

Verifica della calibrazione relativa dei kV di apparecchiature raggi X

*Pietro Sicurella *, Mario F. Bianchi ***

** OFV, ** Bytest*

SOMMARIO

Negli anni scorsi sono state effettuate alcune prove basate sugli spessori di dimezzamento per quantizzare le differenze di calibrazione dei kV tra varie apparecchiature con discreti risultati in termini relativi tra apparecchiature diverse.

Il requisito della verifica dei kV non era però molto diffuso e compariva solo in una vecchia norma della Snecma del 1991 ancora attiva riferito ad una norma AFNOR di problematica applicazione a causa dell'evoluzione dell'elettronica. Altri richiami a tale verifica provenivano dalle norme EN12544 ma l'argomento non è mai stato trattato dalla maggioranza delle procedure radiografiche forse anche perché molti radiologi, tra cui noi, non comprendono l'importanza di misure elettriche se, tutto sommato, ciò che interessa per la qualità dell'immagine è il contrasto.

Ora però la nuova check list Supplemental del Nadcap attiva da dicembre 2006 al para. 4.3.18 riporta in auge l'argomento con specifico requisito MTU "Does the procedure cover annual calibration of Voltage, Current and Time controls of the X-Ray unit ?"

Questo lavoro si propone, per quanto riguarda i kV, di delineare un metodo per la valutazione della calibrazione delle apparecchiature raggi X continuando ad evitare misure elettriche indirette.

Elementi innovativi sono:

- Un parametro numerico correlato ai kV che semplifica le comparazioni.
- Un valore di riferimento ottenuto con un radioisotopo.
- Uso di curva sensitometrica della pellicola che riduce le esposizioni di prova fino ad una per ogni livello di kV testato.

Introduzione

Rispetto all'abstract di questa memoria riportato come sommario vi sono due novità:

- la MTU ci ha spiegato che annualmente la calibrazione dei kV viene verificata da elettronici esperti e che in altri casi la verifica viene effettuata dal costruttore dell'impianto raggi X.
- La Snecma ha emesso la nuova edizione della norma radiografica DMC0050 ad Aprile 2007 indicando come metodologie per la verifica della calibrazione dei kV le norme EN12544 o equivalenti da sottomettere alla Direzione Qualità Snecma.

Quanto sopra conferma sostanzialmente che la verifica della calibrazione è una questione tipicamente europea visto che anche l'MTU, pur senza dichiararlo esplicitamente, effettua misure elettroniche che probabilmente fanno riferimento alla EN12544-1 con il metodo del divisore di voltaggio oppure si rivolge al costruttore che o adotta la stessa EN12544-1 oppure la EN12544-3 con il metodo spettrometrico. In effetti l'unica norma internazionale che pone dei limiti ai kV massimi impiegabili è la EN444 con il diagramma in Fig.1a. Ciò non vuol dire che in America il problema non sia noto come appare evidente dalla Fig.1b tratta da un diffusissimo testo di addestramento della General Dynamics; d'altronde anni fa' (Summer 1981) il massimo kilovoltaggio ammissibile era un requisito di ASME V come risulta dalla Fig.2. La Fig.3 mostra un raffronto tra la norma EN444 di oggi e la ASME V dell'estate dell'81 con una miglior visibilità dei valori della Fig.2 i cui diagrammi risultano poco leggibili.

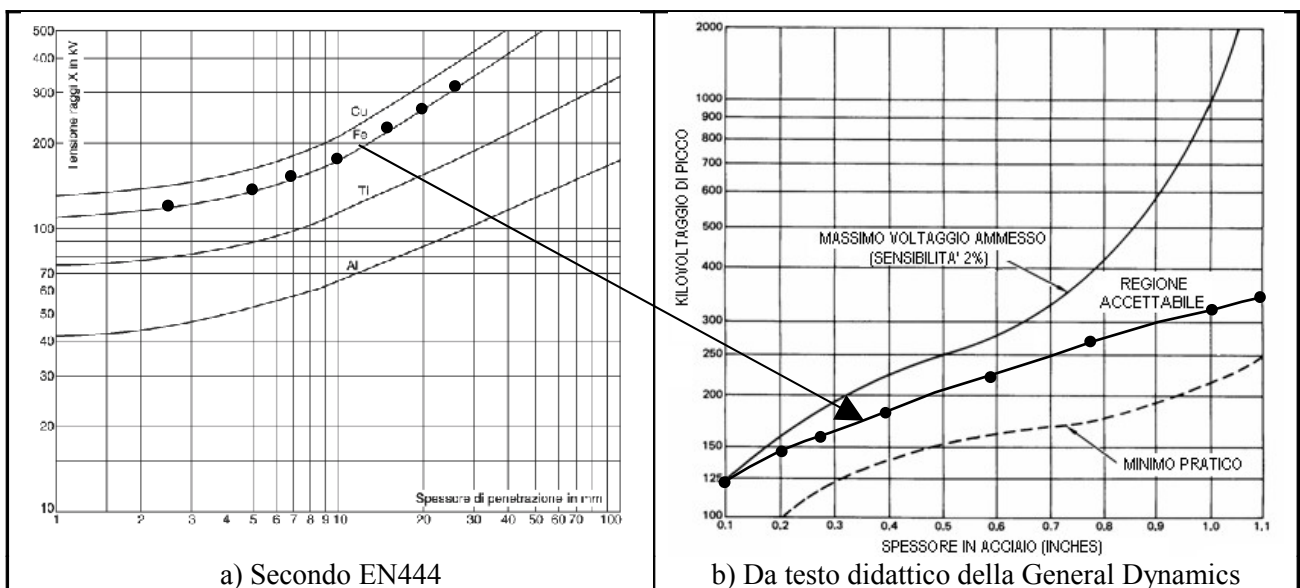


Fig. 1 – Requisito europeo e didattica americana sui kV massimi

Da rilevare che, anche a livello di esperienza su tecniche radiografiche di fonderia, in America vi è una tendenza ad utilizzare kV più alti che in Europa come appare dalla curva punteggiata che abbiamo sovrapposto ai 2 diagrammi della Fig.1 e dalla Fig.3.

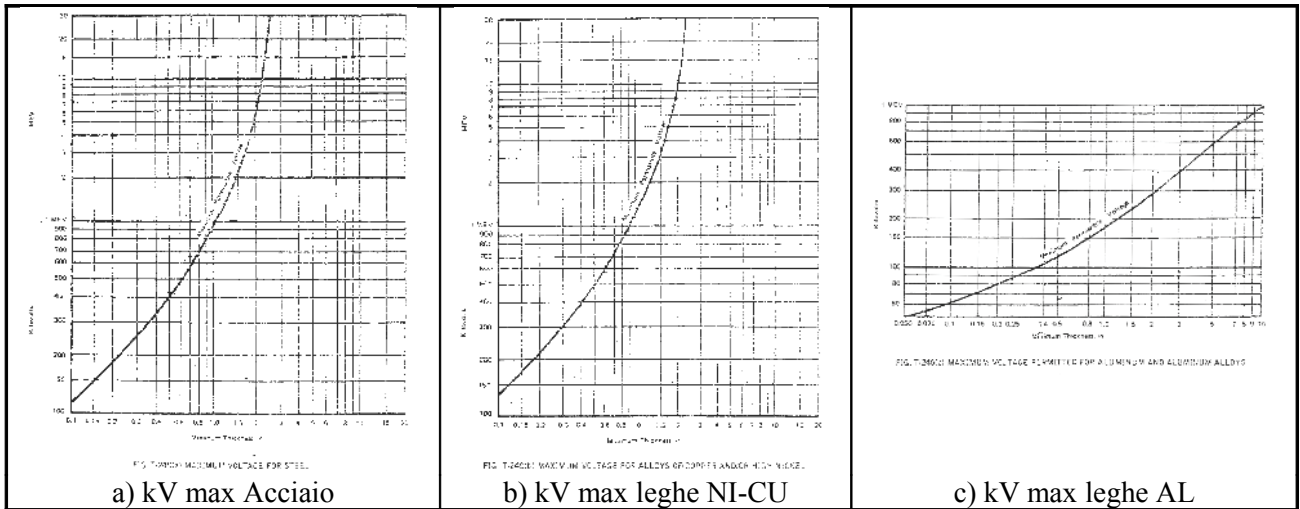


Fig. 2 – Requisito ASME V dell'estate del 1981 poi abolito (non ne è chiara la ragione)

A fronte dei diagrammi riportati è chiaro che, visto che ad esempio secondo EN444 su 4 mm di alluminio 49 kV sono impiegabili e 51 no, la verifica della taratura dei kV non può che essere considerata con attenzione.

Da ricordare poi che per un raffronto serio con radiografie di riferimento sono talvolta prescritti i kV da impiegare: è il caso delle radiografie di riferimento ASTM E192 in cui si indicano 130 kV per radiografare 1/8" di acciaio o lega base nichel e 250 kV per 3/4".

La tolleranza su questi valori di kV non è indicata dalla norma ma la Fig.4, che mostra IQI a fori e relativo profilo dei grigi al variare dei kV, dovrebbe indurre ad una certa cautela ad esagerare.

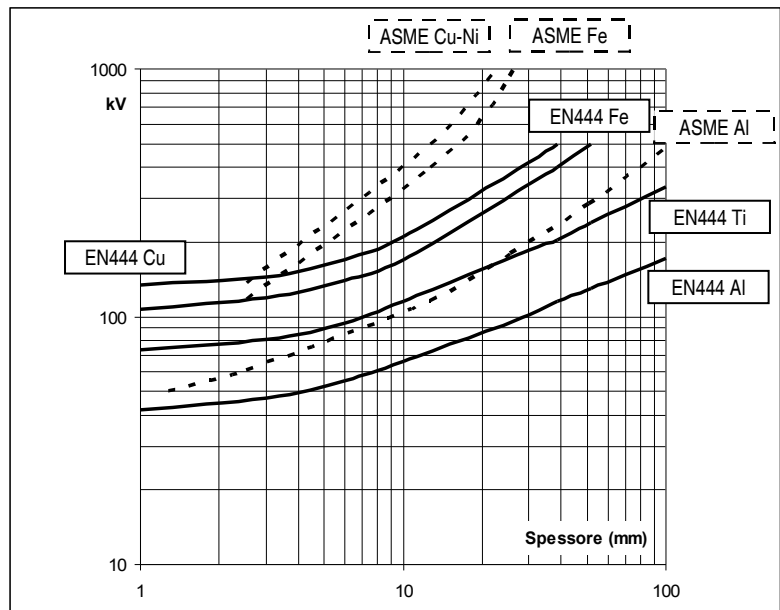


Fig. 3 – Raffronto tra EN444 e ASME V del 1981

A 200 kV ed oltre (pratica non infrequente in microfonderia soprattutto americana) la sottovalutazione dei ritiri è proporzionale al livello di visibilità dei fori.

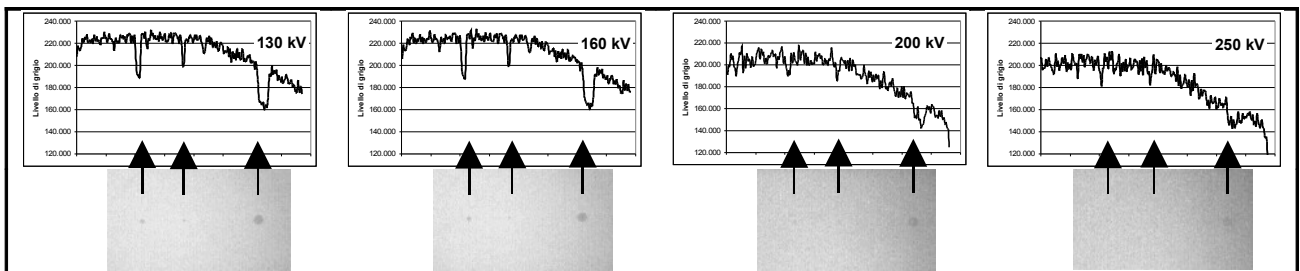


Fig. 4 – Visibilità di un IQI .12 MIL su spessore 1/8" al crescere dei kV da 130 previsti da ASTM E192

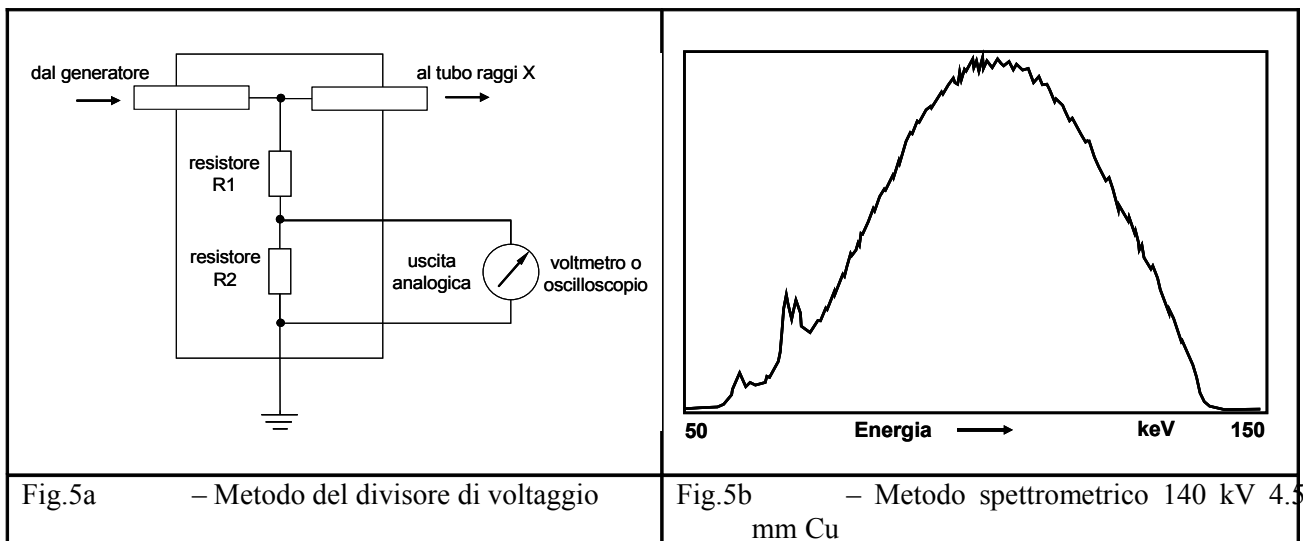
I metodi EN12544

La norma EN12544 sulla Misura e valutazione del voltaggio di un tubo raggi X si divide in 3 parti di cui solo la 1^a e la 3^a sono metodi di misura dei kV veri e propri mentre la 2^a è solo una verifica periodica della costanza di emissione che, in parte, ci è servita per la definizione del metodo di controllo dei kV tramite verifica radiografica diretta del contrasto che poi, ribadiamo, è ciò che dovrebbe realmente interessare al radiologo. Le 3 parti sono le seguenti:

Parte 1 Metodo del divisore di voltaggio (si veda principio in Fig.5a),

Parte 2 Verifica della costanza di emissione col metodo del filtro di alto spessore,

Parte 3 Metodo spettrometrico (si veda spettro tipico in fig.5b).



Per chi desideri più dettagli consigliamo la consultazione delle due norme anche perché a noi interessa poco un approfondimento nel primo caso perché non vediamo la necessità per un radiologo di diventare un esperto di elettronica e nel secondo caso perché non vediamo la necessità di acquisire un altro costoso strumento per giunta, come al solito, da tarare periodicamente quando, ribadiamo, cosa interessa è il contrasto ottenuto o da ottenere e non la taratura dei kV.

L'unica raccomandazione che ci permettiamo è quella, in caso di nuove acquisizioni, di scegliere esclusivamente apparecchiature già predisposte alla misura dei kV con il metodo del divisore di voltaggio o metodo alternativo previsto dal costruttore: a tale riguardo alcuni costruttori garantiscono tale metodo, altri ne propongono di alternativi non normalizzati, altri ancora pongono perplessità sull'utilizzo di tale metodo che comporterebbe solamente una ri-misura della stesso valore già prelevato per gli amperometri sul tavolo di comando garantendo solo la taratura di questi ultimi e non il valore effettivo di alta tensione tra anodo e catodo del tubo radiante.....
...comunque, a prova di audit, si consiglia di farsi rilasciare un certificato col dettaglio del metodo impiegato almeno su un impianto radiogeno in modo, eventualmente, da disporre di una calibrazione indipendente a cui riferire le eventuali misure effettuate con i 2 metodi che descriveremo nel seguito.

Un primo metodo alternativo (Metodo 1)

Alla Conferenza Mondiale NDT di Montreal nel 2004 fu presentata una prima idea di metodo alternativo basata sulla EN12544 Parte 2 e sulla ASTM E94.

Dalla EN12544 Parte 2 è stato tratto il set-up di esposizione e lo spessore del filtro in acciaio per ottenere un fascio semi-monocromatico con energie prossime ai kV di picco (si veda Fig.6).

Dalla ASTM E94 con qualche prova integrativa a bassi kV sono stati tratti gli spessori emivalenti di riferimento che riducono l'intensità del fascio al 50% e che sono strettamente correlati con i kV (si veda Fig.9).

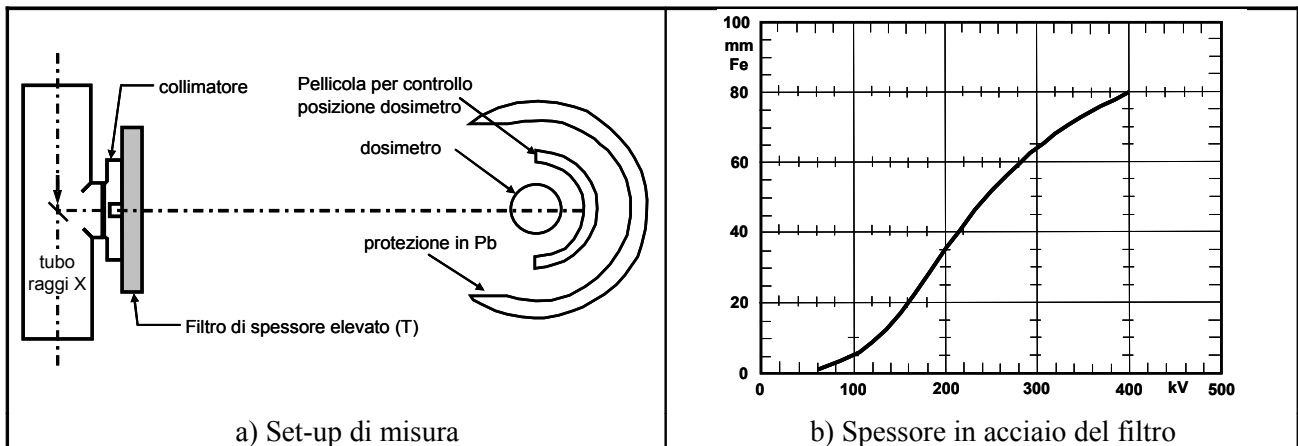


Fig. 6 – Gli spunti tratti dalla EN12544 Parte 2

La Fig.7 fornisce il set-up di prova effettivo con il consiglio di utilizzare:

- solo il centro fascio ($\pm 8^\circ$ max, ovvero 140 mm a 500 FF, 100 mm a 350, ecc.);
- distanza FF ridotta per il notevole assorbimento del filtro;
- pellicole rapide EN584-1 C5 o C6 anche sovrapposte per misurare densità significative.

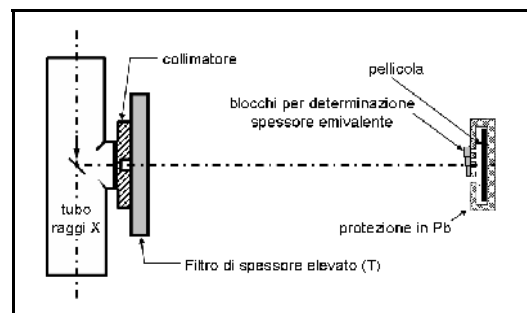


Fig. 7 – Set-up di prova

Il metodo consiste nell'effettuare almeno 2 esposizioni, l'una il doppio dell'altra, determinando così lo spessore di dimezzamento (si veda Fig.8) che permette di determinare il valore dei kV di picco tramite la Fig.9.

L'utilizzo del fascio iper-filtrato tende a porsi in condizioni il più possibile ripetitive allontanandosi però dalle effettive condizioni di prova che portano a radiografie di buona qualità con distanze ridottissime ed anche doppi o tripli films molto rapidi per incrementare la sensibilità di rilievo.

Da rilevare che obiezioni sulla non-ripetitività del rilievo tramite pellicola non sono pertinenti poiché in questo metodo non vengono convertite le densità ottenute con la curva sensitometrica della pellicola ma esclusivamente vengono diagrammate due o più curve $Densità=f(spessore)$ tra cui rilevare la distanza parallela all'asse degli spessori che rappresenta lo spessore emivalente (si veda Fig.8).

Agli eventuali super-scettici consigliamo comunque di tagliare le pellicole di prova da alcune pellicole di grosso formato consecutive contenute nello stesso pacco in modo da essere ragionevolmente certi dell'identico comportamento sensitometrico.

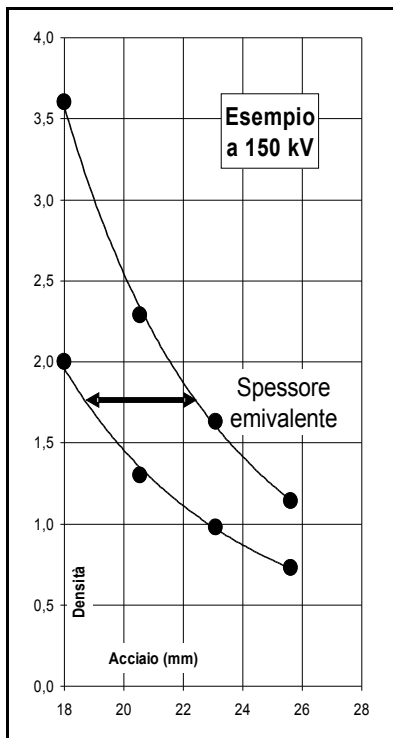


Fig. 8 – Determinazione dello spessore emivalente e dei kV

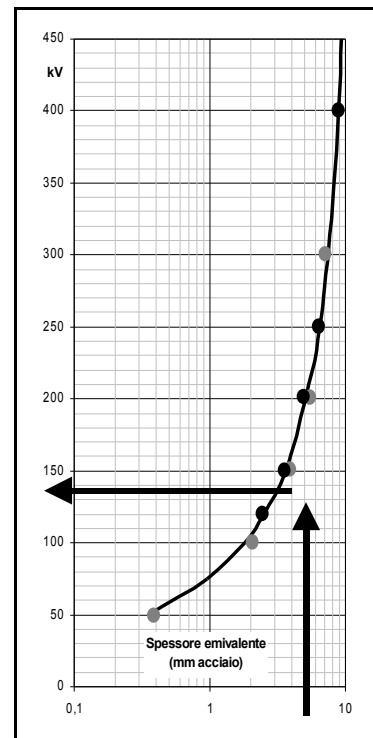


Fig. 9 – Lo spunto tratto dalla ASTM E94 (●) con prove integrative (●)

Il nuovo metodo alternativo (Metodo 2)

Ci siamo chiesti: ma che senso ha determinare lo spessore emivalente di un fascio iper-filtrato che non useremo mai per nessuna radiografia? Non sarebbe meglio valutare il contrasto ottenibile ed ottenuto nelle normali condizioni di prova in modo da paragonare effettivamente un'apparecchiatura all'altra con lo scopo di poter ottenere, se possibile, la stessa radiografia con entrambi in casi reali?

Così abbiamo iniziato ad effettuare esposizioni con il set-up indicato in Fig.7 ma senza il filtro previsto dalla EN12544 in condizioni tipiche di produzione.

La Fig.10a fornisce i risultati di alcune esposizioni reali effettuate su acciaio con raggi X a 217 kV (217 keV è l'energia media del Selenio 75), a 300 kV, e con Selenio75 a 120 cm FF su D4 Pb 0.1 mm. La Fig.10b fornisce il diagramma di esposizione corrispondente per densità 2.5 tratto dalla Fig.10a con impiego di curva sensitometrica della pellicola.

Qui ai super-scettici sull'utilizzo della curva sensitometrica fornita dal fabbricante delle pellicole consigliamo di darsi un po' da fare ricavandosi la curva sensitometrica effettiva nei propri bagni per il tipo film di prova. Noi, dopo averlo fatto, abbiamo ripreso ad impiegare l'ottima ed identica curva fornita dal fabbricante naturalmente continuando ad effettuare i check giornalieri sui bagni per garantirne la stabilità nel tempo secondo ASTM E1742-06 e/o ASTM E999-05 e/o EN584-2.

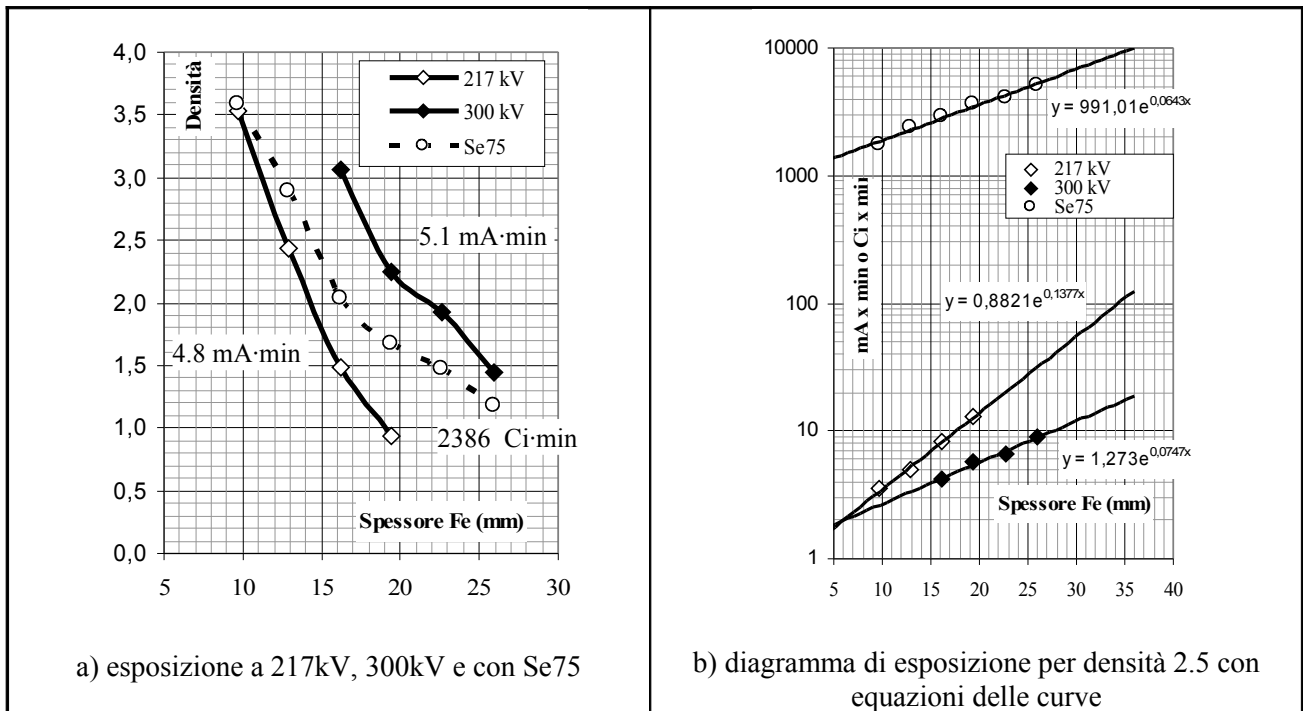


Fig. 10 – Determinazione delle equazioni esponenziali delle curve di esposizione

L'idea è quella di utilizzare l'equazione esponenziale [1] per rappresentare le normali curve di esposizione su un diagramma semilogaritmico. Per chi non avesse dimestichezza con excel o similare anticipiamo che le equazioni sono facilmente ottenibili dopo aver cliccato su un grafico di un foglio excel con "aggiungi linea di tendenza" dal menù "grafico" e successivamente selezionando "esponenziale" e "visualizza equazione" dalle "opzioni".

$$y = a \cdot e^{bx} \quad [1] \quad \text{dove: } y = \text{mA} \cdot \text{minuto} \text{ o } \text{Ci} \cdot \text{minuto}$$

a = coefficiente moltiplicativo corrispondente al punto dove le varie curve intersecano l'asse delle ascisse.

e = base dei logaritmi neperiani corrispondente a ~ 2.718282 .

b = coefficiente esponenziale che controlla la pendenza della curva e che dipende dal contrasto ottenuto ai kV di prova.

x = spessore in mm.

Tale approccio è supportato da una prova effettuata a 150 kV che ha fornito un coefficiente b_{kV} semicostante con esposizioni a 6 a 24 a 96 mA·minuto come mostrato in Fig.11:

- media 0,1793
- a 6, 0.1875 (+4.6%)
- a 12, 0.1656 (-7.7%)
- a 96, 0.1849 (+3.1%).

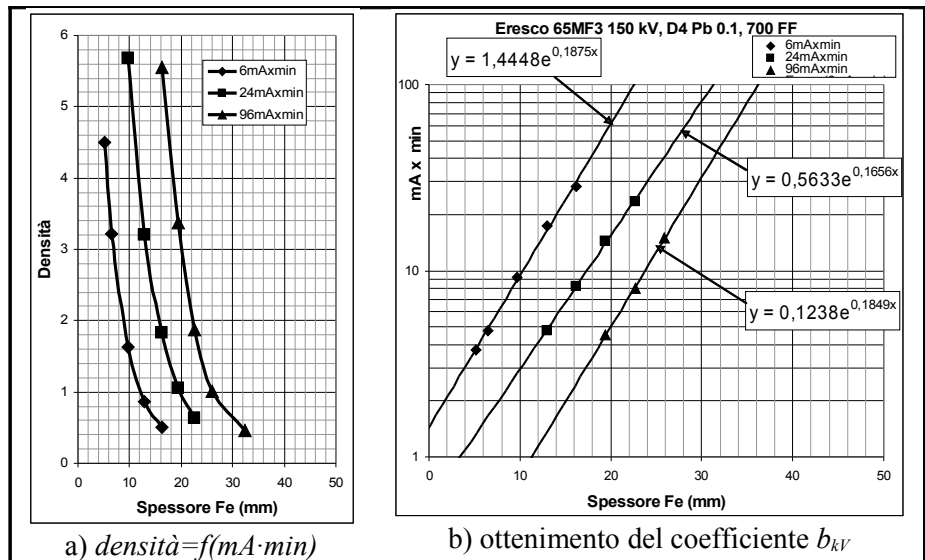


Fig. 11 – Semi-invariabilità di b_{kV} al variare dei mA·minuto

Quindi, con una sola esposizione ai kV da testare è possibile determinare il coefficiente b_{kV} per l'apparecchiatura in prova confrontandolo con un'altra apparecchiatura. Per chi desidera una maggior precisione o rigore, al limite anche a scapito delle condizioni reali di prova:

- possono essere effettuate 3 esposizioni come in Fig.11 determinando b_{kV} medio;
- possono essere effettuate 3 esposizioni come in Fig.11 per determinare lo spessore di dimezzamento da correlare con Fig.9 (in Fig.11 $14/4 \cong 3.5$ mm contro circa 3.8 della Fig.9 agli stessi 150 kV dopo il filtro ad altro spessore);
- può essere applicato direttamente il Metodo 1 basato solo sui kV di picco con fascio iper-filtrato o, eventualmente, il Metodo 2 come da esempio in Fig.12 tratto da Fig.8 con b_{kV} medio 0.1411 più basso di 0.1793 ottenuto da Fig.11b per il minor contrasto dovuto all'iper-filtrazione di Fig.8;
- può essere effettuata una determinazione di verifica con Se75 che, per le caratteristiche emissive di un radioisotopo, dovrebbe sempre fornire un valore di b_{kV} prossimo a Fig.10b.

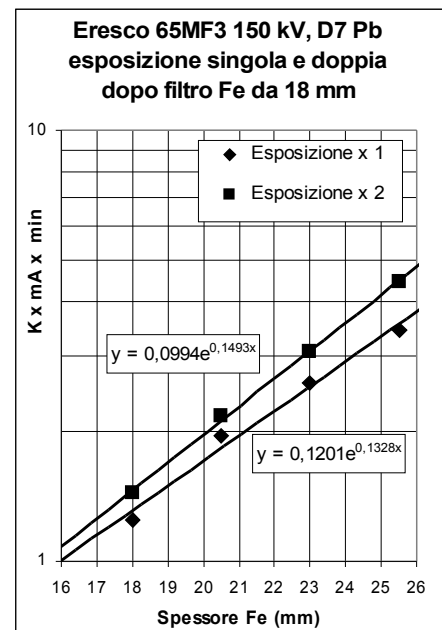


Fig. 12 – b_{kV} con iper-filtrazione da Metodo 1

In Fig.13 si fornisce il coefficiente b_{kV} corrispondente agli spessori emivalenti indicati in Fig.9 basata su ASTM E94: essi non dovrebbero essere superati con il Metodo 2 che normalmente si applica in un range di spessore più basso dove il fascio tende ancora ad uno spettro più ampio e dove è bene ricercare più la comparazione tra due tipi di impianti piuttosto che ideali valori assoluti di taratura che con la qualità della radiografia ottenuta a normali parametri operativi hanno poco a che fare.

Considerando poi la tolleranza di $\pm 15\%$ sui kV che la ASTM E2104-01 indica per tecniche di esposizione equivalenti a parità degli altri parametri di esposizione, si può ipotizzare una equivalente tolleranza per b_{kV} come dalla Tabella 1 che è sufficientemente compatibile con le incertezze di misura del tipo emerso in Fig.11b:

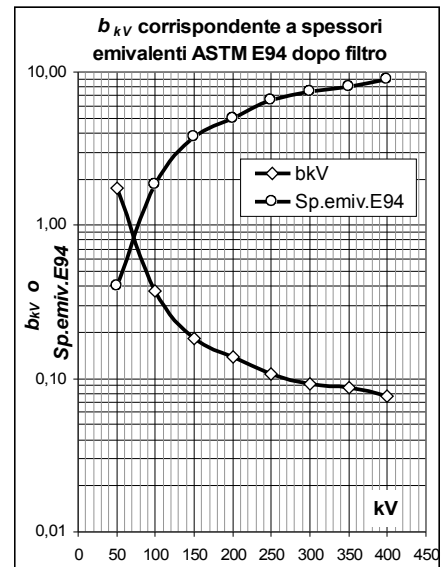


Fig. 13 – b_{kV} e sp.emivalente E94

Coefficiente b_{kV}	50 kV	100 kV	200 kV	300 kV	400 kV
Max corrispondente a -15% kV	Non determinato	0.550 -48.2%	0.158 -14.5%	0.105 -12.9%	0.089 -12.7%
Nominale	1.738	0.371	0.138	0.093	0.079
Min corrispondente a +15% kV	1.380 +20.6%	0.275 +25.9%	0.117 +15.2%	0.089 +4.3%	Non determinato

Tab. 1 – Tolleranze di b_{kV} corrispondenti a tolleranza kV $\pm 15\%$ secondo ASTM E2104-01

Prime determinazioni nominali basate sui diagrammi delle apparecchiature

Il diagramma in Fig.14 fornisce il coefficiente b_{kV} ricavato dai diagrammi di esposizione forniti dai costruttori per 13 diversi impianti raggi X.

In generale il contrasto desumibile (e quindi i kV che l'hanno prodotto) appare paragonabile: sul diagramma abbiamo provato a sovrapporre una banda grigia di valori assimilabili.

Talvolta alcuni impianti si discostano dagli altri. Si veda ad esempio il Balteau GFD 165 che sembra fornire valori di b_{kV} maggiori e, di conseguenza, più contrasto a parità di kilovtaggio: potrebbe essere un caso di sovrataratura dei kV rispetto agli altri impianti (kV inferiori di quelli visualizzati a display dell'unità di comando).

All'opposto il Gilardoni CPX 160 e Yxlon Smart 300 HP con valori di b_{kV} inferiori e, di conseguenza, meno contrasto a parità di kilovtaggio: potrebbe essere un caso di sottotaratura dei kV rispetto agli altri impianti (kV maggiori di quelli visualizzati a display dell'unità di comando).

Da precisare che eventuali differenze di taratura sui kV non sono un merito o un demerito del costruttore ma solo modi di funzionare delle apparecchiature raggi X di cui un buon radiologo dovrebbe tenere conto nell'ottica di effettuare esami affidabili con la produzione di radiografie a qualità controllata e ripetibile.

Prime conclusioni

Al momento si può dire che il primo obiettivo di definire metodi di verifica del contrasto e dei kV alternativi alla EN12544 è stato raggiunto. Purtroppo, per motivi di tempo, non è stato possibile ancora un raffronto sperimentale che verrà presentato durante la Conferenza PnD di Milano in Ottobre e che, presumibilmente, riguarderà la comparazione tra apparecchiature da 160 kV in dotazione ad OFV ed a Bytest nell'ottica di produrre radiografie identiche a 50 km di distanza con apparecchiature diverse di cui però sia noto il comportamento $contrasto = f(kV)$.

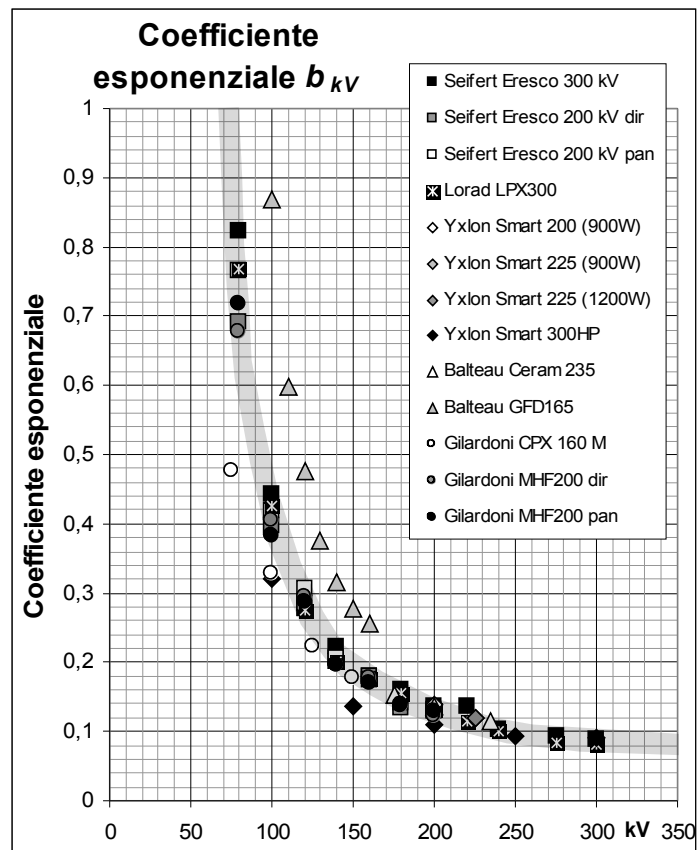


Fig. 13 – Coefficiente b_{kV} di varie apparecchiature