zonas de interesse, nas quais se verifica a existência de pixels com valores acima ou abaixo do pré-estipulado para aquela zona de interesse, e que assinala qualquer problema existente na peça. O software, automaticamente, rejeita a peça, retirando-a da linha de produção. Toda esta detecção é feita de forma automática e quase em tempo real, o que permite incrementos de produtividade, e melhoria na segurança dos automóveis, dado que desta forma é possível a inspecção a 100% das peças em alguns casos, superando assim as amostragens anteriormente utilizadas na radiografia convencional de filme.

Existem trabalhos desenvolvidos no âmbito do tratamento de imagem obtida por radioscopia (SILVA ; MERY, 2007) em peças de fundição de alumínio para a industria automóvel, que utilizam complexos algoritmos de tratamento de imagem para analisar a existência de defeitos, assim como a sua classificação. Utilizam-se várias técnicas de análise de imagem, com vista a reduzir o ruído na imagem e a aumentar o contraste entre os defeitos e o resto da peça.

Existem outras áreas de aplicação da radioscopia que tem surgido, como por exemplo, a preservação histórica. Alguns trabalhos (Historic Fort Collins Development Corporation, 2005, JANCAREK, et al., 2007), os quais permitem

análises ao interior das peças históricas ou mesmo estruturas antigas, sem qualquer tipo de dano às mesmas. Um exemplo é a avaliação da corrosão das peças metálicas numa estrutura de madeira antiga, como se pode ver na figura 7 que de seguida se apresenta.

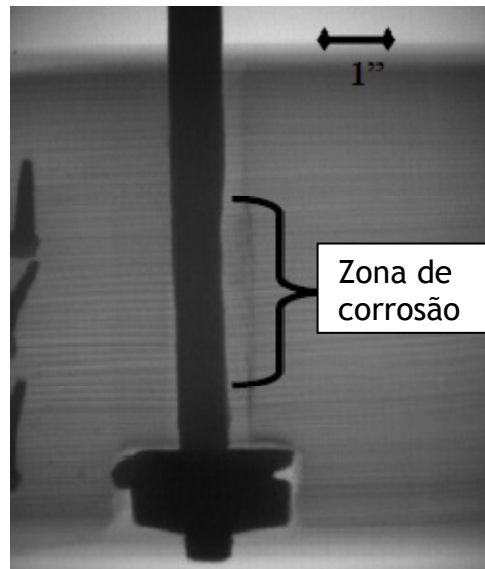


Figura 7 - Corrosão detectada num parafuso de uma estrutura de madeira. Imagem obtida por radioscopia.

Outra aplicação que surgiu recentemente é a utilização destas técnicas para rastreabilidade de obras importantes, cujos defeitos podem ser mapeados por radioscopia. A radioscopia permite ainda a identificação de dados não visíveis à superfície em obras de arte, como por exemplo pinturas recobertas por outras (PINCU, 2008).

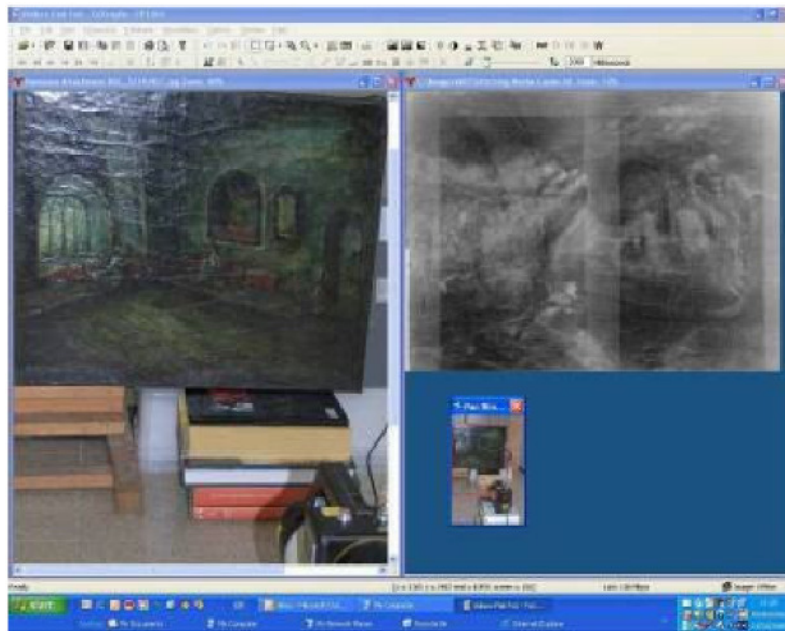


Figura 8 - Exemplo de uma análise por radioscopia a um quadro que possui duas pinturas em que uma delas está oculta.

Novas aplicações da radioscopia, utilizando ecrãs planos de silício amorfo estão a emergir, à medida que novos equipamentos com maior resolução e mais versáteis vão surgindo no mercado. Alguns dos sectores referidos anteriormente (aeronáutica e automóvel), vão rapidamente impulsionar uma utilização mais abrangente desta técnica, dado que, geralmente, são esses sectores que ditam os standards e normas aplicáveis às técnicas de radiologia, e que, neste caso, irão suportar uma maior utilização da radioscopia.

2 Fontes de Radiação Ionizante

A radiação electromagnética utilizada na radiografia, em geral, é produzida por dois tipos de fontes, que produzem dois tipos diferentes de radiação:

- Radiação X proveniente de fontes alimentadas electricamente;
- Radiação Gama proveniente de Isótopos radioactivos.

As fontes alimentadas electricamente são as mais comuns, e são baseadas no princípio de que a incidência de electrões num dado material, faz com que este

emita raios x. No entanto estas serão abordadas com maior detalhe ao longo do capítulo seguinte.

2.1 Raios X

Os raios X, já caracterizados no capítulo 1.2, são produzidos em tubos de Coolidge (ANDREUCCI, 2003, MIX, 2005, RAMOS, 1978, SHULL, 2002). Os tubos de Coolidge, também conhecidos por tubos de raios X, foram sofrendo melhorias desde a sua invenção nos fins do século XIX, mas na sua essência o princípio base mantém-se inalterado, consistindo numa ampola em vácuo, contendo no seu interior um cátodo e um ânodo, figura 9(a).

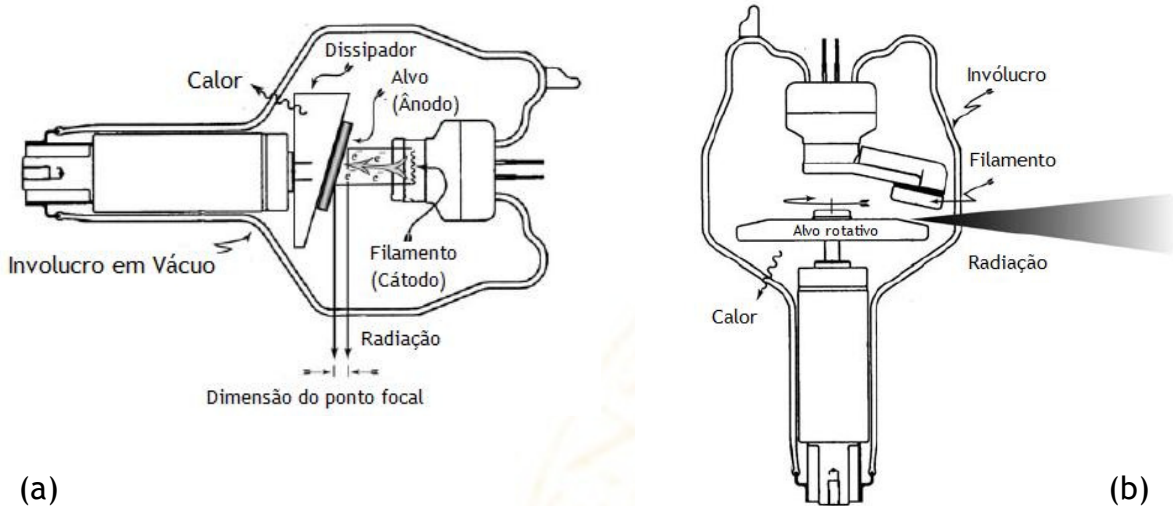


Figura 9 - (a) tubo de raios X convencional. (b) tubo de raios X com alvo rotativo, de forma a melhorar o arrefecimento do alvo.

O cátodo (filamento), de tungsténio, sobre o qual se aplica uma corrente na ordem dos miliamperes, aquece por efeito de joule e começa a emitir electrões. Estes electrões são então acelerados pelo campo eléctrico existente entre o cátodo e o ânodo, da ordem dos kilo-Volts, o qual confere uma energia cinética aos electrões. Quando os referidos electrões chegam ao ânodo, chocam com um alvo (ânodo), geralmente cobre. Ao chocarem com o alvo, a energia cinética é transferida para os átomos do cobre, originando interacções ao nível atómico. Estas interacções, que serão abordadas com maior detalhe no próximo capítulo, libertam radiação X, característica do elemento do alvo.

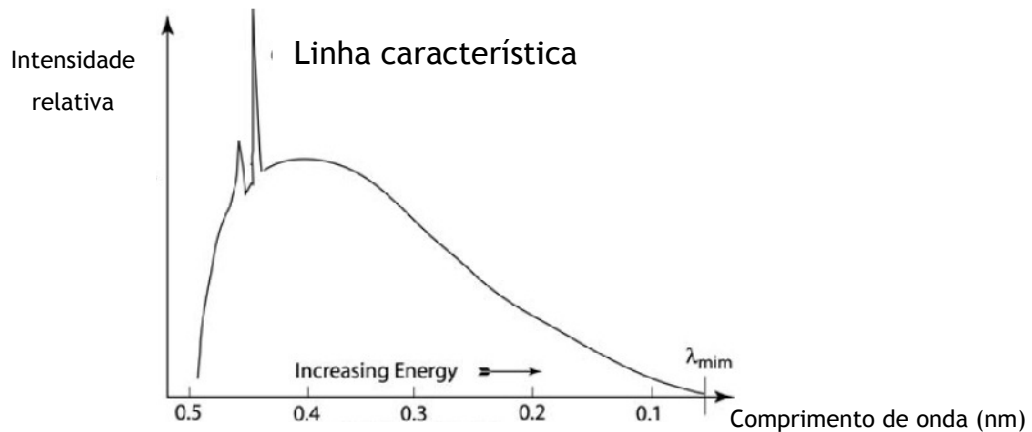


Figura 10 - Curva característica de emissão de uma fonte de raios X.

Esta emissão ocorre sob a forma de um espectro contínuo, como se pode verificar na figura 10. Este espectro é contínuo, devido às diferentes interações que os electrões sofrem no alvo, que criam raios X com diferentes comprimentos de onda, uma vez que as interações a nível atómico não são todas iguais.

Actualmente, existem algumas variantes do tubo de raio X, nomeadamente na âmpola, que, em muito casos já é metálica, substituindo assim as de vidro. Um dos maiores problemas na utilização destas técnicas era o aquecimento do alvo que estava permanentemente a ser bombardeado com electrões. Mesmo sendo de cobre, e com sistemas de arrefecimento ligados directamente ao alvo, o aquecimento continuava a ser demasiado elevado, pelo que surgiram os primeiros tubos de raios X com um alvo rotativo, figura 9(b). Estes tubos permitem assim uma utilização mais contínua, dado que o local de incidência dos electrões está permanentemente a mudar e, conseqüentemente, o aquecimento torna-se menos localizado.

3 Interação da Radiação com Matéria

A radiação electromagnética interage com a matéria, daí ser de extrema importância perceber de que forma se dá esta interacção e quais as suas conseqüências na obtenção de uma imagem radiográfica.

A radiação electromagnética pode interagir com a matéria segundo os seguintes mecanismos (RAMOS, 1978, SHULL, 2002):

- Efeito de Rayleigh
- Efeito de Compton
- Efeito fotoeléctrico
- Formação de Pares
- Foto-desintegração

Todos os mecanismos, acima referenciados, diminuem a quantidade de energia que acaba por chegar ao detector, sendo esta diminuição alcançada pela difracção ou absorção da radiação que parte da fonte.

Efeito de Rayleigh - ocorre quando a reacção entre os fotões e os electrões dos átomos do material é perfeitamente elástica, ou seja, sem haver qualquer perda de energia. Emerge então um fotão de igual energia, mas com direcção diferente do inicial, conforme se pode ver na figura 11(a).

Efeitos de Compton - os fotões de elevada energia interagem com os electrões das camadas superiores e são difractados numa nova direcção, transferindo parte da sua energia para esses electrões. A transferência de energia é directamente proporcional ao ângulo de difracção.

A energia transferida pode ser suficiente para mover electrões para as camadas superiores ou mesmo libertá-los, conforme se pode ver no esquema da figura 11(b)

Efeito fotoeléctrico - quando radiação de baixa energia, interage com os electrões das camadas mais próximas do núcleo pode existir uma transferência total de energia. O efeito fotoeléctrico ocorre, quando a energia transferida é suficiente para ejectar o electrão, figura 11(c).

Dado que o átomo fica com uma lacuna nas camadas mais próximas do núcleo, prontamente, átomos das camadas exteriores cobrem essa lacuna, libertando radiação x, característica do elemento, emitida de forma omnidireccional.

Formação de pares - no caso da energia do fotão ser superior a 1,022 MeV, torna-se possível a produção de pares, pois o fotão quando interage com um átomo produz um electrão e um positrão. Esse electrão e o positrão, eventualmente, irão anular-se com outros pares, libertando dois fotões com metade da energia do fotão inicial. O esquema consta da figura 11(d).

Foto-desintegração - quando se utiliza uma fonte de raios x com mais de 6 MV (fontes Bremsstrahlung) é necessário considerar a ocorrência de interações com os núcleos dos átomos, produzindo neutrões secundários ou mesmo radiação. Este fenómeno é denominado de foto-desintegração e ainda existe a possibilidade de tornar o objecto a analisar, num isótopo radioactivo, pelo que é necessário tomar precauções adicionais.

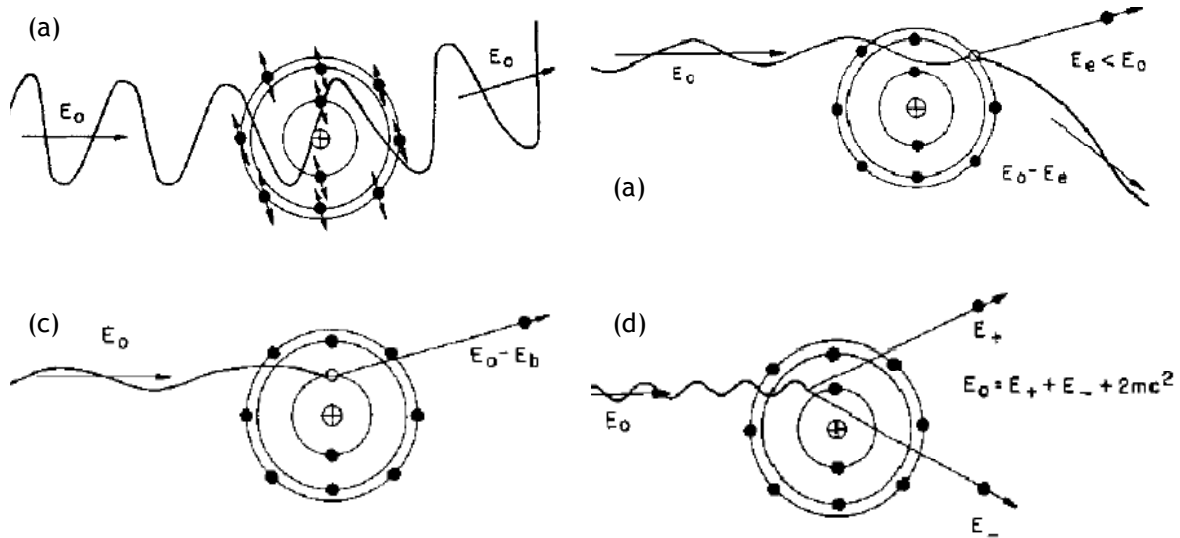


Figura 11 - Modelos de interação de fótons com a matéria. (a) Efeito de Rayleigh. (b) Efeito de Compton. (c) Efeito fotoelétrico. (d) Formação de Pares.

Embora todos estes efeitos possam ocorrer, a incidência dos mesmos está relacionada com os potenciais utilizados na produção dos electrões, segundo o gráfico da figura 12, onde se pode ver claramente que para as potências habitualmente utilizadas, o efeito de Compton é o mais significativo.

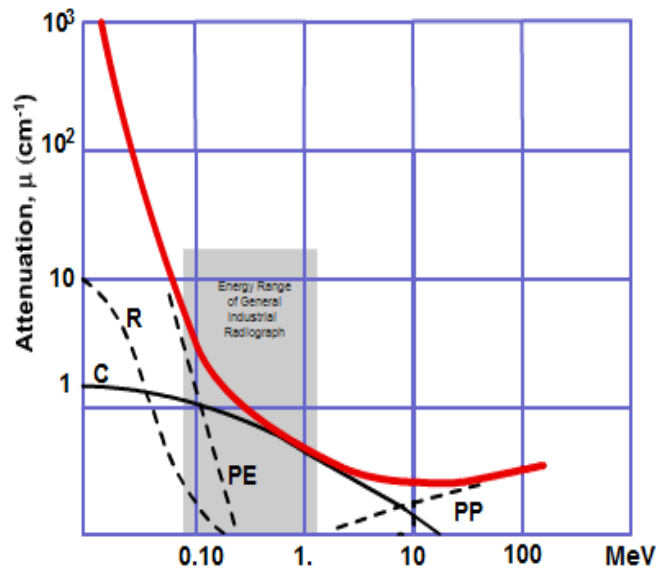


Figura 12 - Interação dos fótons com a matéria (atenuação) em função das potências utilizadas. O efeito de Compton apresenta uma incidência maior que todos os restantes, na gama de valores habitualmente utilizada na radiografia industrial.

4 Detectores de radiação

Os detectores de radiação pretendem transformar o sinal da radiação incidente, ou seja, a sua energia, num formato óptico ou eléctrico, para que possa ser formada uma imagem contendo a informação que a radiação transportou até ao detector. Estes podem ser de dois tipos, analógicos ou digitais, e a diferenciação é feita pelos próprios mecanismos de detecção, que, veremos no decorrer deste trabalho, são perfeitamente distintos.

O sinal obtido pode ser um sinal contínuo ou discreto, conforme se pode ver no esquema da figura 13.

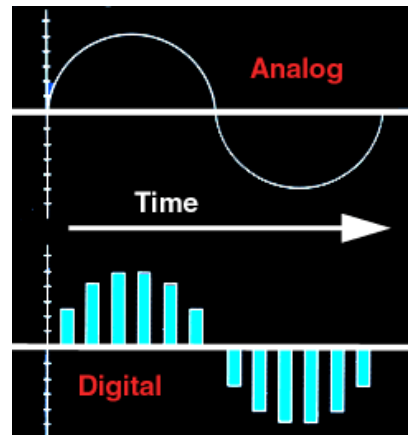


Figura 13 - Comparação entre o sinal analógico e o sinal digital, ao longo do tempo, denotando a curva contínua no analógico e os valores discretos na digital.

4.1 Detectores analógicos

Os detectores analógicos possuem uma gama de detecção (contraste) contínua em resposta à radiação incidente. Isto é, mesmo que o olho humano não tenha capacidade de diferenciação entre os tons de cinzento, os detectores registam essa diferença (que aumenta com a radiação), de forma contínua. O contraste pode variar, conforme se pode ver na figura 5.

O detector analógico, por excelência, é o filme radiográfico, figura 14. Este é constituído por uma emulsão de cristais de halogenetos de prata, coberta em ambas as faces por uma película de poliéster. Os halogenetos ficam sensibilizados quando expostos a radiação, no entanto, importa saber que esta resposta não é linear e que cada filme tem uma curva característica, semelhante à da figura 15. A curva característica de cada filme é calculada experimentalmente e mede a densidade obtida no mesmo, para uma dada exposição. O aumento da densidade não é directamente proporcional à exposição, em particular para baixas exposições, fenómeno que se deve à existência de uma energia de activação que é necessário ultrapassar para que ocorram as reacções de sensibilização dos halogenetos num regime aproximadamente linear. É nesta zona, em que o comportamento do filme se aproxima da linearidade, que se encontram as densidades entre 1,5 e 4 limites geralmente utilizados em radiografia industrial. O filme é posteriormente tratado quimicamente, com o intuito de fixar essa

informação. Estimula-se então a transformação dos halogenetos de prata em prata “negra” (Ag_5SbS_4), mergulhando para isso a película num revelador. Esta transformação é mais favorável nos cristais sensibilizados, pelo que estes são os primeiros a serem transformados. O tempo de reacção deve ser controlado de forma a não transformar a totalidade do filme, para que não se venha a perder a informação. Resulta, como produto final desta técnica, um filme, em que, a escuro, temos as áreas com maior incidência de radiação e, a claro, as menos expostas. Pode ser manuseado, é facilmente transportável, mas não é reutilizável e o seu arquivo no caso de grandes séries, pode constituir um sério problema, dado que estes requerem cuidados específicos, nomeadamente no que respeita ao teor de humidade, que se deve situar entre 30 e 50% na unidade de armazenamento (MIX, 2005).

Esta técnica, com dezenas de anos de implementação, continua a ser a mais utilizada, dado o fácil e rápido posicionamento dos filmes. Existem ainda situações em que é a única possibilidade, devido a restrições físicas impostas pelo próprio objecto a analisar, que, por vezes, não permite o recurso a outras técnicas.

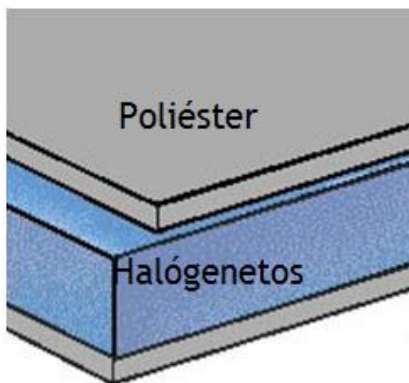


Figura 14 - Filme Radiográfico que consiste de uma camada de gel contendo halogenetos de prata, revestida por duas folhas de poliéster.

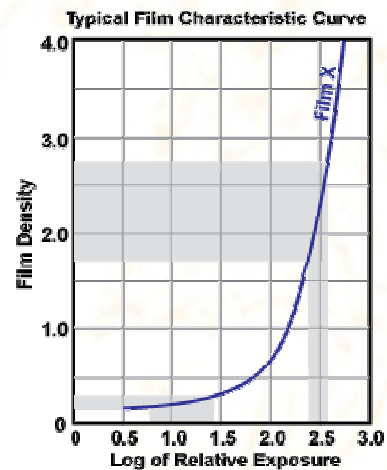


Figura 15 - Curva característica de um filme, em que temos a exposição relativa em função da densidade óptica do filme.

4.2 Detectores digitais

Os detectores digitais convertem a radiação num sinal eléctrico discreto com uma resolução típica (contraste) de 8 a 16 bits. Dado que se trabalha com tons de cinzento, convém introduzir que o olho humano apenas é capaz de detectar até 100 tons de cinzento (Davis, et al., 2000) e que uma resolução de 16 bits corresponde a 65536 tons de cinzento. Logo, quando se utilizam mais bits que os detectados pelo olho humano, é necessário utilizar algoritmos de interpolação, de forma a transcrever um dado tom de cinzento, num outro tom, que possa ser interpretado pelo olho humano. Caso contrário, os dados apenas poderão ser interpretados e diferenciados numericamente.

Convém ainda ressaltar que os detectores podem ser de vários tipos: pontuais, lineares ou de área plana. Embora a fonte emita a radiação sempre sobre a forma de um cone, recorrendo a colimadores, podemos reduzir a radiação a um único feixe, caso se utilizem colimadores de altura e largura do feixe conforme se pode ver na Figura 16(a). Caso se utilize apenas um colimador para limitar a altura, o feixe será plano, mas a projecção será ao longo de uma linha de detectores Figura 16(b). No caso de não se restringir a radiação, teremos uma projecção de uma área plana, proporcional à abertura do colimador ou da distância da fonte ao colimador, antes da peça, conforme se pode ver na Figura 16(c).

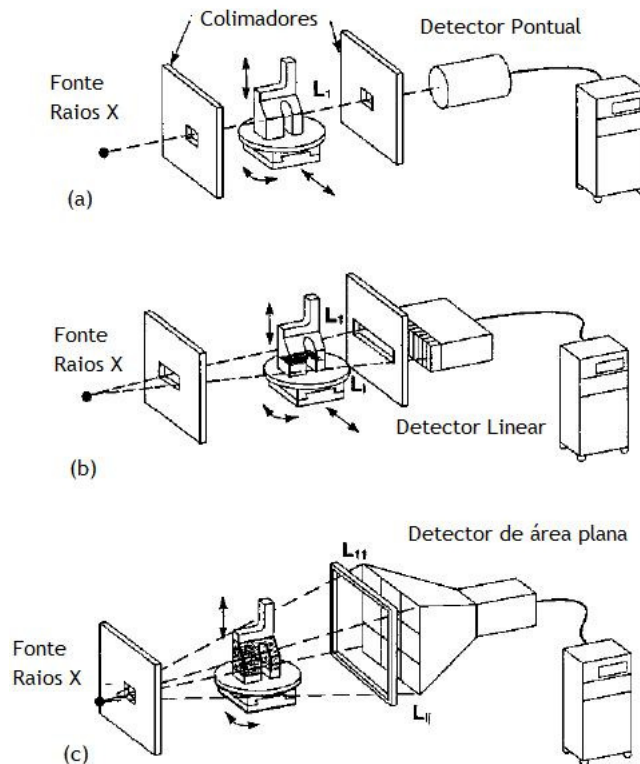


Figura 16 - Diferentes tipos de detectores. (a) Detector pontual. (b) Detector linear. (c) detector de área plana. A radiação é filtrada consoante o tipo de detector. Nos pontuais a radiação é restringida verticalmente e horizontalmente, enquanto nos lineares apenas verticalmente. Na detecção de área plana, a distância entre a fonte e o filtro condiciona a resolução da projecção.

4.2.1 Detectores de área Plana

Os detectores de área plana são, actualmente, os detectores em franco desenvolvimento e expansão, muito devido à expectativa de virem a substituir o convencional filme radiográfico. A construção destes detectores baseia-se na construção de uma malha com pequenos pixels, dispostos em linhas e colunas perfeitamente alinhadas, que permitem a construção de uma área plana.

O elemento base deste tipo de detectores é o pixel e cada um é um detector de radiação pontual, que converte a radiação primária num sinal eléctrico.

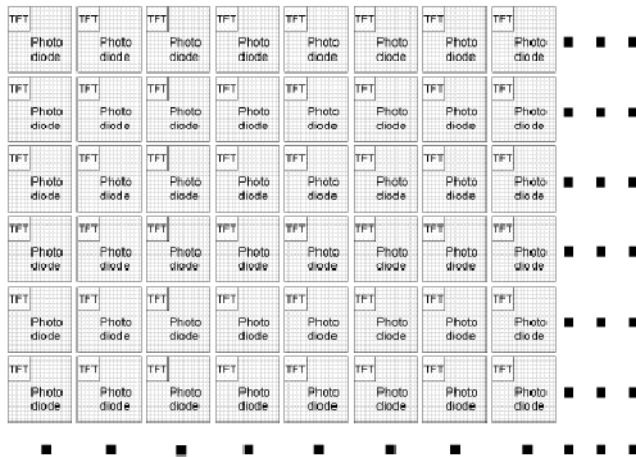


Figura 17 - Malha de pixels.

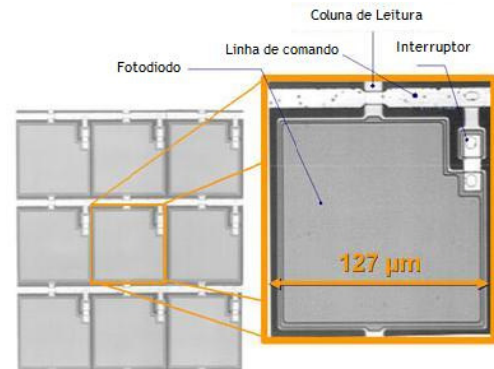


Figura 18 - Constituição de um pixel.

No filme convencional de radiografia, o limitador da resolução era o tamanho de grão. Nos detectores de área plana, o tamanho de pixel é o factor mais preponderante. Este tamanho de pixel, que vem diminuindo à medida que os processos de micro e nano fabricação se vêm desenvolvendo, é variável de fabricante para fabricante, sendo que nos painéis mais recentes à venda no mercado, os valores rondam os 50 μm .

Existem actualmente dois métodos distintos de obtenção de um sinal digital. O primeiro, método directo, consiste na conversão directa do sinal analógico (Raios X ou Gama) em sinais eléctricos. O segundo método, denominado de método indirecto, consiste numa diminuição do comprimento de onda da radiação primária, tornando-a menos energética, e por sua vez, converter essa energia secundária em sinais eléctricos.

4.2.1.1 Método directo

Conforme referido anteriormente, nesta técnica, a radiação primária emitida pela fonte é convertida directamente pelo material semiconductor, geralmente CdTe, CdZnTe ou PbI_2 .

Os painéis fotocondutores são um exemplo desta tecnologia. São constituídos por uma fina camada de selénio amorfo, ligada a condensadores (ROCHA, 2003, SHULL, 2002). A carga eléctrica gerada, aquando da incidência da radiação e interacção

com o selénio, é então armazenada em condensadores, para que mais tarde, se possa ligar um transistor ao mesmo, descarregando-o e medindo a energia armazenada, conforme o esquema da figura 19.

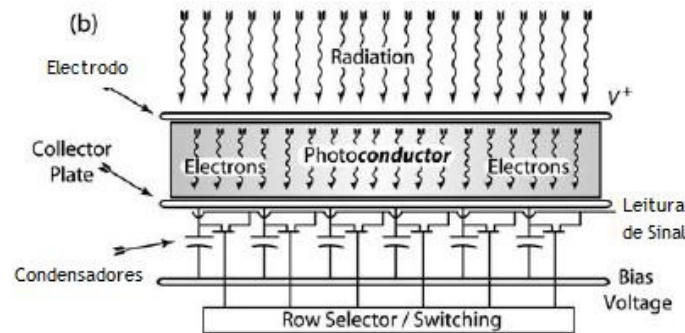


Figura 19 - Esquema de um painel detector, pelo método directo, contendo os fotodetectores baseados num filme de selénio amorfo.

4.2.1.2 Método Indirecto

Este método é talvez o mais comum e consiste num cintilador que converte a radiação em luz visível, seguida de uma camada de colimadores para filtrar o ruído e um fino filme de silício amorfo que, quando excitado por luz visível, emite uma descarga eléctrica que é prontamente lida pelos transistores aos quais está ligado. Esse sinal é imediatamente convertido num formato digital por meio de resistências e capacitadores. Cada uma destas estruturas é denominada de fotodíodo, figura 20. O esquema de funcionamento de um detector indirecto, figura 21, permite ver a disposição dos colimadores, juntamente com os fotodíodos. A existência dos colimadores é essencial, porque a emissão do cintilador ocorre em todas as direcções, pelo que é necessário filtrar os fotões que não são perpendiculares à placa e que iriam induzir falsas informações nos fotodíodos adjacentes.

Os cintiladores são materiais que possuem a propriedade de fluorescência, quando excitados por radiação do espectro dos raios X ou Gama, ou seja, quando estimulados por esta radiação, libertam luz visível. Os cintiladores podem ser de diversos materiais, desde que estes apresentem a propriedade de fluorescência. No entanto, o mais comum neste tipo de aplicação é o silício amorfo (EWERT, 2002, MIX, 2005, ROCHA, 2003).

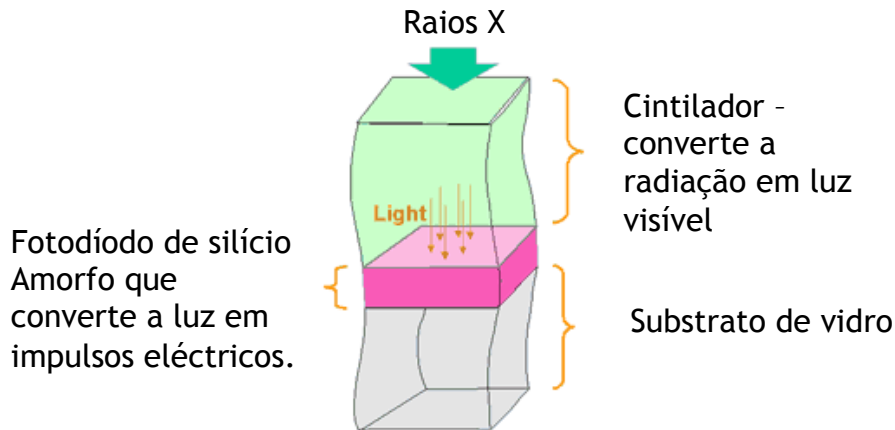


Figura 20 - Esquema de um fotodíodo

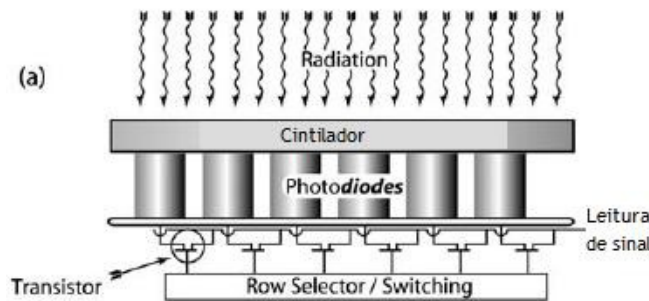


Figura 21 - Esquema de um detector indirecto, onde se pode ver a localização do cintilador, seguido de pequenos fotodíodos contendo um filme de silício amorfo, que por sua vez estão ligados a transístores.

Em ambos os casos, directo e indirecto, o número de pixéis, figura 17, condiciona a resolução espacial do detector. O tamanho do pixel é também limitativo da resolução pontual da imagem e, conseqüentemente, do ruído.

Um pixel de um sistema radiográfico é constituído por um conversor de radiação para corrente eléctrica, um elemento de armazenamento da carga eléctrica, e um transístor. Entre cada pixel existe um espaço morto, geralmente com um tamanho entre 80 e 400 microns (Shull, 2002) e que pode variar de acordo com diferentes fabricantes. No entanto, a tendência é este valor diminuir, fruto das melhorias e avanços na microfabricação e nanofabricação.

A leitura das cargas eléctricas armazenadas em cada pixel é feita de forma sequencial e pode ser feita de forma contínua, sendo que, neste último caso, temos de considerar o tempo que demora uma leitura da área de pixéis. Terminada esta leitura, inicia-se outra, de nova informação ou não, caso tenha havido

alterações da radiação incidente no painel. O número de ciclos de leitura, realizados num dado período de tempo, denomina-se de taxa de actualização e expressa-se em FPS (Leituras completas por segundo).

5 Indicadores de Qualidade de Imagem - IQI's

Os indicadores de qualidade de imagem são ferramentas utilizadas na avaliação da qualidade radiográfica obtida. Existem várias normas de construção dos mesmos, embora muito semelhantes entre si. O fabricante da peça a radiografar deverá definir em projecto qual o IQI aplicável e, em especial, qual a norma. Estes devem ser de um material tão semelhante, quanto possível, ao material radiografado, segundo a norma DIN 54109, e a NP EN 462-1.

Neste trabalho e baseado em estudos similares (BAVENDIEK, et al., 2006, EWERT, et al., 2008, MOREIRA ; FRITZ, 2007, OLIVEIRA ; LOPES, 2007), utilizaram-se dois indicadores de qualidade distintos, os quais apresentamos de seguida.

5.1 Indicador de Fios - NP EN 462-1

O indicador de qualidade de imagem de fios, que se pode ver na figura 22, é talvez o mais comum e utilizado em radiologia. A sua utilização, permite uma avaliação do contraste obtido, e como tal, da qualidade radiográfica obtida. Quanto menor o fio detectado, melhor será a qualidade radiográfica, pois significa que é possível detectar defeitos com menores diferenças de espessuras em relação ao material base.



Figura 22 - IQI de fios segundo a norma NP EN 462-1

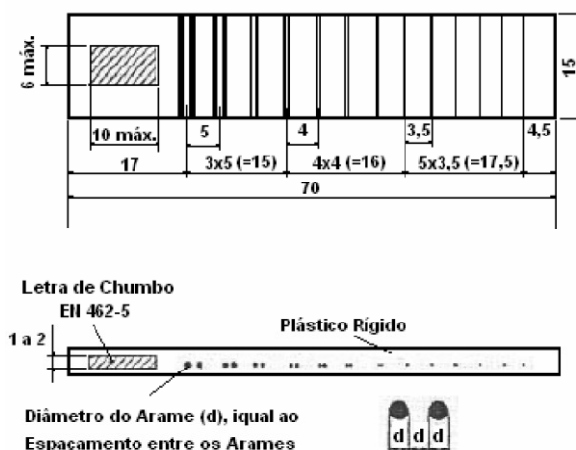


Figura 23 - IQI Duplex segundo a norma NP EN 462-5

Este tipo de IQI existe segundo diferentes normas, nomeadamente a DIN 54109, a BS 3971 e a NP EN 462-1. No decorrer deste trabalho utilizamos este IQI segundo a norma portuguesa, adoptada de um standard europeu e amplamente utilizada em toda a Europa.

O sistema de IQI é baseado em 19 fios, de diâmetros especificados na norma, tabela 2, perfeitamente paralelos entre si e subdivididos em 4 grupos. O primeiro grupo engloba desde o W1 até ao W7, o segundo desde W6 até W12, o terceiro desde o W10 até W16 e, por fim, o quarto, do W13 até ao W19. O primeiro fio de cada grupo identifica o grupo utilizado.

Tabela 2 - Diâmetro dos fios que constituem o IQI de fios, segundo a NP EN 462-1

Número do Fio	Diâmetro Nominal (mm)	Tolerância (mm)
W7	0,800	± 0,02
W8	0,630	
W9	0,500	± 0,01
W10	0,400	
W11	0,320	
W12	0,250	
W13	0,200	
W14	0,160	± 0,005
W15	0,125	
W16	0,100	
W17	0,080	
W18	0,063	
W19	0,050	

O último fio que se consegue detectar, define a qualidade radiográfica, sendo que para ser aceite, tem de ser visível pelo menos 10 mm contínuos do mesmo, na zona de densidade óptica homogénea.

O IQI deve ser posicionado do lado da fonte, com os fios perpendiculares à soldadura, quando aplicável. O material dos fios deverá ser de um material com a absorção mais aproximada do material base, sendo que na norma são contemplados quatro materiais: alumínio, ferro, cobre e titânio.

5.2 Indicador de fios duplos - NP EN 462-5

Este IQI, também designado por duplex, figura 23, está de acordo com a norma ASTM E-2002, e a NP EN 462-5. A interpretação deste padrão foi realizada segundo a norma portuguesa e os dados obtidos permitem a determinação da penumbra, bem como da resolução espacial do detector utilizado. O IQI consiste de 13 pares de fios, cujo diâmetro vai diminuindo. Cada par é formado por dois fios do mesmo diâmetro, com um espaço entre si igual ao diâmetro de um desses fios. Define-se o máximo de detecção como o par, no qual se consegue detectar uma separação entre os dois fios. A penumbra detectada será tanto menor, quanto menor for o ponto focal.

Os valores de penumbra estão sintetizados na tabela 3, bem como o diâmetro de cada fio. A resolução espacial corresponde a metade do valor da penumbra detectada.

Este IQI deve ser utilizado em conjunto com o IQI de fios, e a sua interpretação visual deverá ser efectuada com auxílio de uma lupa, com uma ampliação de quatro vezes.

Tabela 3 - Penumbra, segundo a norma NP EN 462-5

Número do par	Penumbra (mm)	Diâmetro do fio (mm)	Desvio (+/-) (mm)
13D	0,10	0,050	0,006
12D	0,13	0,063	0,006
11D	0,16	0,080	0,006
10D	0,20	0,100	0,006
9D	0,26	0,130	0,006
8D	0,32	0,160	0,01
7D	0,40	0,200	0,01
6D	0,50	0,250	0,01
5D	0,64	0,320	0,01
4D	0,80	0,400	0,01
3D	1,00	0,500	0,02
2D	1,26	0,630	0,02
1D	1,60	0,800	0,02

6 Ensaios Práticos

6.1 Motivação

A radioscopia apresenta-se como uma técnica que, a médio prazo, substituirá a radiografia convencional de filme, dadas as vantagens já referidas acerca da mesma. A realização de um estudo comparativo entre as mais recentes técnicas de radioscopia e a radiografia convencional existente no mercado empresarial, pode servir de base de sustentação para a implementação prática destes ensaios, em particular na área dos ensaios não destrutivos. No âmbito deste trabalho, foram realizadas radiografias, utilizando diferentes materiais (uma única espessura), e diferentes espessuras de um mesmo material (Aço Carbono), as quais foram avaliadas, recorrendo a indicadores de qualidade de imagem normalizados.

6.2 Procedimento Experimental

As técnicas radiográficas utilizadas no decorrer deste trabalho serão agora explicitadas, uma vez que o procedimento experimental varia entre cada uma.

6.2.1 Radioscopia com fonte pulsada

No procedimento de radioscopia com fonte pulsada, o equipamento utilizado da marca Vidisco®, consiste num detector de área plana de silício amorfo, modelo foX-Rayzor, combinado com uma fonte pulsada da Golden Engineering®, modelo XRS-3. Este sistema vem de origem com um software de aquisição de imagem da mesma marca do detector, devidamente configurado para uma utilização com a fonte acima referida. Esta fonte apresenta a particularidade de ser pulsada, daí que a emissão de radiação não seja contínua e sim, separada, por intervalos de sessenta nanossegundos. A fonte emite pulsos a 270kV, com uma corrente constante de 1mA.

Este equipamento e respectivo software são vendidos como uma solução completa, sem possibilidades de alteração de qualquer um dos seus componentes e todo o controlo do ensaio radiográfico, inclusive o controlo da fonte, são realizados a partir do software acima referido.

O ensaio radioscópico foi realizado segundo o esquema da figura 24, em que a distância utilizada entre o ponto focal da fonte e o detector (FDD) foi de 500mm e a distância entre a fonte e o objecto foi a máxima possível, isto é, o provete encostado ao detector, de forma a diminuir o efeito de penumbra.

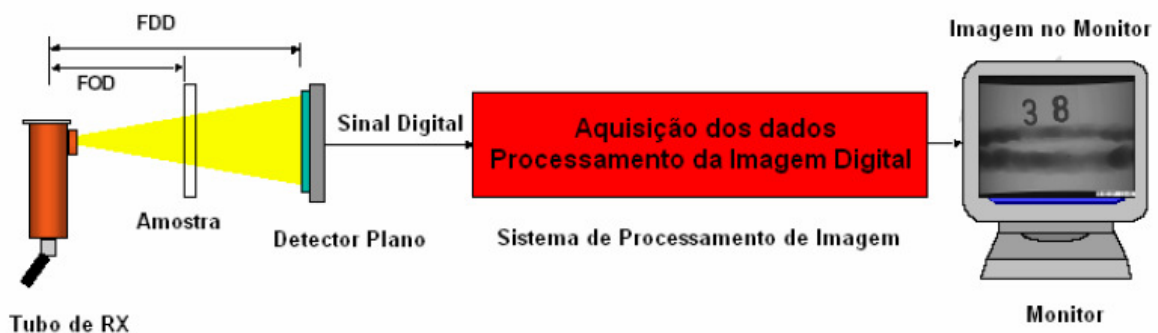


Figura 24 - Esquema de realização de um ensaio radioscópico (ANDREUCCI, 2002).

6.2.2 Radioscopia com fonte contínua

O procedimento de radioscopia com fonte contínua utilizou todo o equipamento referido para a radioscopia com fonte pulsada, à excepção da fonte de raios X, que

foi substituída por uma fonte de emissão contínua da marca Balteau®, modelo Ceram 35.

O ensaio foi realizado segundo o mesmo esquema da figura 24, e a distância utilizada entre o ponto focal da fonte e o detector foi de 700 mm, que é a distância recomendada para a utilização daquela fonte com filme radiográfico convencional. A distância do objecto ao detector foi a mínima possível, pelas mesmas razões já referidas para a radioscopia com fonte pulsada.

Importa aqui referir que, neste procedimento, o controlo da fonte tinha de ser feito de forma manual, dado que o software apenas reconhecia a fonte de origem e não a Balteau utilizada nestes ensaios. A sincronização entre a emissão da fonte e o período em que o detector está activo foi feita manualmente, com recurso a um operador de radiografia, pelo que os tempos programados no equipamento não correspondem aos efectivamente utilizados pelo detector, razão pela qual a sua utilização neste relatório servirá apenas de referência aproximada e não como dados experimentais exactos.

6.2.3 Radiografia com filme convencional

O ensaio radiográfico convencional, foi realizado utilizando a fonte da marca Balteau referenciada na Radioscopia com fonte continua. Os filmes utilizados foram os Strukturix D7, da marca Agfa. Estes filmes possuem um ecrã de chumbo de 0,1 mm em ambas as faces do filme, o qual contribui para uma maior intensificação da imagem. Segundo a norma ISO 11699-1, a classe do filme utilizado foi a T2.

A distância utilizada entre o ponto focal da fonte e o filme foi de 700mm. Os tempos foram calculados em função do ábaco, fornecido pelo fabricante do equipamento, que relaciona as potências com as correntes e os tempos de exposição necessários para a obtenção de filmes com uma densidade óptica de 2,5.

A revelação destes filmes foi feita num equipamento da marca General Electric, modelo Nova, inteiramente automática, com um ciclo de processamento de sete minutos.

Para a visualização das radiografias, utilizou-se um negatoscópio e uma lupa, de forma a retirar a maior informação possível da radiografia obtida.

A posterior digitalização dos filmes foi obtida com o recurso a um scanner Epson, modelo Expression 10000XL, com uma resolução de 600dpi, e 16 bits de tons de cinzento.

6.3 Provetes de teste

Os provetes utilizados, listados na tabela 4, consistem de chapas, contendo soldaduras de topo a topo. A sua espessura foi escolhida, tendo em conta os IQI's disponíveis para cada um desses materiais, tanto na empresa, como no mercado.

No entanto, e tendo este ponto em consideração, foram utilizadas as espessuras mais finas possíveis para os provetes, de modo que os IQI's utilizados se encontrassem perto do limite de resolução do detector digital. Foi também necessária uma conjugação das espessuras utilizadas, com a capacidade dos equipamentos utilizados, dado que as fontes de raios x utilizadas possuem limitações de espessuras diferentes.

Foram também utilizados provetes de diferentes espessuras para um aço carbono, conforme listado na tabela referida anteriormente, de forma a avaliar a influência das espessuras na qualidade radiográfica obtida, bem como a influência que a mesma tem, quando se comparam as diversas técnicas.

Tabela 4 - Lista de provetes utilizados, bem como IQI (segundo a norma NP EN 462-1) utilizado.

Material	Espessura (mm)	IQI NP EN 462-1
Aço Carbono	4	13 FE EN
Aço Carbono	6	13 FE EN
Aço Carbono	8	13 FE EN
Aço Carbono	14	10 FE EN
Aço Carbono	26	6 FE EN
Aço Inoxidável	4	13 FE EN
Aço Inoxidável	6	13 FE EN
Latão	8	10 Cu EN
Alumínio	15	6 AL EN
Titânio	3	10 Ti EN

6.4 Dados obtidos

Neste capítulo serão apresentados os dados obtidos nos ensaios radiográficos realizados no decorrer desta tese. Nestes ensaios pretendíamos obter dados que possibilitassem a comparação da qualidade radiográfica obtida, com diferentes técnicas, para diferentes materiais e diferentes espessuras. Com este intuito, utilizaram-se os Indicadores de qualidade de imagem, segundo a norma NP EN 462-1 e NP EN 462-5, já referidos anteriormente. A disposição dos indicadores foi feita segundo as recomendações das normas já referidas anteriormente, ou seja, com os fios perpendiculares ao cordão de soldadura e, tanto quanto possível, ao centro da radiografia. Todas as radiografias realizadas foram marcadas com as mesmas referências, contendo a identificação do trabalho, o material em ensaio e a técnica utilizada, conforme se pode ver na figura 25.

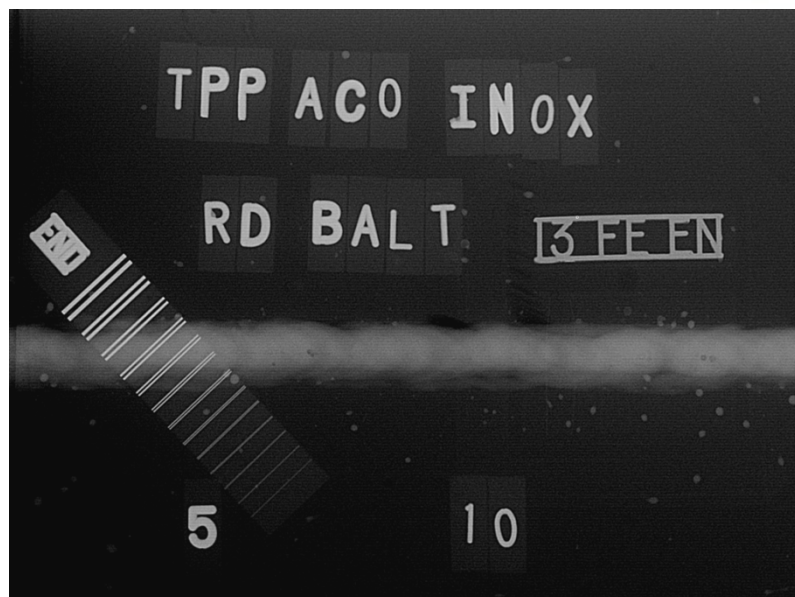


Figura 25 - Radiografia obtida por radioscopia com fonte pulsada.

As imagens obtidas por radioscopia são em tons de cinzento e apresentam 14 bits de resolução, o que corresponde a 16384 tons possíveis. O olho humano consegue distinguir entre 60 a 100 tons de cinzento (BAVENDIEK, et al., 2006), pelo que é necessário o processamento da imagem, para que esta apresente dados passíveis de interpretação por operadores humanos.

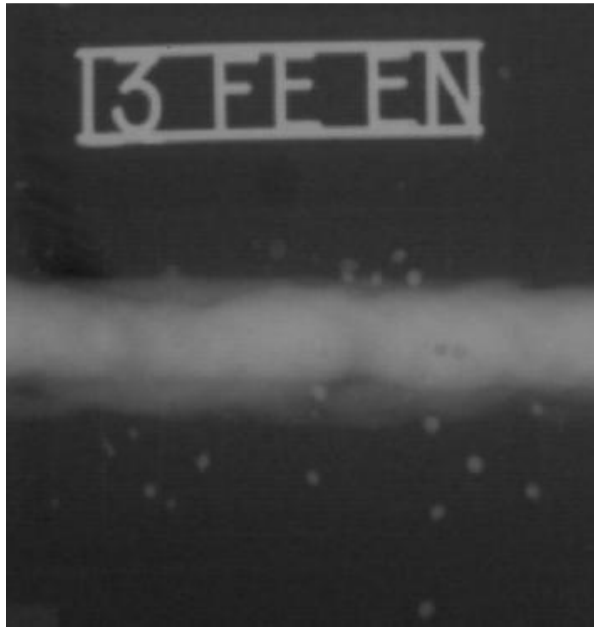


Figura 26 - Provete de Aço Inoxidável de 6mm, sem qualquer tratamento de imagem



Figura 27 - Provete de Aço Inoxidável de 6mm, com tratamento de imagem.

Na figura 26, podemos ver um exemplo de uma radiografia obtida com a radioscopia, em que apenas um dos fios é visível. Já na figura 27, podemos ver a mesma radiografia, tratada digitalmente. O primeiro tratamento consistiu num ajuste dos níveis de cinzento, isto é, eliminando da imagem parte da gama inferior de cinzentos, o que contribui para uma imagem com maior contraste, dado que os tons de cinzento disponíveis passam a ser menos. O segundo tratamento consiste na inserção de um filtro automático denominado “High Pass” que acentua os limites e fronteiras encontradas na imagem, não realizando qualquer alteração nas zonas homogéneas. Este filtro só pode ser aplicado uma vez, dado que a perda de informação numa segunda aplicação do filtro, é demasiado grande, face à informação extra que se obtém. Depois de tratada digitalmente, esta imagem já possibilita o visionamento de três fios. Este ganho de informação a nível da qualidade de imagem tem de ser conjugado com a perda de informação que pode ocorrer no resto da radiografia. Isto é, com a aplicação de mais filtros e alteração dos níveis de cinzento, conseguimos aumentar ainda mais a detecção dos fios do IQI, no entanto perde-se informação que é útil e necessária na radiografia.

Nas radiografias de filme convencional, recorreu-se a filmes da classe T2 segundo a ISSO 11699-1, respeitando as marcações dos provetes referidas anteriormente. Esta categoria de filme, não é a que apresenta uma maior resolução espacial, no entanto, é a mais utilizada industrialmente, por apresentar um bom compromisso entre a resolução espacial (limitada pelo tamanho de grão) e tempos de exposição baixos comparativamente com as categorias, com melhor resolução espacial.

Para garantir uma qualidade radiográfica tão boa quanto possível e a mais homogénea entre todos os provetes de radiografia convencional de filme, procurou-se obter uma densidade óptica de aproximadamente 2,5 na área homogénea dos provetes. No entanto, no cumprimento deste critério e, sabendo que este parâmetro é directamente influenciado pelo tempo de exposição, o qual foi controlado manualmente por meio de ábacos do fabricante do equipamento, foram aceites radiografias que apresentavam uma densidade compreendida entre 2,0 e 3,0. Este limites foram definidos, tendo em consideração que radiografias acima de 3,0 de densidade óptica, dificilmente se conseguem digitalizar, sem que haja perdas elevadas de informação. Este valor foi verificado experimentalmente, realizando a digitalização de uma radiografia de um padrão em escada (com seis degraus), conforme se pode ver na figura 28. O limite de digitalização coincide com o degrau cuja densidade óptica medida na radiografia é de 3,0, conforme se pode ver no esquema da referida figura.

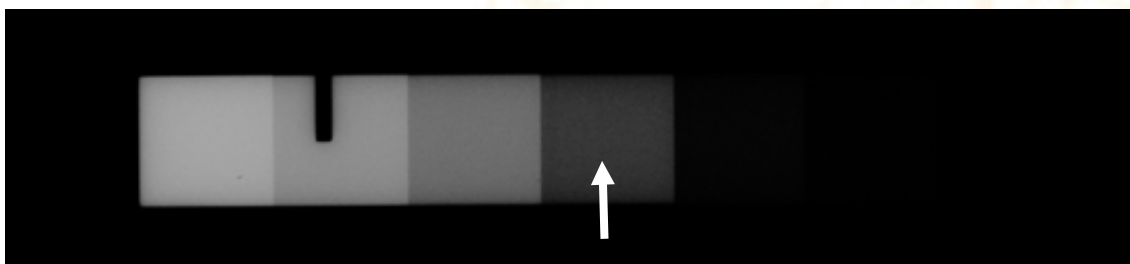


Figura 28 - Radiografia de um padrão em escada, na qual se pode ver assinalado a branco, o degrau que apresentava uma densidade óptica de 3,0.

Radiografias abaixo de 2,0 são difíceis de interpretar, dado o baixo contraste gerado entre os defeitos e as zonas homogéneas, fruto do baixo tempo de exposição.

Na radiografia de filme convencional a densidade óptica é medida por meio de um densitómetro, o qual foi utilizado na obtenção das densidades, referidas já anteriormente para cada provete.

Foram então realizadas radiografias aos provetes, até que as mesmas satisfizessem os critérios de densidade óptica (na técnica de radiografia convencional de filme), sendo de seguida interpretadas, para leitura dos dados fornecidos pelos indicadores de qualidade de imagem, presentes em cada radiografia. Os dados interpretados segundo a norma NP EN 462-1, encontram-se listados na tabela 5, para todas as técnicas. A interpretação dos IQI segundo a NP EN 462-5 está resumida na tabela 6.

Tabela 5 - Menor fio visível nas radiografias realizadas aos provetes definidos no início deste capítulo, segundo a norma NP EN 462-1. Quanto maior a numeração, menor o diâmetro do fio, consequentemente maior a qualidade radiográfica.

	Espessura (mm)	Técnica			
		RD + FP	RD + FC	Filme	Filme Dig.
Aço Carbono	4	W14	W15	W15	W15
Aço Carbono	6	W15	W16	W16	W15
Aço Carbono	8	W14	W15	W15	W14
Aço Carbono	14	W12	W13	W14	W14
Aço Carbono	26	W8	W9	W9	W9
Aço Inoxidável	4	W15	W16	W16	W16
Aço Inoxidável	6	W14	W15	W15	W15
Latão	8	W13	W14	W14	W13
Alumínio	15	W12	W11	W12	W10
Titânio	3	W15	W16	W16	W15

Tabela 6 - Último par resolúvel para os provetes definidos no início deste capítulo, segundo a norma NP EN 462-5. Este par indica a penumbra presente em cada radiografia e permite também a definição da resolução espacial obtida em cada uma delas.

	Espessura (mm)	Técnica			
		RD + FP	RD + FC	Filme	Filme Dig.
Aço Carbono	4	7D	6D	10D	10D
Aço Carbono	6	9D	9D	11D	11D
Aço Carbono	8	9D	8D	11D	11D
Aço Carbono	14	9D	9D	10D	10D
Aço Carbono	26	8D	9D	8D	8D
Aço Inoxidável	4	7D	6D	10D	10D
Aço Inoxidável	6	8D	8D	11D	11D
Latão	8	9D	9D	11D	11D
Alumínio	15	8D	8D	10D	10D
Titânio	3	9D	8D	11D	11D

7 Análise de Resultados

Neste capítulo, iremos efectuar uma análise dos resultados obtidos. Esta análise será dividida em três componentes, as quais foram avaliadas no decorrer desta tese:

- Comparação entre a qualidade radiográfica obtida por diferentes técnicas, para diferentes materiais;
- Influência da espessura na qualidade radiográfica obtida;
- Tempos de exposição;

Importa ainda referir que a interpretação dos dados presentes nas radiografias foi efectuada com a supervisão de um técnico especialista internacional em soldadura pelo IIW (International Institute of Welding), cuja experiência permite uma análise mais clara e rigorosa de radiografias.

7.1 Comparação entre a qualidade radiográfica obtida por diferentes técnicas, para diferentes materiais.

Seguindo a motivação explicitada no início do capítulo anterior, numa primeira etapa o objectivo era obter uma comparação directa entre valores obtidos por radiografia convencional de filme e a radioscopia. Neste âmbito e, com os recursos

disponibilizados pela empresa, foram efectuadas radiografias a cinco materiais distintos, já citados na lista de provetes. Foram escolhidos estes materiais, dada a disponibilidade de indicadores de qualidade de imagem, nesses mesmos materiais, o que vai de acordo com o recomendado pela norma NP EN 462-1. A utilização de espessuras diferentes deve-se a dois factores:

- Tempo mínimo permitido pelo controlador da fonte Balteau, que é de dez segundos. Ou seja, com a potência e a corrente no mínimo, os tempos de exposição continuavam a não poder ser inferiores a dez segundos, o que forçou à utilização de uma espessura maior no provete de alumínio, de forma a obter tempos de exposição acima do mínimo permitido pelo equipamento.
- Os indicadores de qualidade de imagem do material do provete disponibilizados pela empresa não cobriam na totalidade a gama de espessuras existentes.

Com os dados contidos nas tabelas 5 e 6, podemos construir gráficos para os diferentes materiais, nos quais se pode ver uma comparação dos dados obtidos pelas diversas técnicas radiográficas. Nestes gráficos contidos da figura 29 até à figura 38, possuímos as três técnicas radiográficas já descritas anteriormente. A radioscopia com fonte pulsada (RD+FP), a radioscopia com fonte contínua (RD+FC), e a radiografia convencional de filme. Recorreu-se também a equipamento de digitalização profissional de radiografias (Filme Dig.) para conversão em formato digital, das radiografias de filme tiradas e posterior tratamento digital.

Os dados obtidos apresentam uma boa homogeneidade, na medida em que nos dados relativos à interpretação do IQI de fios (NP EN 462-1), a maior diferença detectada entre as técnicas de radioscopia e a radiografia convencional de filme foi de um fio. Esta variação é aceitável e pouco significativa, dado o método visual de interpretação em que, por exemplo, uma pequena diferença nas condições de luminosidade da sala onde as radiografias foram interpretadas, pode influenciar a acuidade da detecção obtida.

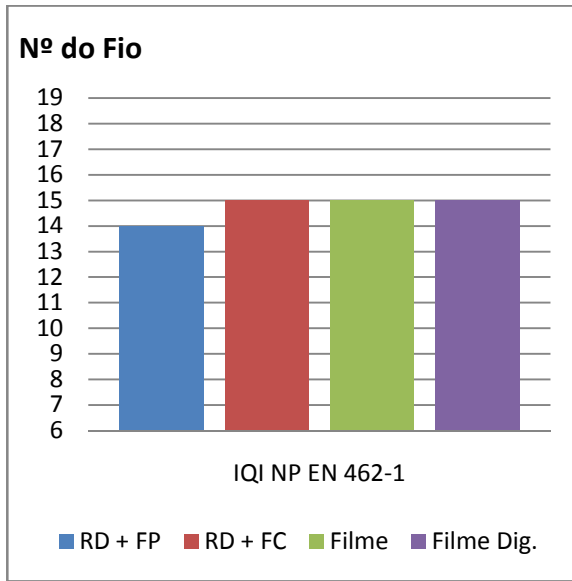


Figura 29 - fio detectado segundo a NP EN 462-1 para o provete de aço carbono de 4mm.

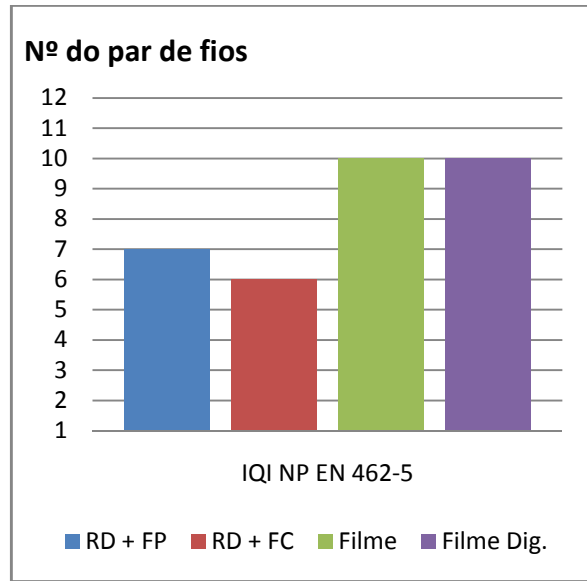


Figura 30 - par de fios detectado segundo a NP EN 462-5 para o provete de aço carbono de 4mm.

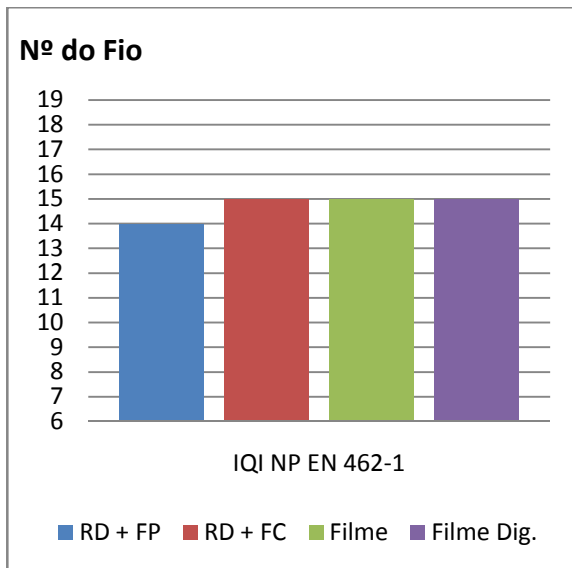


Figura 31 - fio detectado segundo a NP EN 462-1 para o provete de aço inoxidável de 4mm

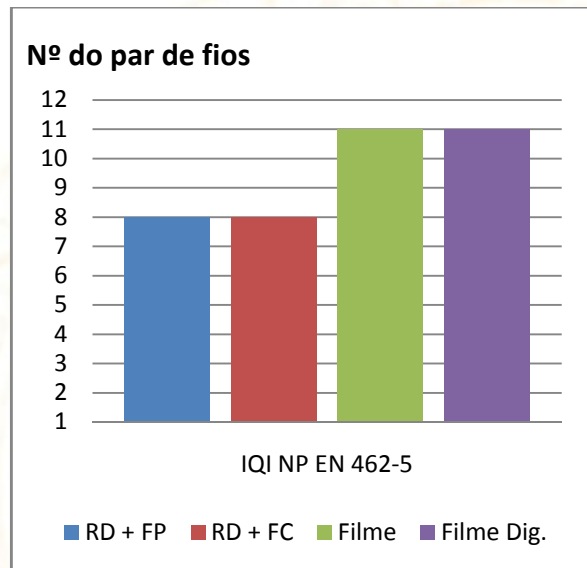


Figura 32 - par de fios detectado segundo a NP EN 462-5 para o provete de aço inoxidável de 4mm

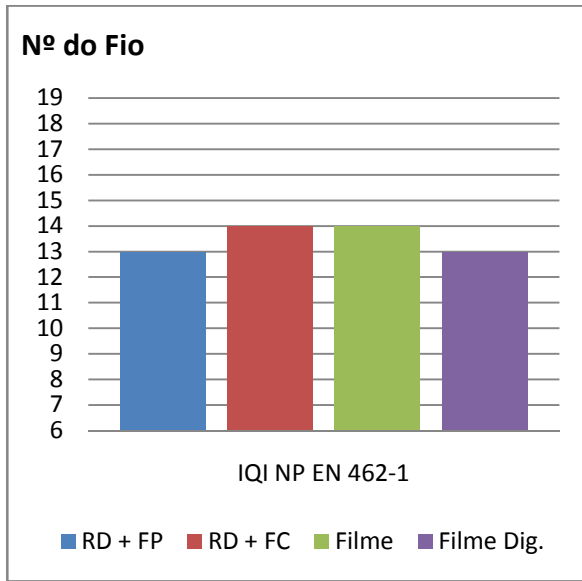


Figura 33 - fio detectado segundo a NP EN 462-1 para o provete de latão.

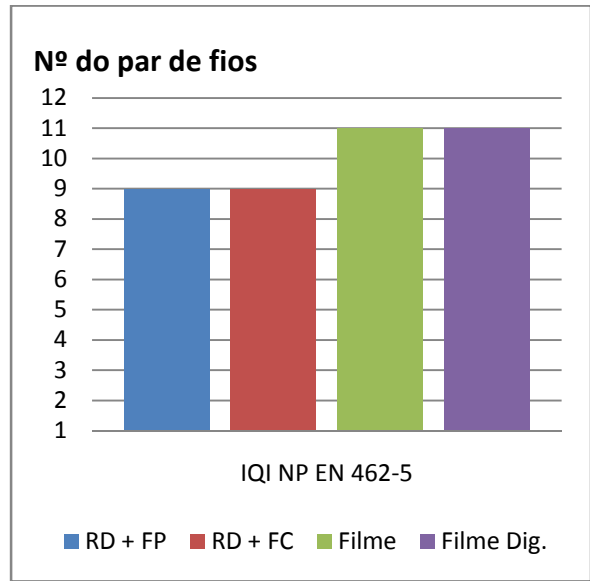


Figura 34 - par de fios detectado segundo a NP EN 462-5 para o provete de latão.

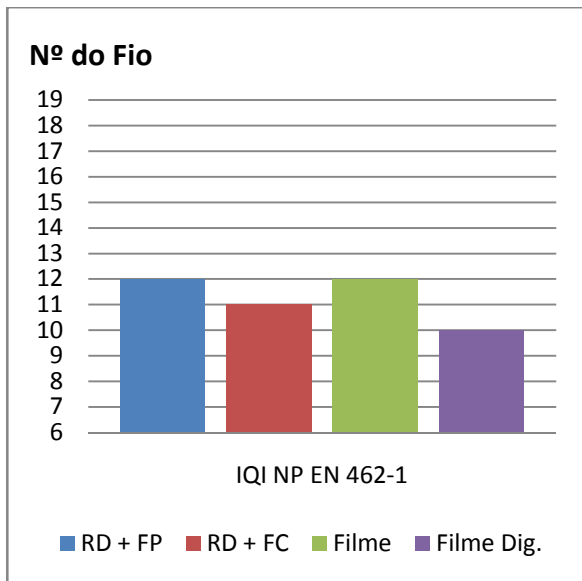


Figura 35 - fio detectado segundo a NP EN 462-1 para o provete de alumínio.

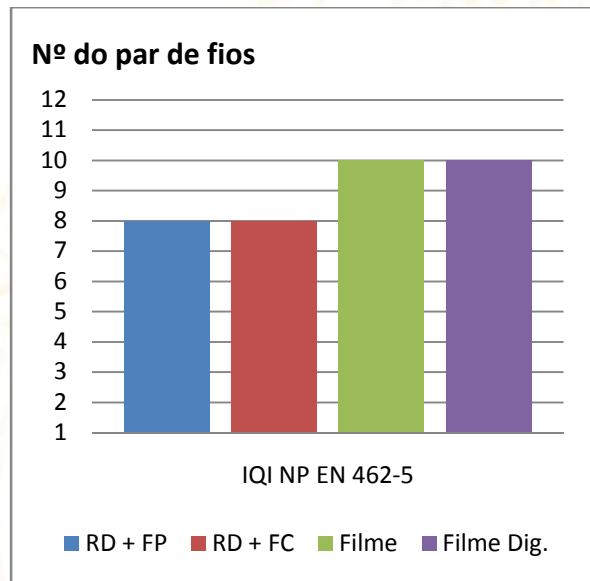


Figura 36 - par de fios detectado segundo a NP EN 462-5 para o provete de alumínio.

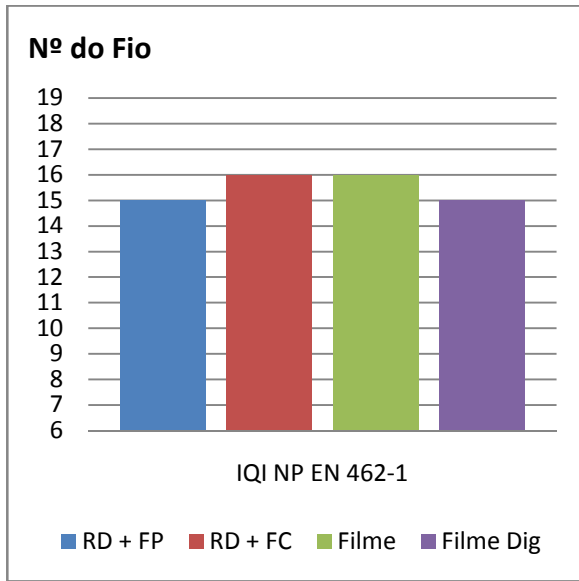


Figura 37 - fio detectado segundo a NP EN 462-1 para o provete de titânio.

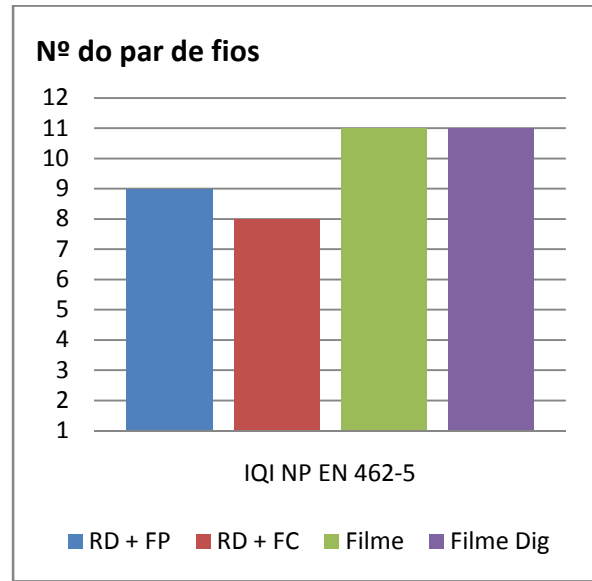


Figura 38 - par de fios detectado segundo a NP EN 462-5 para o provete de titânio.

É de referir que nos dados acima tratados, todas as radiografias respeitavam a qualidade radiográfica de categoria A, segundo a norma NP EN 1435 de 2000, cujos dados estão sintetizados na figura 39.

Categoria A de qualidade de imagem			
	Espessura nominal t mm		Valor dos IQI ¹⁾
	até	1,2	W 18
superior a	1,2 e até	2	W 17
superior a	2 e até	3,5	W 16
superior a	3,5 e até	5	W 15
superior a	5 e até	7	W 14
superior a	7 e até	10	W 13
superior a	10 e até	15	W 12
superior a	15 e até	25	W 11
superior a	25 e até	32	W 10
superior a	32 e até	40	W 9
superior a	40 e até	55	W 8
superior a	55 e até	85	W 7
superior a	85 e até	150	W 6
superior a	150 e até	250	W 5
superior a	250		W 4

Figura 39 - Quadro B1 do Anexo B da norma NP EN 1435 - Ensaio radiográfico de juntas soldadas. Nesta tabela podemos ver os requisitos mínimos do valor do IQI detectado (segundo a NP EN 462-1), para que a qualidade radiográfica seja de Categoria A.

Na interpretação dos dados relativos ao indicador de qualidade de imagem segundo a NP EN 462-5, constituído por pares de fios, já vistos anteriormente, foi determinado o último par, no qual se conseguia distinguir os dois fios.

Esta interpretação foi feita de forma visual para todas as técnicas. No entanto, na técnica de radioscopia, possuímos uma ferramenta que também utilizamos para todos os provetes desta técnica, que permite traçar um perfil da intensidade dos pixels ao longo de uma linha, conforme se pode ver no esquema da figura 40.

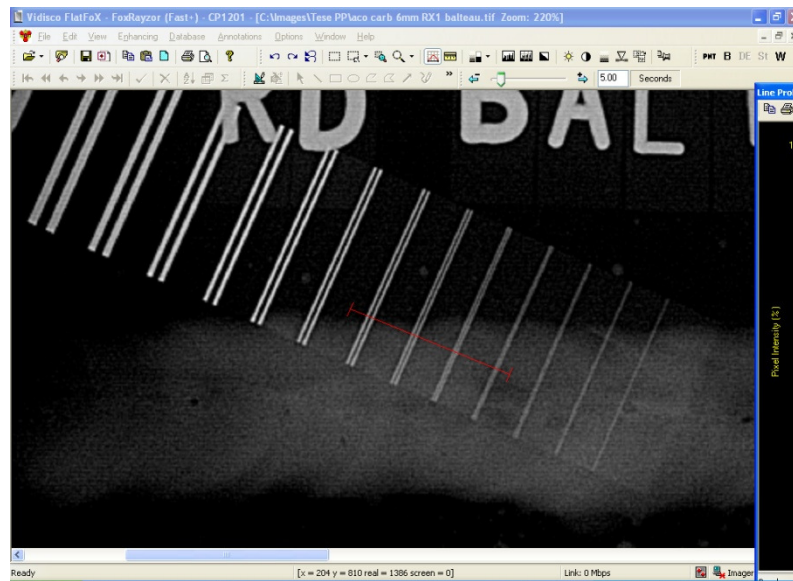


Figura 40 - Esquema do perfil de intensidades (a vermelho).

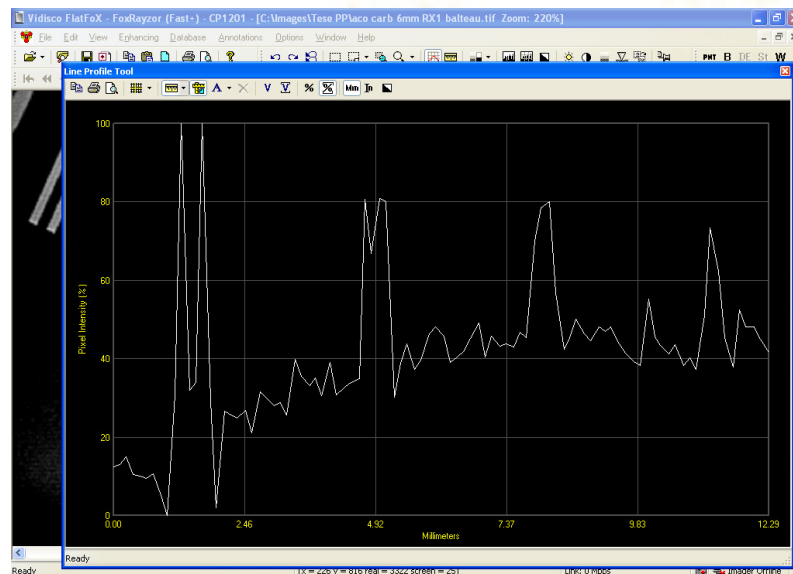


Figura 41 - Gráfico do perfil de intensidades correspondente à figura anterior.

A ferramenta apresenta-nos um gráfico, no qual é possível visualizar uma separação dos picos correspondentes a um dado par, até que no terceiro par da figura 41, deixa de ser perceptível essa separação dos fios. Embora tenha sido utilizada como ferramenta para confirmação dos dados interpretados visualmente, esta nunca deverá substituir a interpretação visual, dado que os dados correspondem apenas a uma linha de pixels e não a uma área, de forma a obter valores médios de intensidade. Existiram situações em que esta ferramenta não atingia o mesmo nível de detecção do método visual, pelo que nestas situações, foram aceites os valores das detecções visuais e não os dados pela ferramenta.

O maior valor alcançado (menor penumbra) pela radiografia de filme no decorrer deste trabalho foi o par 11D, cujo valor de penumbra corresponde a $160 \mu\text{m}$. Já na radioscopia, o valor interpretado deste IQI, atingiu como detecção máxima 9D, o que corresponde a uma penumbra de $260 \mu\text{m}$.

Os valores de penumbra obtidos para todos os provetes, estão muito acima dos requisitos mínimos do código ASME V (Committee Asme Boiler Pressure Vessel, 1995), cuja recomendação é de que para espessuras menores que duas polegadas ($50,8\text{mm}$) o valor máximo de penumbra aceite seja o do par 6D isto é, $500 \mu\text{m}$.

Os valores detectados com este IQI podem também ser utilizados na determinação da resolução espacial básica (SR_B) do detector. Esta é obtida, dividindo o valor da penumbra por dois. Relativamente aos dados máximos detectados para a radioscopia e a radiografia de filme, correspondem respectivamente as resoluções espaciais básicas (SR_B) de $130 \mu\text{m}$, e $80 \mu\text{m}$.

Importa aqui referir que o tamanho de pixel fornecido pelo fabricante do equipamento de radioscopia é de $127 \times 127 \mu\text{m}$. Ou seja, a resolução máxima permitida pelo detector é limitada pelo tamanho do seu pixel, dado que o valor por nós obtido de resolução espacial básica se aproxima do tamanho de pixel.

A afirmação anterior não implica que a detecção de defeitos só seja possível para defeitos superiores ao tamanho de pixel, mas sim que a capacidade de resolução de dois pontos separados está limitada pelo tamanho do pixel.

A detecção de diferenças de espessuras de material, mesmo que muito pequenas, e inferiores ao tamanho de pixel, continua a ser passível de detecção, conforme se pode extrair dos dados do provete de titânio, figura 37. Neste provete a detecção do fio chega até ao número dezasseis (W16), que possui um diâmetro nominal de 100 μm . Ou seja, conseguimos um contraste de tal forma elevado, que conseguimos detecções de diferenças de espessura, de dimensões abaixo do tamanho de pixel. Este efeito, denominado de resolução de sub-pixel, foi já reportado num trabalho (BAVENDIEK, et al., 2006), onde se demonstrou que o elevado contraste das técnicas radioscópicas mais recentes, conseguia compensar uma menor resolução espacial destes detectores. Neste trabalho fica bem patente que a informação detectada, mesmo que apenas por uma fracção do pixel, pode ser realçada posteriormente por meio de filtros e tratamento de imagem, dado que existe uma diferença numérica entre os valores de cada pixel, mesmo que esta não seja perceptível visualmente.

A fonte de emissão contínua possui um ponto focal mais pequeno, pelo que nos provetes mais finos, a qualidade obtida foi superior. Quanto menor o ponto focal, melhor a qualidade obtida, muito embora no caso da radioscopia, o limite de resolução imposto pelo tamanho de pixel não permita uma análise mais aprofundada da influência do ponto focal.

Tanto a nível de contraste, como a nível de penumbra, as radiografias tiradas com todas as técnicas cumprem os requisitos impostos pela maioria dos fabricantes e, em especial, segundo o ASME V, código de referência amplamente utilizado na radiografia industrial, facto pelo qual a técnica de radioscopia tem sido implementada nas mais diversas áreas, conforme se pode ver no state of the art deste trabalho.

7.2 Influência da espessura na qualidade radiográfica obtida

Com o intuito de estudar a influência das espessuras na detecção dos indicadores de qualidade de imagem, utilizaram-se provetes de aço carbono, com diferentes espessuras, os quais se encontram listados na tabela 4.

Na figura 42, podemos ver um gráfico dos dados obtidos, relativamente à detecção do IQI de fios, segundo a NP EN 462-1. Os dados obtidos são bastante homogéneos, sendo a qualidade obtida pelas diferentes técnicas semelhante para as espessuras ensaiadas. Estes dados apoiam a possibilidade de utilização das técnicas de radioscopia para as mais variadas espessuras de materiais, dado que a qualidade obtida acompanha a da radiografia convencional de filme.

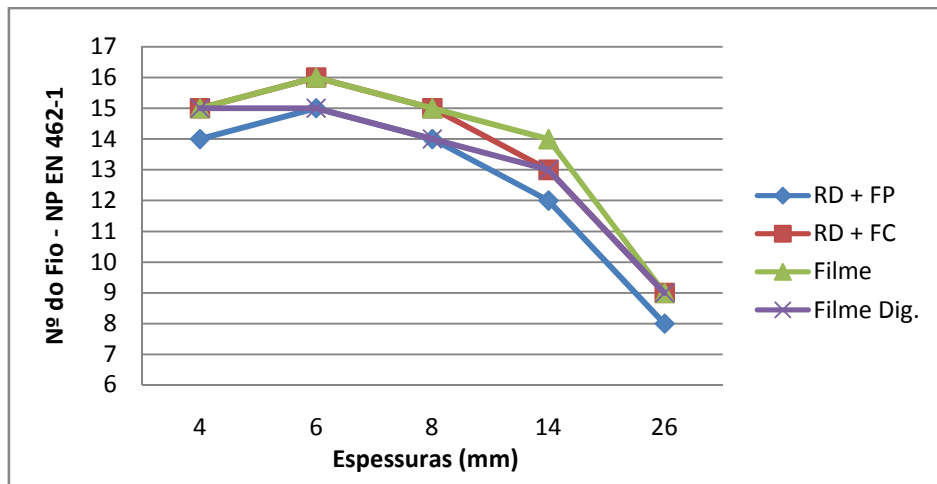


Figura 42 - Influência das espessuras na detecção do indicador de qualidade de imagem segundo a norma NP EN 462-1. É possível observar na figura a progressão da detecção para cada técnica, à medida que as espessuras de aço aumentam.

Acresce ainda que na detecção do IQI segundo a NP EN 462-5, resumida na figura 43, podemos constatar que a penumbra da radiografia de filme é menor para as espessuras mais pequenas, em comparação com a radioscopia, onde a limitação da resolução espacial básica do detector (SR_B) impede que a penumbra seja semelhante à de filme, que apenas está limitado pelo tamanho de grão do mesmo, característico de cada classe de filme. À medida que as espessuras aumentam e os valores da penumbra são superiores à SR_B do detector, a detecção dos pares de fios em radioscopia aumenta relativamente à radiografia de filme, dado o elevado contraste permitido pela radioscopia, conforme referido no capítulo anterior.

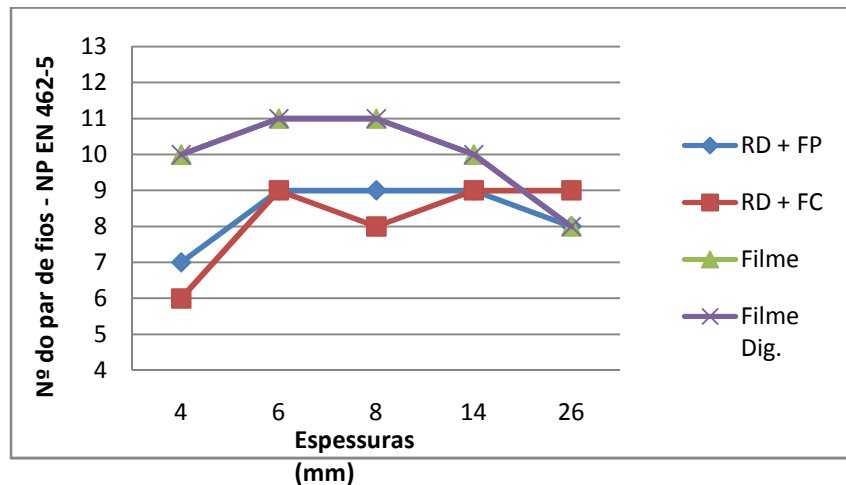


Figura 43 - Influência das espessuras na detecção do indicador de qualidade de imagem segundo a norma NP EN 462-5.

Neste ponto importa aqui referir que o estudo pode ser aprofundado utilizando um leque maior de espessuras, muito embora, a fonte pulsada apresente um limite de espessura máxima que consegue penetrar, inferior à fonte de emissão contínua, utilizada neste trabalho. Por seu lado, a fonte contínua tem espessuras mínimas, abaixo das quais não se consegue radiografar, enquanto que a fonte pulsada o permite. Por este mesmo factor, deve ser encontrada uma gama de espessuras compatíveis com as duas fontes.

7.3 Tempos de exposição

Os tempos de exposição, que resultaram da realização das radiografias aos provetes listados no início deste capítulo, os dados estão resumidos na tabela 7, onde podemos encontrar os tempos realizados para cada provete em cada técnica.

Na obtenção destas radiografias, tentou-se tanto quanto possível manter uma potência e uma corrente constantes, de forma a fixar esta variável. No entanto, para alguns provetes, foi necessário um incremento na corrente, com o intuito de obter uma melhor qualidade de imagem. A exceção dos provetes assinalados na tabela, a corrente utilizada nos ensaios de radioscopia com fonte contínua e filme foi de 1mA, com uma potência de 200kV. A fonte pulsada utilizada (RD+FP), trabalha com uma potência fixa de 270kV e uma corrente de 1mA e cada pulso tem uma duração de 60 nanosegundos.

Tabela 7 - Tempos de exposição obtidos para os diferentes provetes e para as diferentes técnicas. Os tempos obtidos para a radioscopia com fonte contínua são valores aproximados, dado que não havia possibilidade de cronometrar o tempo com exactidão, daí que a comparação dos ganhos obtidos nos tempos de exposição também seja aproximada.

	Espessura (mm)	Técnica			Ganhos (%) RD+FP vs Filme	Ganhos (%) RD+FC vs Filme
		RD+FP	RD + FC	Filme		
Aço Carbono	4	00:00:01,7	00:00:04	00:00:40	95	90
Aço Carbono	6	00:00:01,7	00:00:04	00:00:55	96	93
Aço Carbono	8	00:00:02,38	00:00:05	00:01:15	97	93
Aço Carbono	14	00:00:02,72	00:00:06	00:03:00	98	97
Aço Carbono	26	00:00:05,44	00:00:10	00:03:00*	97	94
Aço Inox	4	00:00:01,7	00:00:04	00:00:40	95	90
Aço Inox	6	00:00:01,7	00:00:04	00:00:55	96	93
Latão	8	00:00:02,38	00:00:04	00:01:20*	98	95
Alumínio	15	00:00:00,71	00:00:02	00:00:10*	90	80
Titânio	3	00:00:00,71	00:00:02	00:00:10	90	80

*a corrente utilizada nestes provetes foi de 5mA em vez de 1mA utilizados nos restantes.

A comparação dos ganhos obtidos entre as duas técnicas de radioscopia e radiografia de filme, permitem a observação de ganhos avultados em termos de tempos. Estes ganhos são especialmente elevados para espessuras maiores, chegando mesmo a 98% de ganhos em tempo, quando se utiliza a radioscopia.

Este fenómeno decorre principalmente da elevada sensibilidade do detector de área plana, que não possui uma curva característica, tal como a que podemos ver na figura 15 para um filme e sim um comportamento linear. Ou seja, desde o primeiro momento em que se começa a emitir radiação, o detector já está a adquirir dados de forma linear, contribuindo desta forma para tempos de exposição muito menores.

Tempos de exposição menores são uma mais-valia por variados factores. Desde logo, o tempo gasto em cada exposição desce de forma assinalável e, como tal, o ensaio é muito mais expedito e mais económico, dado que exige menos tempo de operadores. Contribuem também para uma menor exposição profissional a esta radiação e, conseqüentemente uma maior segurança para os radiologistas, bem como população em geral que possa estar sujeita a esta, inadvertidamente.

Os dados obtidos relativamente aos tempos de exposição para a radioscopia com fonte contínua, são dados aproximados, dado que não existe uma sincronização

entre o detector e a fonte. Uma vez que são comandados de forma independente, os dados obtidos são muito variáveis e, para fundamentar estes tempos, seria necessário o desenvolvimento de um software próprio para possibilitar uma aquisição de informação por parte do painel, sincronizada com o início de emissão da fonte.

Importa também aqui referir que a potência da fonte pulsada não pode ser utilizada na fonte contínua, não porque esta não o permitisse, mas por duas razões. Em primeiro, porque o painel sobreaquece para potências acima dos 160kV contínuos. Para colmatar parte deste problema, desenvolveu-se na empresa um caixilho de chumbo, para proteger a área não activa do painel e, desta forma, evitar um sobreaquecimento dos circuitos electrónicos. Esta protecção foi de 6mm de espessura. Em segundo, havia a possibilidade de trabalhar com os 300kV na fonte contínua, que são mais aproximados dos 270kV da pulsada, no entanto, os tempos obtidos eram demasiado pequenos e difíceis de controlar quando combinada com a radioscopia.

Numa análise global, o procedimento radioscópico apresentou resultados semelhantes à radiografia de filme e um potencial de tratamento de imagem ainda não inteiramente explorado, mas que permite uma flexibilidade que o filme não consegue atingir. Os tempos de exposição menores permitem um trabalho mais célere e mais seguro (ANDREUCCI, 2003), o que só acarreta benefícios para a empresa que o implemente. O tratamento digital da imagem permite dados que se aproximam da utilização de técnicas de duplo filme, uma vez que conseguimos filtrar a informação pelas intensidades dos pixels. Com o controlo digital dos níveis de cinzento podemos separar a informação das partes mais espessas das mais finas e, desta forma, numa mesma radiografia possuir ambas as informações.

A obtenção dos dados não implica gastos com equipamento e consumíveis de revelação. O tempo de processamento também é um factor decisivo, pois é possível a obtenção e interpretação instantânea dos dados, permitindo desta forma um ensaio mais expedito e, conseqüentemente, com menores custos associados.

8 Conclusões

Tendo em conta os dados obtidos e já discutidos na análise de resultados, podemos inferir que a nível de contraste, os dados obtidos para as técnicas de radioscopia e radiografia convencional de filme são idênticos, sendo em alguns casos iguais. Este facto permite desde logo uma aplicação imediata desta técnica em situações nas quais os parâmetros da radiografia convencional já sejam aceites. Não considerando questões de ordem operacional e de implementação do processo, a técnica radioscópica permite a obtenção da mesma qualidade que uma radiografia de filme convencional, pelo que pode prontamente substituir esta. Os dados experimentais obtidos foram verificados para diferentes materiais, os quais deram resultados consistentes, ou seja, nos materiais mais comuns, e para os quais existem no mercado IQI's apropriados. O contraste bastante elevado, que permite a detecção de diferenças de espessura, com dimensões menores que a do pixel, conjuntamente com a facilidade de tratamento digital da imagem, para melhoria dos dados obtidos, é uma mais-valia em relação ao filme.

Foi verificada a influência de diferentes espessuras na qualidade obtida. Com este objectivo em mente, fixou-se um material, um aço carbono, e realizaram-se radiografias em provetes com diferentes espessuras. Os dados obtidos apontam para comportamentos semelhantes de todas as técnicas, havendo diferenças pouco significativas entre si, como tivemos oportunidade de ver na figura 42.

Desta forma, podemos assegurar que os dados obtidos serão sempre semelhantes entre as diferentes técnicas, independentemente das espessuras em questão. Ainda no âmbito do estudo das espessuras, a determinação da penumbra, é inferior na radioscopia, para baixas espessuras, mas aproxima-se da radiografia de filme, com o aumento da espessura.

No decorrer deste trabalho foram também registados os tempos de exposição utilizados para cada radiografia. Estes tempos são talvez o factor mais decisivo na implementação desta técnica. Devido ao funcionamento do próprio painel detector de silício amorfo, extremamente sensível à radiação, os tempos de exposição são

muito menores que os de filme. Estes ganhos podem ascender a 98 % conforme já tivemos oportunidade de comprovar com a análise de resultados. Pelos dados obtidos, os ganhos em tempo são mais significativos, quanto maiores forem as espessuras radiografadas, facto que atesta a elevada sensibilidade destes detectores, em relação aos filmes, que necessitam de uma exposição superior para obtenção dos mesmos dados.

A capacidade qualitativa da aplicação da técnica radioscópica, em substituição do filme convencional, foi verificada, estando agora a mesma limitada por questões de aplicabilidade e não da qualidade. A técnica está já a ser utilizada pela empresa nas mais variadas situações. No entanto, espera-se com este trabalho expandir a sua utilização a outros materiais e outros casos práticos que anteriormente estavam excluídos, dada a não existência de garantias que a qualidade obtida seria equiparável à de um filme convencional.

Existem no entanto algumas variáveis não abordadas neste trabalho, cujos estudos mais aprofundados ainda não foram realizados, e que influenciam grandemente a qualidade radiográfica obtida. Desde logo, pontos focais menores possibilitam uma aproximação da fonte ao objecto maior, diminuindo desta forma os tempos de exposição, e melhorando a qualidade da imagem obtida. Existem actualmente fontes cuja dimensão ronda os décimos de milímetro, o que possibilita a obtenção de penumbras muito baixas e, conseqüentemente, resoluções superiores. O contraste obtido também é maior, dado que o ruído diminui com diminuição do ponto focal.

9 Bibliografia

Andreucci, Ricardo - *Aspectos Industriais - Protecção Radiológica*. ABENDE - Associação Brasileira de ensaios não destrutivos, 2003.

Andreucci, Ricardo - *Curso de soldagem - controlo de qualidade II*. ABENDE - Associação Brasileira de ensaios não destrutivos, 2002.

Andreucci, Ricardo - *Radiologia Industrial*. ABENDE - Associação Brasileira de ensaios não destrutivos, 2003.

Asme Boiler Pressure Vessel, Committee - *ASME boiler & pressure vessel code Section V - Nondestructive examination*. New York: ASME, 1995.

Bavendiek, Klaus, et al. - *New digital radiography procedure exceeds film sensitivity considerably in aerospace applications*. Berlim: NDT.net, 2006.

Boiy, Leo - *Successful Conversion to Digital X-Ray Detectors*. Berlim: NDT.net, 2006.

Corporation, Historic Fort Collins Development - *Advances in digital radioscopia for use in historic preservation*. 2005. MT-2210-03-NC-07.

Davis, Anthony W., et al. - *An Analysis of industrial nondestructive testing employing digital radiography as an alternative to film radiography*. Los Alamos National Laboratory. Los Alamos: 2000.

Diamond, Ari - *Stationary & portable use of a-Si Flat Panels in NDT industries*. Berlim: NDT.net, 2006.

Ewert, Uwe - *Upheaval in industrial Radiology*. Barcelona: NDT.net, 2002.

Ewert, Uwe, et al. - *Strategies for film replacement in radiography - Films and digital detectors in comparison*. Shanghai, China: NDT.net, 2008.

Jancarek, Alexandr, et al. - *Prague center of industrial X-ray tomography: research and applications in NDT*. Buenos Aires: NDT.net, 2007.

Mery, Domingo - Automated Radioscopic Inspection of Aluminium Die Castings. *Materials Evaluation*. 65:6 (2007). p. 21.

Mix, Paul E. - *Introduction to nondestructive testing : a training guide*. 2nd. Hoboken, N.J.: Wiley, 2005.

Moreira, Edson Vasques; Fritz, Marcelo Carlos - *Flat-panel detectors are accepted for digital radiography in place of conventional radiography in pipeline weld inspection*. Buenos Aires: NDT.net, 2007.

Oliveira, Davi F.; Lopes, Ricardo T. - *Avaliação da qualidade de imagem em sistemas de radiografia computadorizada e image plates*. Buenos Aires: NDT.net, 2007.

Pincu, Ron - *Digital Radiography and its Advantages in Field NDT Inspections today*. Shanghai, China: NDT.net, 2008.

Ramos, J L Saraiva - *Radiografia industrial*. Lisboa: Instituto de Soldadura, 1978.

Rocha, J. G - *Microdetectores de silício baseados em cintiladores para radiografia digital*. Universidade do Minho, 2003.

Shull, Peter J. - *Nondestructive evaluation : theory, techniques, and applications*. New York: Marcel Dekker, 2002.

Shull, Peter J. - *Nondestructive evaluation : theory, techniques, and applications*. New York: M. Dekker, 2002.

Silva, R. R. Da; Mery, D. - *Accuracy estimation of detection of casting defects in X-ray images using some statistical techniques*. British Institute of Non-destructive testing, 2007.

Normas consultadas:

NP EN 462-1 - Ensaios não destrutivos - Qualidade de imagem radiográfica
Parte 1: Indicadores de qualidade de imagens (de fios) Determinação do índice de qualidade de imagem.

EN 462-5 - Non-Destructive Testing - Image Quality of Radiographs Part 5: Image Quality Indicators (Duplex Wire Type), Determination of Image Unsharpness Value (F)

NP EN 1435-2000 - Ensaios não destrutivos de soldaduras. Ensaio radiográfico de juntas soldadas.

ISO 11699-1 - Non-destructive testing - Industrial radiographic films - Part 1: Classification of film systems for industrial radiography.

DIN 54109 - Image Quality of Radiographs

BS 3971 - Specification for image quality indicators for industrial radiography (including guidance on their use).

ASTM E-2002 - Standard Practice for Determining Total Image Unsharpness in Radiology

ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section V: Nondestructive Examination

