

DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO DA TOMOGRAFIA POR RAIOS GAMA NA INSPECÇÃO DE ESTRUTURAS DE ENGENHARIA CIVIL



Mario A. J. Mariscotti

C.E.O.
Tomografía de Hormigón
Armado S.A.
Buenos Aires, Argentina
mariscotti@thasa.com



Peter Thieberger

Tomografía de Hormigón
Armado S.A.
Buenos Aires, Argentina
thieberger@thasa.com



Teresita Frigerio

Desenvolvimento de software
Tomografía de Hormigón
Armado S.A.
Buenos Aires, Argentina
tfrigerio@thasa.com



Marcelo Ruffolo

Director Laboratorio I&D
Tomografía de Hormigón
Armado S.A.
Buenos Aires, Argentina
mruffolo@thasa.com



Mario Pimentel

Assistente
LABEST/FEUP
Porto
mjsp@fe.up.pt



Joaquim Figueiras

Prof. Catedrático
LABEST/FEUP
Porto
jafig@fe.up.pt

SUMÁRIO

Descreve-se o desenvolvimento e a aplicação da tomografia por raios gama na inspecção não destrutiva de estruturas de engenharia civil. É dado especial relevo às estruturas de betão armado e pré-esforçado. É ainda brevemente descrito o espectrómetro de raios gama recentemente desenvolvido assim como algumas aplicações experimentais já efectuadas.

Palavras-chave: Raios-gama, inspecção não destrutiva, betão, pré-esforço, vazios, corrosão.

1. INTRODUÇÃO

Os raios gama podem ser usados para examinar o interior das estruturas de betão com fidelidade fotográfica e precisão superior àquela que pode ser obtida com outras técnicas de inspecção não destrutiva utilizadas no domínio da engenharia civil, tais como os ultra-sons, o radar de prospecção geotécnica, entre outros. A aplicação de raios gama na inspecção de estruturas de betão é conhecida há já alguns anos [1-4]. No entanto, a sua aplicação tem sido limitada devido à inexistência de uma tecnologia prática e competitiva. Actualmente, a disponibilidade de meios computacionais e ferramentas de digitalização cada vez mais poderosos tem vindo a tornar possível o desenvolvimento de métodos que permitem explorar a utilização da radiação gama na determinação de posições, diâmetros e estado de corrosão de armaduras, detecção e medição de vazios em bainhas de pré-esforço, e na inspecção do interior dos mais diversos materiais estruturais, com elevada precisão e a baixo custo.

O desenvolvimento da técnica de Tomografia de Betão Armado (TBA) pela THASA foi motivado pelo trágico colapso de uma varanda, causando a morte de várias pessoas e realçando a necessidade de um método eficaz para a caracterização da posição e do estado das armaduras em elementos estruturais. Nos últimos anos a TBA tem vindo a ser utilizada na inspecção de vigas, pilares, lajes e outros elementos estruturais de edifícios públicos e privados, edifícios industriais, cofres bancários, monumentos, pontes, estacas submersas, bainhas em elementos pós-tensionados, etc. [5-6]

2. ASPECTOS TÉCNICOS DO MÉTODO TBA

A TBA é semelhante à tomografia computadorizada usada em medicina, exceptuando os factos de se utilizarem raios gama em vez de raios X e de não ser necessário ter acesso ao objecto de estudo de tantas perspectivas diferentes. Na TBA, os raios gama incidem sobre vigas, pilares, lajes e outros. A parcela da radiação emitida que atravessa estes elementos estruturais é registada em filmes apropriados de 35x43 (cm). A determinação da posição e do diâmetro dos varões de aço nas secções examinadas (Fig. 1A) são obtidos a partir da análise subsequente dos dados registados nas gamagrafias. Devido à qualidade da imagem, esta acaba também por ser uma das melhores técnicas de carácter não destrutivo na detecção de corrosão (Fig. 1B) e vazios (Fig. 1C).

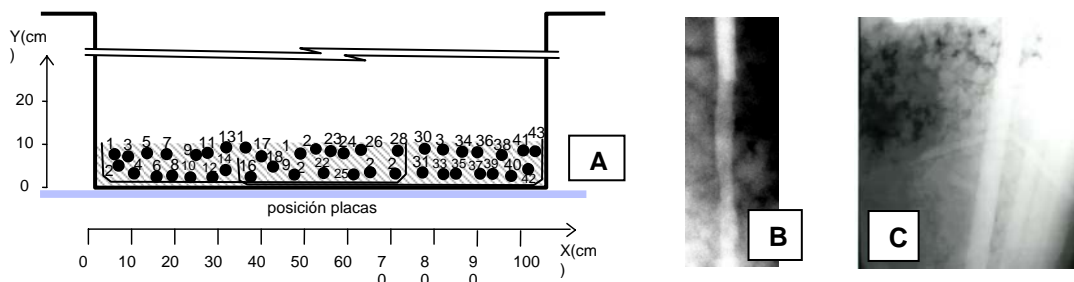


Figura 1. A) Tomografia da armadura de uma viga de largura superior a 1.0m armada com 43 varões de Ø25mm, obtida com uma fonte de ^{192}Ir ; B) Parte de uma gamagrafia onde se observa a corrosão de um varão; C) Detecção de vazios num pilar

Geralmente, a tomografia de armaduras, bainhas e outros elementos cuja forma geométrica é conhecida (normalmente cilíndrica), pode ser resolvida mediante duas gamagrafias de ângulos diferentes, podendo até ser suficiente uma só recorrendo ao método da penumbra [7]. O equipamento necessário compreende dois componentes principais: o sistema de irradiação, que inclui uma fonte radioactiva, o seu contentor e respectivo telecomando, e o sistema de detecção da radiação emitida.

Além de ter um poder de penetração superior aos raios X usados em medicina e ser, portanto mais adequada à inspecção de materiais densos como o betão, a radiação gama é emitida por substâncias radioactivas de forma espontânea, sem recurso a energia eléctrica, o que constitui uma vantagem relevante em trabalhos de campo onde não seja fácil ter uma fonte de energia disponível. As substâncias radioactivas mais usadas nestes trabalhos são: ^{192}Ir , ^{137}Cs e ^{60}Co . A primeira, ^{192}Ir , é a menos energética e portanto mais portátil dado que requer menos blindagem, sendo muito usada na inspecção de soldaduras [8]. Contudo, a profundidade máxima de betão que os fotões de ^{192}Ir conseguem atravessar em tempos de medição correntes (15 a 30 minutos com películas convencionais, um pouco menos com as novos filmes digitais) é inferior a 300mm. Apesar desta limitação, a maioria dos estudos realizados pela THASA, incluindo vigas e pilares com espessuras bem superiores a 300mm (conforme mostra a Fig 1A), foram realizados com recurso a este tipo de fonte de forma a tirar partido da sua portabilidade e simplicidade de protecção da radiação. Na maioria dos casos, a inspecção de elementos com espessuras muito grandes é efectuada colocando a fonte em furos de 17mm de diâmetro dentro do elemento [9], de modo que a distância entre a mesma e o filme seja igual a cerca de 300mm. Dado que as armaduras estão geralmente localizadas perto da superfície dos elementos, a limitação da espessura máxima dos elementos a analisar pode ser ultrapassada através desta técnica. Inspeções mais profundas, contudo, requerem uma fonte mais energética ou a aplicação dum sistema em que a película é substituída por um espectrómetro de raios gama [5].

O sistema de detecção consiste num chassis [9] que contem elementos referenciais que permitem alcançar precisões de 1mm nos diâmetros e alguns milímetros na posição das armaduras. Este chassis serve também para alojar os filmes, filtros para a radiação secundária [10], o que permite aumentar o contraste das imagens obtidas, e um gamómetro [9], com o qual se determinam os tempos de irradiação.

Uma vez identificadas as secções a analisar (vigas, lajes, pilares, etc.), a TBA compreende duas etapas. A primeira é o trabalho de campo que consiste na fixação dos sistemas de irradiação e detecção, seguido da irradiação propriamente dita das placas pretendidas para cada secção pelo tempo estabelecido. A segunda fase passa pela análise das gamagrafias correspondentes a cada secção, mediante programas computacionais concebidos para o efeito, cujo resultado se compila numa nota técnica. Esta inclui os pormenores de armaduras (posição e diâmetro), estado de corrosão, presença de vazios e outros detalhes importantes que possam surgir da análise.

3. COMPARAÇÃO COM OUTRAS TÉCNICAS NÃO DESTRUTIVAS

As técnicas não destrutivas cujo campo de aplicação é mais próximo da TBA no respeito à sua aptidão para analisar armadura, são o pacómetro e o georadar (Ground Penetrating Radar, GPR). Estes últimos têm a vantagem de permitir a inspecção de grandes áreas num curto espaço de tempo, enquanto que a TBA é de aplicação mais localizada e cada medição demora 15 a 30 minutos, cobrindo um volume em forma de pirâmide truncada de cerca de 25cm de altura com uma base cujas dimensões são as da placa (35x43 cm). Sendo assim, para determinar a posição e diâmetro da armadura de um pilar de pequena secção armado com um varão em cada canto, por exemplo, ou detectar uma malha de armadura com pouco recobrimento e afastamento grande entre varões, o pacómetro é a ferramenta mais adequada. O mesmo se diz do GPR quando o objectivo seja detectar a posição das armaduras numa laje para, por exemplo, poder passar um ducto sem perigo de danificação das armaduras. A vantagem competitiva da TBA surge quando se pretende precisão e detalhe, ou seja, se se pretende conhecer a armadura dum elemento estrutural com pormenor suficiente para verificar a sua capacidade portante, particularmente se a densidade de armadura é alta e/ou disposta em várias camadas, como acontece comumente em vigas. No que se refere à capacidade de cada técnica no que se refere a detalhe, a Fig. 2 ilustra a diferença entre a THBA e o GPR no caso dum tubo para passagem de rede eléctrica.

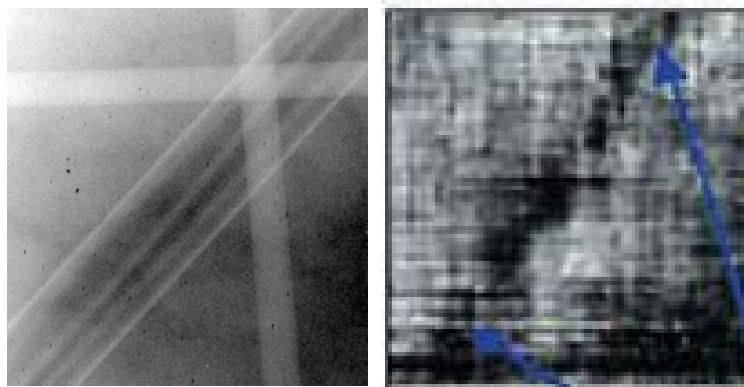


Figura 2. Comparação entre TBA (esquerda) e GPR (direita) para o caso de um atravessamento de rede de electricidade através de uma laje.

O mesmo se passa em relação a medições do efeito da corrosão no aço. Neste caso, a TBA compete favoravelmente com os métodos de medição de resistência eléctrica. Como no caso anterior, estes apresentam vantagem numa determinação mais global, enquanto que a TBA, novamente, se reveste de um carácter mais pontual, implicando o uso de critérios estatísticos de amostragem. Contudo, a precisão com que a TBA permite determinar a redução de secção de um varão de aço não é alcançável com nenhum outro método de inspecção não destrutivo.

Em estruturas pré-esforçadas, a profundidade das bainhas está quase sempre fora do alcance dos pacómetros. Por seu lado, o GPR não consegue obter informação relativamente ao conteúdo no interior de bainhas metálicas, não sendo possível identificar os cordões,

nem a existência de eventuais vazios de injeção. A Fig. 3A mostra uma gamagrafia de um bloco com uma garrafa de Coca-Cola no seu interior de modo a simular um negativo cuja forma é conhecida. Esta aplicação pode ser particularmente relevante para detectar defeitos no enchimento de bainhas de pré-esforço. A gamagrafia exibida na Fig. 3B mostra um defeito grave deste tipo observado numa bainha da maior ponte argentina - Zárate Brazo Largo [6].

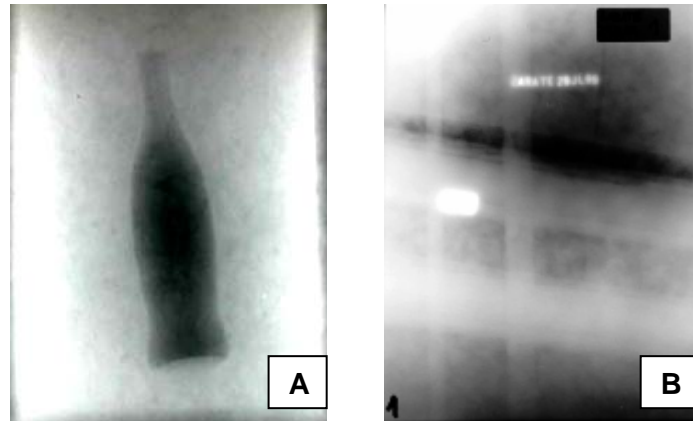


Figura 3. (A) Gamagrafia de uma garrafa de Coca-Cola dentro de um bloco de betão. (B) Gamagrafia obtida numa viga pós-tensionada da ponte Zárate Brazo Largo onde se identifica um defeito de injeção na bainha superior

Finalmente, refere-se ainda a questão relacionada com os riscos associados à exposição à radiação associada à TBA. Para uma fonte ^{192}Ir , usada na maioria dos estudos aqui apresentados, 55mm de tungsténio são suficientes para blindar a radiação, mantendo-a abaixo do nível permitido para o público em geral ($7.5 \mu\text{Sv}$ por hora), a 1.0 m. Em termos comparativos, um raio-X ao tórax situa-se entre 400 a $1500 \mu\text{Sv}$, ao maxilar entre 200 e $1500 \mu\text{Sv}$ e uma tomografia ao torso significa uma exposição a $8000 \mu\text{Sv}$. A dose anual recebida naturalmente por cada indivíduo é de $2000 \mu\text{Sv}$ e cada voo intercontinental representa um acréscimo de cerca de $50 \mu\text{Sv}$. Este tipo de trabalho requer operadores certificados e experientes para assegurar que todas as normas de segurança nacionais e locais são observadas. Além disso, menciona-se que a irradiação dos elementos não induz qualquer radioactividade nos materiais irradiados.

4. CASOS ILUSTRATIVOS

Como mencionado acima, a TBA tem vindo a ser usada em centenas de casos [12], na sua maioria em estudos de elementos estruturais de betão armado, pontes, edifícios industriais, comerciais, públicos e privados. Alguns dos resultados podem ser consultados em [5] e [12]. Nos parágrafos seguintes, discorre-se brevemente sobre alguns casos ilustrativos das potencialidades da TBA.

4.1 Danos em estacas submersas

Após a colisão dum navio de cruzeiro contra o porto de Ushuaia (Terra do Fogo), realizou-se um estudo sobre o estado das estacas de 1.0m de diâmetro, numa secção cerca de 50cm

acima do fundo oceânico (Fig 4A). Colocaram-se sistemas de irradiação e detecção em compartimentos estanques e treinou-se uma equipa de mergulho. Além de se terem detectado efeitos de corrosão nas armaduras, foi possível observar a rotura sistemática da soldadura inferior das camisas de aço das estacas [13].

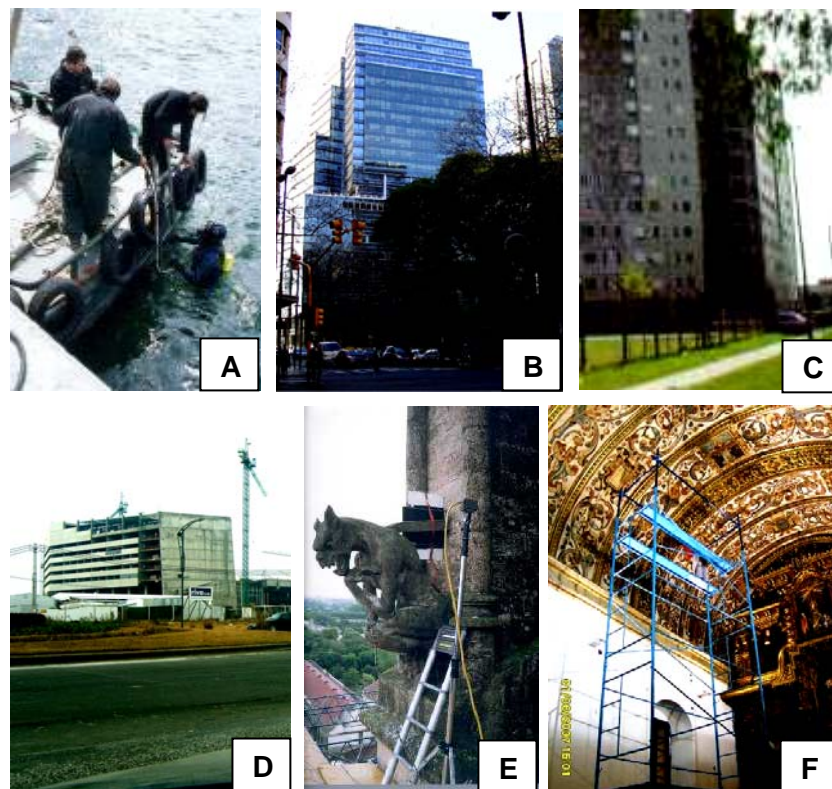


Figura 4. (A) Estudo de estacas submersas no porto de Ushuaia; (B) Edifício do diário “La Nación” em Buenos Aires; (C) Complexo Habitacional Piedrabuena em Buenos Aires; (D) Centro de Congressos em Rosario; (E) Gamagrafias de peças ornamentais da Basílica de Luján; (F) Inspeção de treliças de madeira na Capela dos Jesuítas em Córdoba.

4.2 Teste estrutural para a construção de 16 pisos sobre edifício existente

Por cima da estrutura de betão armado do edifício de 6 pisos construído para albergar o diário “La Nación” em finais da década de 50, projectou-se uma estrutura metálica para suportar 16 pisos adicionais (Fig. 4B). Recorreu-se à TBA para avaliar o estado dos pilares principais com secção de 1.0x1.0 (m).

4.3 Localização de pontos livres de armaduras para realizar perfurações

O exemplo refere-se a uma ponte no Uruguai para a qual foi projectado um sistema de reforço transversal do tabuleiro. Este foi materializado através da colocação de 24 barras de pré-esforço atravessando as 4 vigas principais. Recorreu-se à TBA para detectar os locais de atravessamento que evitassem destruir armadura. Realizaram-se 96 perfurações que nunca tocaram a armadura principal [13], [14]. O uso desta técnica permitiu poupar algumas

centenas de milhar de dólares em furacões às cegas. A utilização do GPR neste caso em concreto foi descartada devido à elevada densidade de armadura nas zonas interessadas.

4.4 Controlo de qualidade e de corrosão

O revestimento do complexo habitacional Piedrabuena em Buenos Aires (Fig. 4C) consiste de placas de betão de 2 ton cada, fixas à estrutura principal através de varões de 8mm. Dada a falta de manutenção das juntas entre placas, a corrosão afectou seriamente estes varões de ligação, tornando premente uma avaliação geral da sua condição, que foi realizada através de TBA, tendo sido descobertas fissuras relevantes. A técnica foi usada de modo análogo para controlar a qualidade de placas semelhantes num novo centro de congressos na cidade de Rosario (Fig. 4D), após a detecção duma fissura que apareceu pouco tempo depois da sua colocação. Fez-se uma revisão de dezenas de peças, encontrando-se sempre deficiências severas ao nível do posicionamento da armadura. Controlos semelhantes foram executados sobre perfis embebidos em estruturas de fábricas petroquímicas, armaduras de silos fissurados e outras estruturas sujeitas a ambientes agressivos. A TBA também provou ser bem sucedida na determinação de defeitos de corrosão em cavilhas pertencentes a rótulas do tipo Fressynet, frequentemente utilizadas em tabuleiros de pontes rodoviárias no Reino Unido [13].

4.5 Estudos em zonas limpas

No Centro de Computação da antiga Caja de Ahorros y Seguros em Buenos Aires, actualmente anexo ao Senado da Nação, realizou-se um estudo de TBA sobre as armaduras das vigas sem necessidade de interromper a actividade do centro.

4.6 Monumentos

Também se tem usado a TBA para estudar o interior de elementos ornamentais ou de valor histórico, onde é imperativo o uso de técnicas não destrutivas. Um exemplo desta aplicação é o do estudo dos elementos metálicos de ligação das figuras ornamentais suspensas das torres da Basílica de Luján (Fig. 4E). Outra aplicação menos convencional foi o estudo das treliças de madeira do tecto do século XVII da Capela Doméstica dos Jesuítas em Córdova (Argentina), declarada património da Humanidade pela UNESCO, com o fim de detectar vazios gerados pela acção de térmitas (Fig. 4F) [13].

4.7 Ponte de N. S. da Guia em Ponte de Lima

Foi efectuada uma inspecção preliminar aos cabos de pré-esforço da Ponte de N. S. da Guia, numa colaboração entre o LABEST e a THASA. Devido à incerteza no que diz respeito ao traçado e à constituição dos cabos de pré-esforço e também devido ao facto de terem sido observados sinais de corrosão em algumas bainhas [15], foi decidido efectuar uma inspecção experimental com a TBA no sentido de avaliar a exequibilidade de uma inspecção completa, assim como averiguar em detalhe os resultados passíveis de ser obtidos neste caso concreto. Nesta campanha preliminar, a duração trabalho de campo foi restringida a apenas 1 dia. Uma fonte de ¹⁹²Ir com apenas 20Ci foi utilizada. As doses de radiação foram continuamente medidas, e níveis aceitáveis foram obtidos a uma distância

de 10m da zona de exposição. Fora do caixão, níveis de radiação bem abaixo dos valores máximos recomendados para o público em geral foram medidos. Detalhes acerca do arranjo experimental podem ser encontrados em [16].

Todas as gamagrafias obtidas evidenciam um ou mais bainhas, juntamente com a malha de armaduras ordinárias (Fig. 6). A qualidade das imagens permite discernir detalhes como o limite das bainhas, os cordões e até o entrelaçado de fios que os constitui (note-se que as imagens apresentadas correspondem a uma fotografia da gamagrafia real, o que acarreta perda de qualidade da imagem). Não foram observados defeitos de injeção, perdas de secção dos cordões ou roturas de fios em nenhuma das 7 gamagrafias obtidas. A análise das gamagrafias revelou que as bainhas têm 55mm de diâmetro e que os cordões são de 0.5". No que diz respeito ao número de cordões por bainha, nem todos os cordões puderam ser inequivocamente identificados devido ao seu posicionamento relativo dentro da bainha.

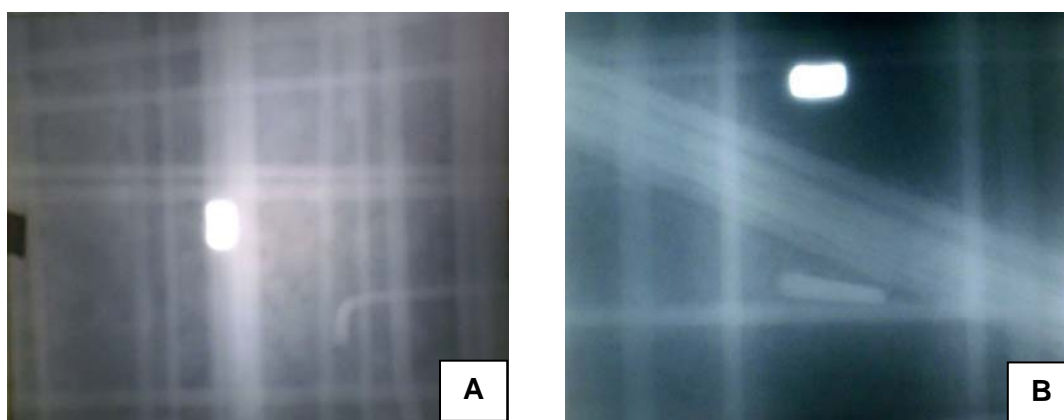


Figura 6. (A) Gammagrafia de um sector da laje de inferior do caixão; (B) Gamagrafia de um sector da alma evidenciando um caboconsola. Os rectângulos brancos são identificadores externos.

5. TBA EM “TEMPO REAL”

A THASA tem também investigado o uso de espectrómetros de raios gama. Este equipamento não requer o uso de filmes e permite a obtenção de resultados em tempo real. O uso de um espectrómetro, equipamento capaz de discernir entre raios gama de diferentes comprimentos de onda, tem a vantagem possibilitar a filtragem electronicamente da radiação dispersa melhorando significativamente o contraste das imagens

Tomógrafos de tempo real baseados em detectores CdTe e BGO foram construídos. Na Fig. 7 ilustram-se alguns resultados obtidos sobre uma viga de betão armado. Este método é útil na determinação quantitativa de vazios não só no plano perpendicular à radiação mas também no plano paralelo a ela. A Fig. 4 pode ser comparada com a Fig. 3A onde se simula um negativo usando uma garrafa de Coca-Cola dentro de um bloco de betão. Para a projecção sobre este plano, a resolução da gamagrafia é superior à obtida com o espectrómetro. Contudo, com este é possível uma determinação precisa da extensão do negativo nos planos paralelos à radiação (Fig. 8). A principal vantagem deste sistema é que a sua eficiência de detecção tem uma magnitude muito superior ao de um filme, permitindo realizar estudos sobre peças de maiores espessuras de betão: inspecções de bainhas de

pré-esforço, vigas de largura superior a 30cm, etc. Para espessuras até 50cm já foram obtidos resultados com muito promissores.

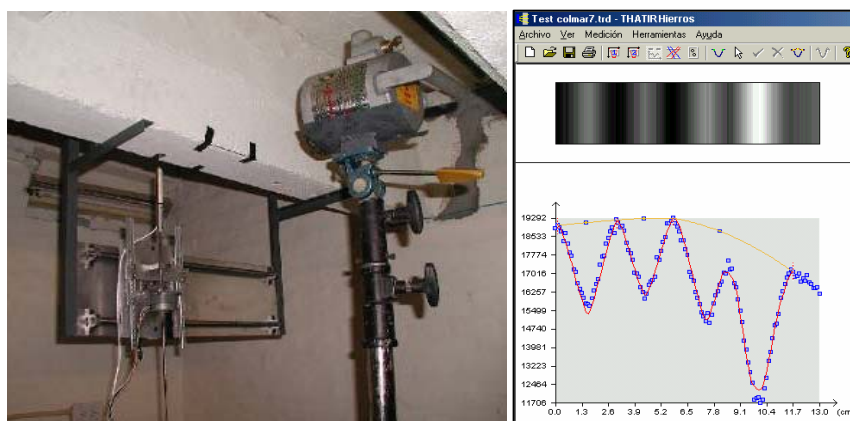


Figura 7. Imagem de um protótipo de um sistema de espectrometria em tempo real (esquerda) e resultados mostrando a intensidade da radiação ao longo da direcção vertical (direita). Os pontos do gráfico correspondem a uma amostragem com uma resolução de 1mm. A linha a vermelho corresponde ao ajuste por mínimos quadrados da intensidade teórica da radiação que seria medida para um dado diâmetro das armaduras e considerando o posicionamento relativos dos diversos elementos.

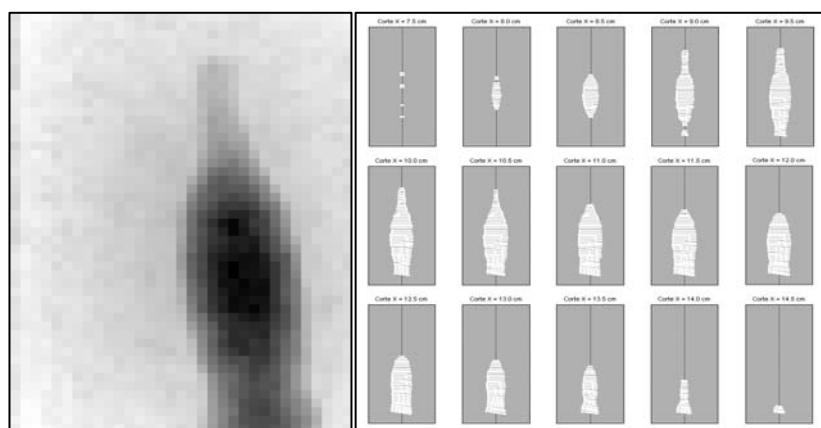


Figura 8. Medição de negativo usando o sistema de espectrometria de tempo real. Do lado esquerdo, apresenta-se o resultado obtido no plano perpendicular à radiação, a comparar com a gammagrafia da Figura 3A. As imagens do lado direito mostram os dados obtidos correspondendo a diferentes planos paralelos à radiação – onde este sistema apresenta vantagens sobre a gammagrafia.

6. CONCLUSÕES

A tecnologia de TBA permite estudar a armadura de peças de betão com pormenor e precisão sem paralelo em outras técnicas de inspecção não destrutiva. Neste trabalho, descrevem-se as principais características desta técnica, apresentam-se algumas aplicações e discutem-se os resultados recentemente obtidos com um espectrómetro de raios gama.

REFERÊNCIAS

- [1] Mullins, L; Pearson, H.M. – “The X-Ray Examination of Concrete” em *Civil Engineering and Public Works Review*, London, 1949, Vol. 44, No. 515, p. 256-258.
- [2] Whiffin, A. C. – “Locating Steel Reinforcing Bars in Concrete Slabs” em *The Engineer*, London, 1954, Vol. 197, p. 887-888.
- [3] British Standard – “Testing Concrete, Recommendations for Radiography of Concrete”. *BSI*, 1986, BS 1881: Part 205.
- [4] McCann, D.M.; Forde, M.C. – “Review of NDT methods in the assessment of concrete and masonry structures” em *NDT&E International*, 2001, Vol.34, p. 71-84.
- [5] Frigerio, T. et al. – “Development and application of computed tomography in the inspection of reinforced concrete”. *Insight*, 2004, Vol 46, No. 12, p. 742-745.
- [6] Mariscotti, M. A.J. et al. – “Gamma-Ray Imaging for Void and Corrosion Assessment” em *Concrete International*, 2009, Vol. 31, No. 11, p. 48-53 and on line appendix.
- [7] Mariscotti, M. A.J. – “Process for determining the internal three-dimensional structure of a body opaque to visible light by means of radiations from a single source, specially suitable for reinforced concrete parts”. *U.S. Patent*, 1998, 5,828,723.
- [8] Halmshaw, R. – “The use and scope of Iridium 192 for the radiography of steel”. *British Journal of Applied Physics* 5, 1954, p. 238–243.
- [9] Thieberger, P. et al. – “Method and arrangement for improving tomographic determinations, particularly suitable for inspection of steel reinforcement bars in concrete structures”. *International Patent*, 2007, WO 2008/060398.
- [10] Thieberger, P. et al. – “Simulation Program for Reinforced Concrete Tomography with Gamma-Rays”. *NDE Conference on Civil Engineering*, Ed. por Al-Qadi e Glenn Washer, ASNT, St. Louis, MO, 2006, p. 332-339.
- [11] IAEA Safety Standards Series – “Radiological Protection for Medical Exposure to Ionizing Radiation”. *Safety Guide*, 2002, No. RS-G-1.5, International Atomic Energy Agency, Vienna.
- [12] <http://www.thasa.com/ANTECEDENTES/Publicaciones.htm>.
- [13] Mariscotti, M. A.J. et al. – “Investigations with reinforced concrete tomography”. *Structural Faults & Repair-2008*, 12th International Conference and Exhibition, Edinburgh, Scotland, 2008, p. 21.
- [14] Mariscotti, M. A.J.; Husni, R. – “Reinforced concrete tomography and its application to bridge assessment”. *NDE Conference on Civil Engineering*, Ed. por Al-Qadi e Glenn Washer, ASNT, St. Louis, MO, 2006, p. 349-356.
- [15] Pimentel, M., Santos, J., Figueiras, J. – “Inspeção, monitorização e avaliação de segurança da Ponte de N. S. da Guia”. *BE2008 - Encontro Nacional Betão Estrutural 2008*, Guimarães, 2008.
- [16] Pimentel, M., Mariscotti, M., Figueiras, J. – “Inspeção não destrutiva dos cabos de pré-esforço da Ponte de N. S. da Guia através da tomografia por raios gama”. *ASCP'09 – 1º Congresso de Segurança e Conservação de Pontes ASCP*, Lisboa, 2009.