

CORSO DI METODI DI MISURA DELLA DOSE IN RADIOTERAPIA

Paola Fattibene: paola.fattibene@iss.it

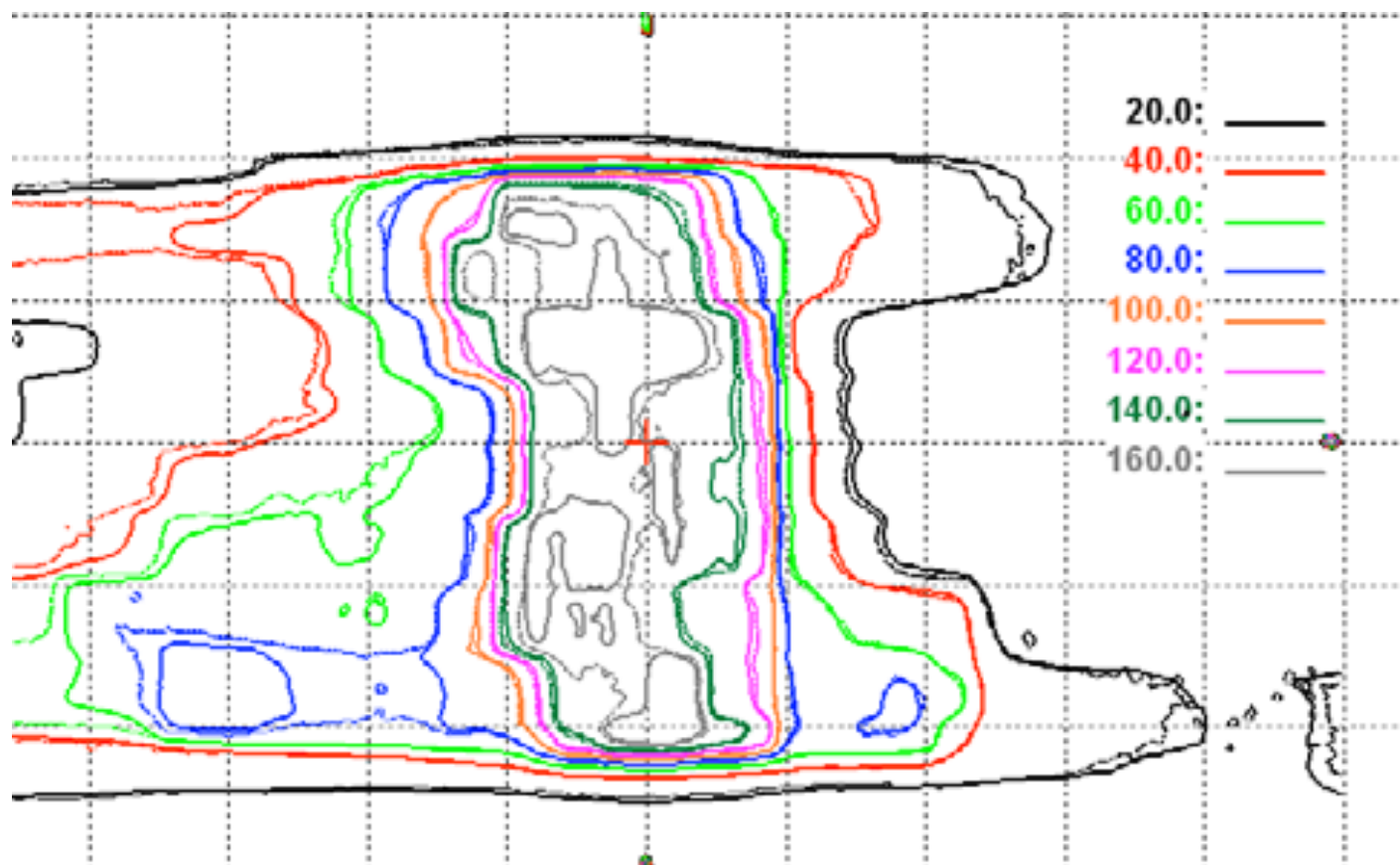
Cinzia De Angelis: cinzia.deangelis@iss.it

Film dosimetria

Dosimetria 2D

- ❖ Necessità di verifiche planari per confronto tra la distribuzione di dose pianificata e effettivamente erogata
- ❖ Necessità di disporre di un rivelatore con adeguata risoluzione spaziale, in grado di funzionare in integrazione di dose, con risposta indipendente dal rateo di dose e dall'energia.
- ❖ Possibilità di correlazione dose-risposta

Applicazione



Small Field Dosimetry – High Spatial Resolution

Fattori da considerare nella dosimetria 2D

Sensibilità

Uniformità

Risoluzione spaziale

Dipendenza dall'energia/LET

Tessuto equivalenza

Dipendenza dal rateo di dose

Sensibilità alla luce

Stabilità del segnale

Dipendenza dalle condizioni ambientali: temperatura, umidità, ...

densità ottica

Film dosimetria si basa sulla misura di densità ottica (OD)

$$OD = \log_{10} \left(\frac{I_0}{I} \right)$$

I_0 (I) intensità di luce trasmessa senza film (con film)

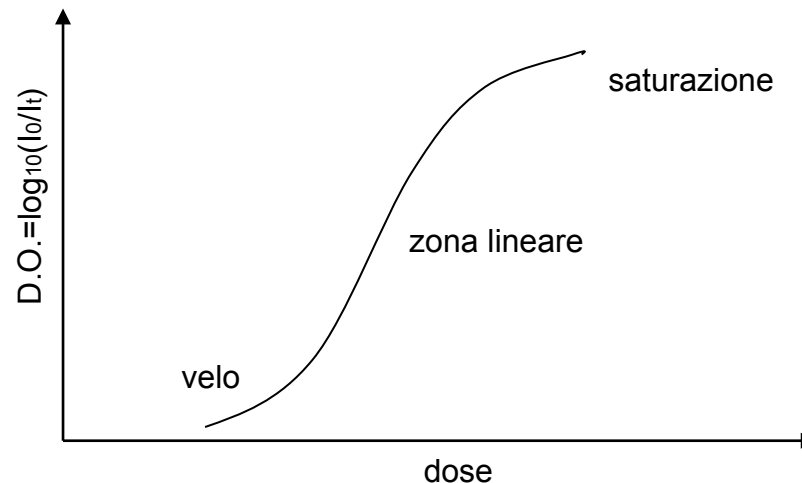
Densità ottica netta

La grandezza di interesse è la densità ottica netta (NOD) valutata sottraendo la densità ottica corrispondente a base e velo della pellicola, ottenuta sviluppando, nelle stesse condizioni la pellicola non esposta, dalla misura della pellicola esposta

$$NOD = \log_{10} \left(\frac{I_0}{I_e} \right) - \log_{10} \left(\frac{I_0}{I_u} \right) = \log_{10} \left(\frac{I_u}{I_e} \right)$$

Curva sensitometrica

Curva sensitometrica (*relazione dose – risposta*)



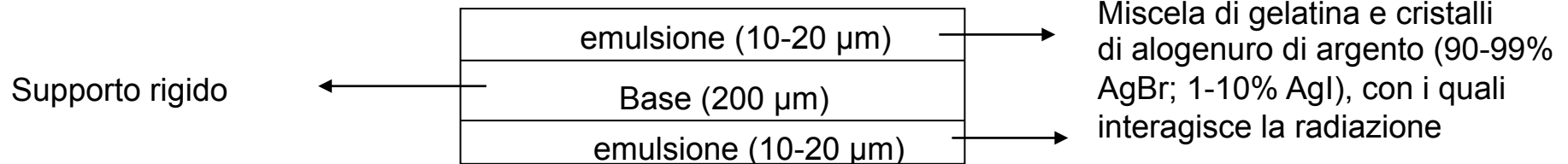
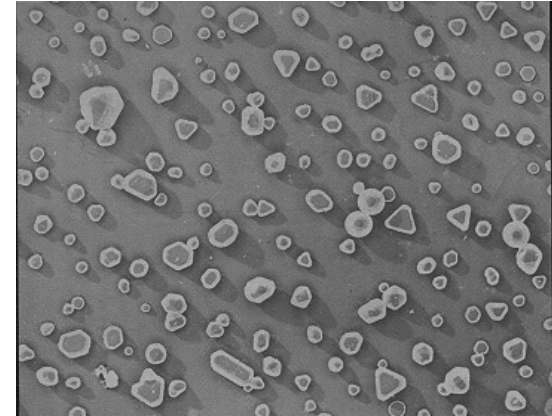
The curve significantly departs from linearity only when the exposure becomes so great that appreciable energy is wasted on grains that have already been made developable. For commercially available fine-grain x-ray films the density vs dose curve may be essentially linear up to densities of 2.0 or even higher.

In dosimetry, the blackening curve should be approximately linear with dose and approximately independent of the dose rate and radiation energy.

The OD of dosimetric films depends on film storage, processing and reading conditions.

Film radiografici

Struttura



The function of the film base is to provide a support for the fragile photographic emulsion.

Gelatine

- Keeps grains well dispersed
- prevents clumping and sedimentation of grains
- protects the unexposed grains from reduction by a developer
- allows easy processing of exposed grains
- is neutral to the grains in terms of fogging, loss of sensitivity

Crystal size $\approx 1.0 - 1.5 \mu\text{m}$; in x-ray films $\approx 10^9 - 10^{12}$ grains/cm³; each grain $\approx 10^6 - 10^7$ silver ions

Trattamento della pellicola radiografica

L'esposizione alle radiazioni → Immagine latente →

Sviluppo (processo chimico) → Amplificazione dell'immagine latente

Formazione dell'immagine latente

Nell'interazione radiazione ionizzazione-emulsione radiografica si liberano elettroni in grado di muoversi nella banda di conduzione.

Cattura degli elettroni liberi da parte di difetti nel cristallo (AgS, AgI...) con formazione immagine latente, costituita da cluster di atomi di Ag (Ag⁺ originariamente in posizione interstiziale)

Trattamento della pellicola radiografica

-Sviluppo: ioni Ag^+ nei cluster sono convertiti in atomi Ag. The latent image Ag^+ are developed much more rapidly. Dilute acetic acid stops all reaction and further development

- Fissaggio

- Lavaggio

- Essiccamento

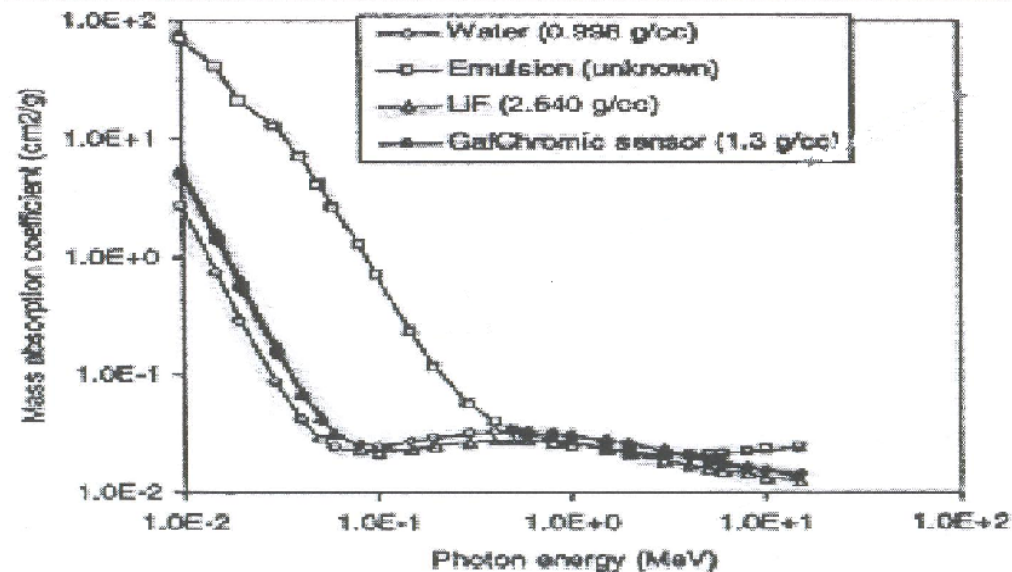
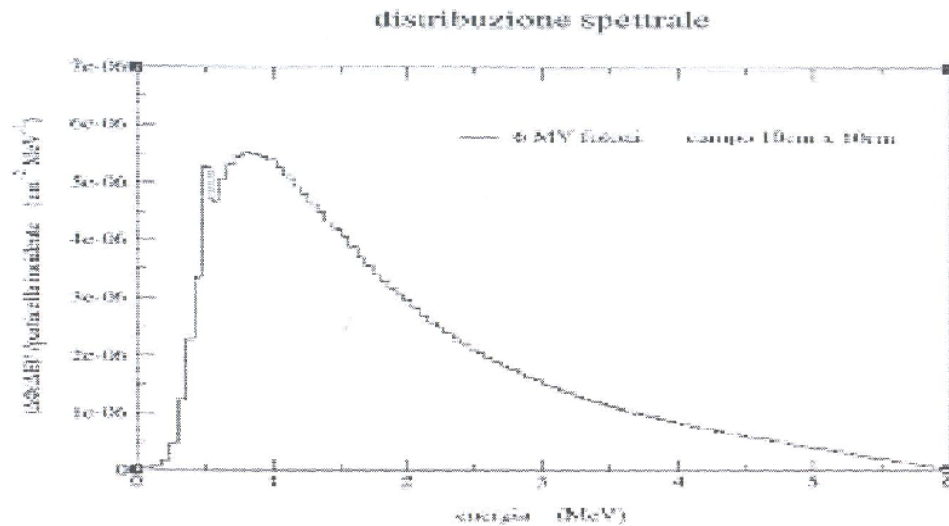
I diversi passi del processo possono influenzare l'accuratezza e la riproducibilità della misura.

Fading

The latent image may fade over a period of time due to the dissociation of silver clusters of the latent image. Fading is greatly reduced by drying

- The American National Standards Institute (ANSI PH 2.9-1974) recommends that, for carrying out sensitometry of photosensitive materials, the film should be processed not sooner than 30 min nor more than 8 hours after exposure.
- The speed of the decay of the latent image is increased by higher temperatures and humidities and decreased by lower temperatures and humidities and storage in an oxygen-free environment (in an inert gas or in a vacuum).

Film radiografici



Materiale sensibile ad alto Z, elevata sezione d'urto per effetto fotoelettrico



Elevata sensibilità verso fotoni di bassa E



Sovrarisposta nelle regioni con elevata presenza di componente di radiazione diffusa



Dipendenza della curva sensitometrica da:

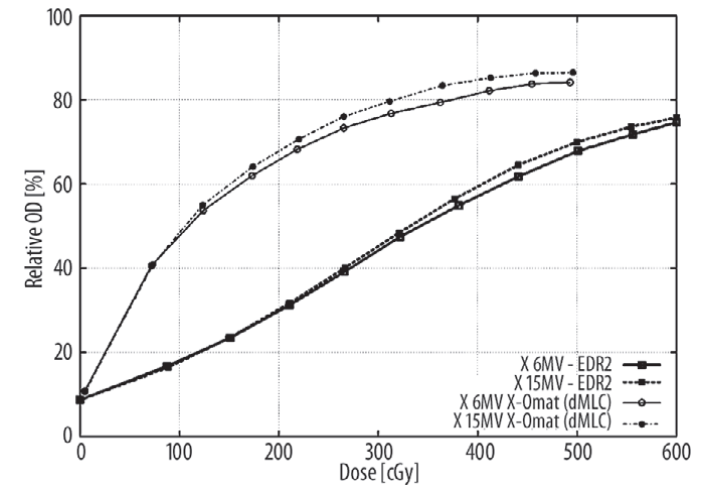
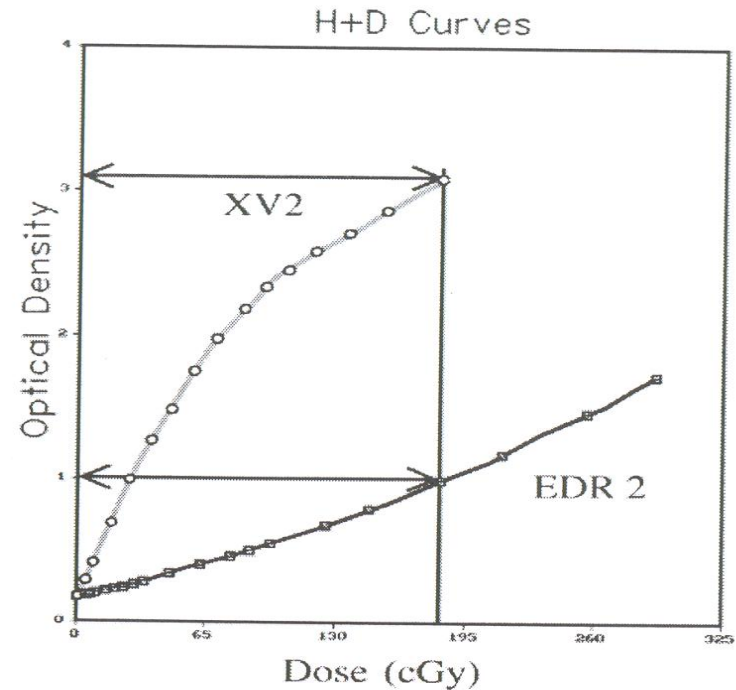
- dimensioni del campo
- Profondità di misura
- componenti diffuse da lamelle e collimatori

Confronto film radiografici

- XV2 (30.5 x 24.5 cm²):
Intervallo di dose di utilizzo 5 – 100 cGy
- EDR2 (30.5 x 24.5 cm²):
Intervallo di dose di utilizzo 25 – 400 cGy

EDR2 minore sensibilità delle XV2

EDR2 sembrano avere minore dipendenza dallo spettro della radiazione incidente e dalle condizioni di sviluppo



Confronto film radiografici

Differenza principale: i granuli di AgBr presenti nelle EDR2 hanno dimensioni circa 1/10 rispetto a quelli presenti nelle XV2, sono più omogenei e la quantità di alogenuro totale è circa la metà => le EDR2 sono meno sensibili delle XV2.

Risultati di letteratura

Sono molto contraddittori riguardo alla dipendenza della curva sensitometrica da profondità di misura, direzione di incidenza rispetto al piano del film, dimensioni del campo di radiazione, condizioni di sviluppo del film, ecc ecc ...

La film dosimetria è complessa, un confronto tra risultati differenti può essere posto solo nelle stesse condizioni di misura (profondità, dimensioni dei campi, ecc.)

Vantaggi film radiografici

- alta risoluzione spaziale
- facile da maneggiare
- Lettura non distruttiva
- Informazione sulla distribuzione 2-D con singola esposizione
- Large area dosimetry
- Linearity of dose (over a short dose range, OD can be treated linear with dose for most films)
- Indipendenza della risposta dal rateo di dose

Svantaggi film radiografici

- Necessità di sviluppo post irradiazione
- Dipendenza dall'energia e dallo spettro degli elettroni incidenti
- Le diverse fasi dello sviluppo e lettura possono influenzare l'accuratezza e la riproducibilità della misura.
- Risposta lineare in un ristretto range di dose

Il problema principale è quello della dipendenza della curva di risposta densità ottica – dose (curva sensitometrica) dalla qualità spettrale del fascio incidente che cambia con la profondità e con le dimensioni del campo di radiazione.

The calibration of the film is time-consuming. It has been suggested to perform it during every session in order to minimize the errors due to film storage, exposure conditions, film developer, and scanner variations (whose contribution to the error in film dosimetry has been evaluated to be around 8%).

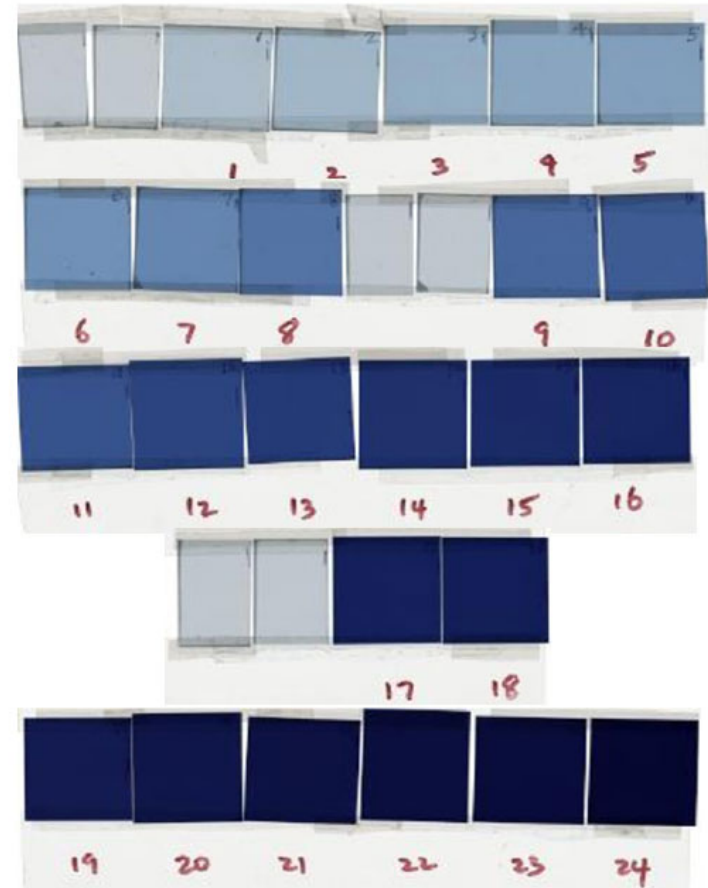
Problemi legati alla film dosimetria

Dependence of optical density (OD) on:

- Emulsion differences amongst films of different batches, films of the same batch or even in the same film;
- Densitometer/Digitizer artifacts
- Chemical processing
 - developer chemistry and temperature
 - processing time
 - drying conditions
- Sensitivity to environment
 - High temperature & humidity creating fading
 - Storage stability
- Microbiological growth in gelatin

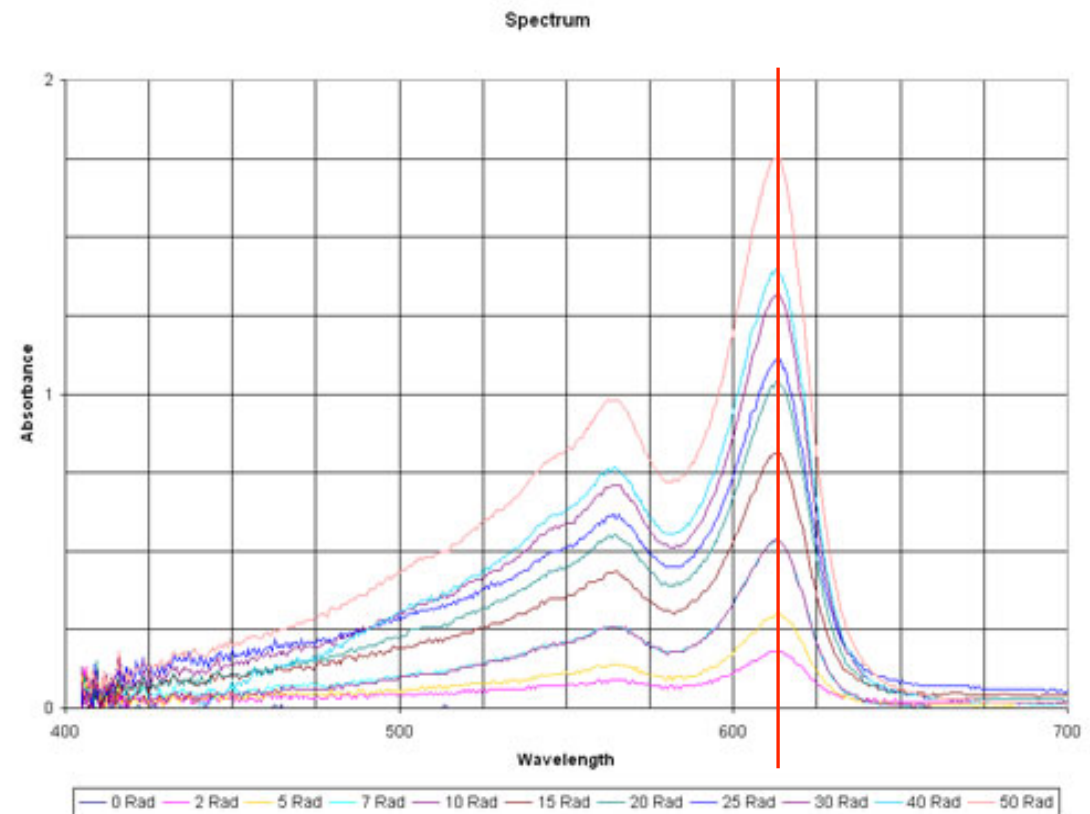
Rivelatori radiocromici (caratteristiche principali)

- Sono pellicole trasparenti di composizione tessuto equivalente ($6 < Z_{eff} < 7$)
- Consistono di un singolo o doppio spessore di materiale sensibile alle radiazioni.
- Rispondono alle radiazioni colorandosi di blu a seguito di un processo di polimerizzazione di monomeri di monocristalli organici.
- Non necessitano di processi di sviluppo (camera oscura, agenti chimici)



Rivelatori radiocromici (caratteristiche principali)

- L'intensità del colore cresce proporzionalmente con la dose assorbita.
- Risposta indipendente dal dose-rate e dal frazionamento
- Possibilità di essere tagliati e modellati in condizioni di luce normale
- Possibilità di essere immersi direttamente in acqua



film radiocromici prevalentemente impiegati

In radiologia (fotoni kV)

GAFCHROMIC XR-RV3

Nominal dose range: 0.05- 15 Gy

GAFCHROMIC XR-QA2

Nominal dose range: 0.001-0.2 Gy

In radioterapia (fotoni MV, e⁻, p)

GAFCHROMIC EBT2

Nominal dose range: 1 cGy- >40Gy

GAFCHROMIC “EBT3”

Nominal dose range: 1cGy- >40Gy

GAFCHROMIC MD-55-2 (aka NMD-55)

Nominal dose range: 2-100 Gy

HD-810

Nominal dose range: 10-400 Gy

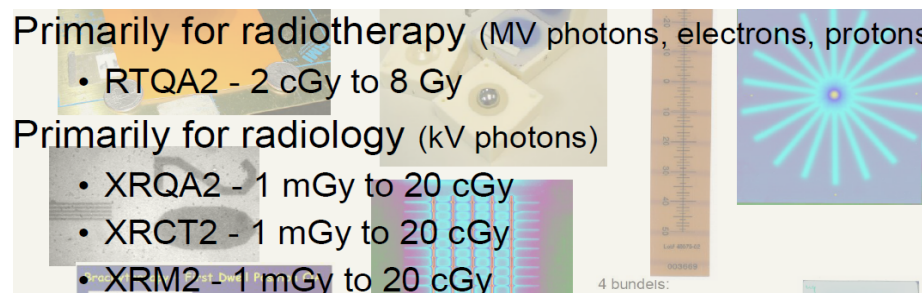
Beam Location

Primarily for radiotherapy (MV photons, electrons, protons)

- RTQA2 - 2 cGy to 8 Gy

Primarily for radiology (kV photons)

- XRQA2 - 1 mGy to 20 cGy
- XRCT2 - 1 mGy to 20 cGy
- XRM2 - 1 mGy to 20 cGy



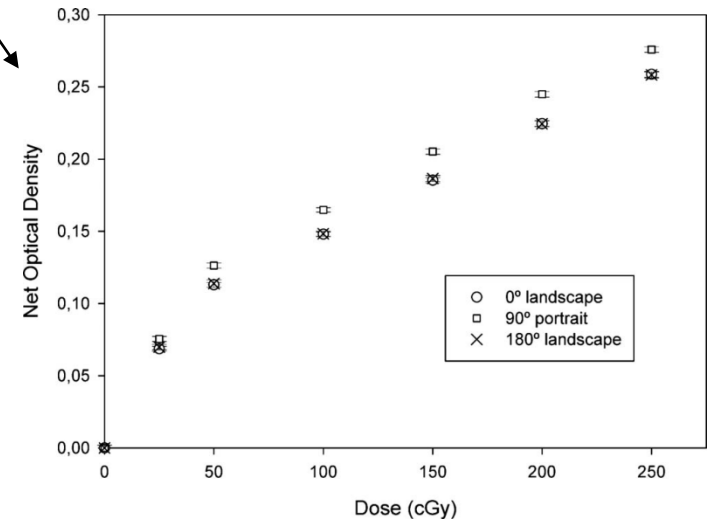
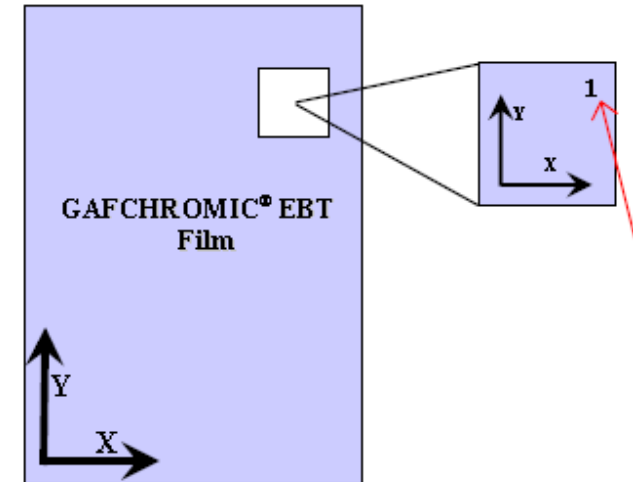
Polimerizzazione

- Componente attiva: diacetilene nello stato cristallino
- Radiazione → processo di polimerizzazione → polimero colorato : polidiacetilene

<i>Film Type</i>	<i>Recommended energy range^a</i>	<i>Recommended dose range^a</i>	<i>Chemical composition^a</i>	<i>Structural layers^a</i>
EBT	kV–MV	0.01–8 Gy	C 42.3% H 39.7% O 16.2% N 1.1% Li 0.3% Cl 0.3% (Z_{eff} 6.98%)	Clear polyester (97 μm) Active layer (17 μm) Surface layer (6 μm) Active Layer (17 μm) Clear polyester (97 μm)
XR-RV2	30 kV–30 MV ^b	0.01–10 Gy	Not available	Clear yellow-dyed polyester (97 μm) Adhesive Surface layer (3 μm) Active layer (17 μm) Opaque white polyester (97 μm)
XR-QA	20 kVp–200 kVp	0.001–0.2 Gy ^a	As per EBT with high Z halides added to sensitive layer ⁽¹⁷⁾	Clear polyester (97 μm) Active layer (25 μm) Surface layer (5 μm) Surface layer (5 μm) Active layer (25 μm) Opaque white polyester (97 μm)

Utilizzo film Gafchromici

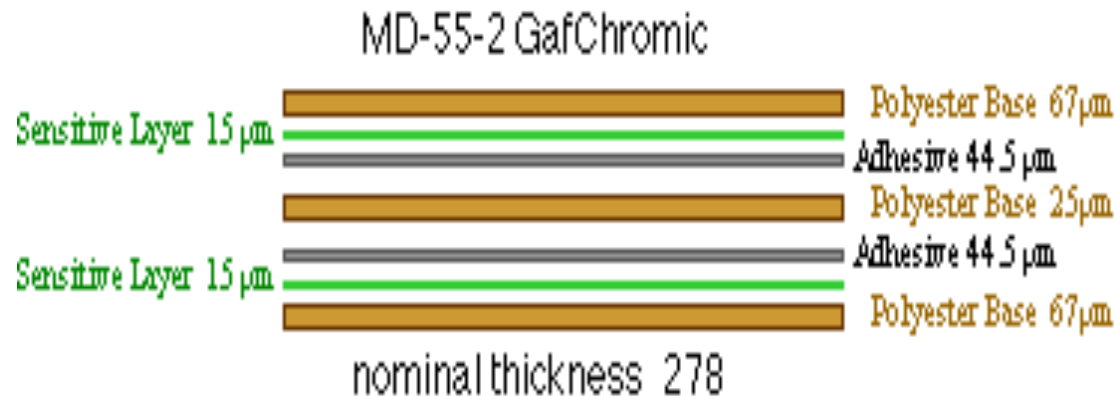
- Taglio delle pellicole possibile. Aspettare 1-2 giorni dopo il taglio prima dell'irraggiamento i film.
- Attenzione a mantenere l'orientazione, variazioni della risposta fino al 10%
- E' consentita l'esposizione alla luce in ambienti interni (evitare luce solare diretta)
- E' consentita l'esposizione a temperature fino a 50-60°C
- I film rispondono all'esposizione entro pochi ms. Variazione della risposta con il tempo → control time between irradiation & readout



Misura film radiocromici

- Misura con uno scanner piano ordinario a trasmissione
- La risposta dello scanner non è piatta sull'intera superficie dello scanner.
- La regione a maggiore omogeneità è quella centrale. Si raccomanda, per la misura, di posizionare i film in tale regione comunque lontano dai bordi.
- The field flatness of an individual scanner is consistent, and can be characterized and compensated.

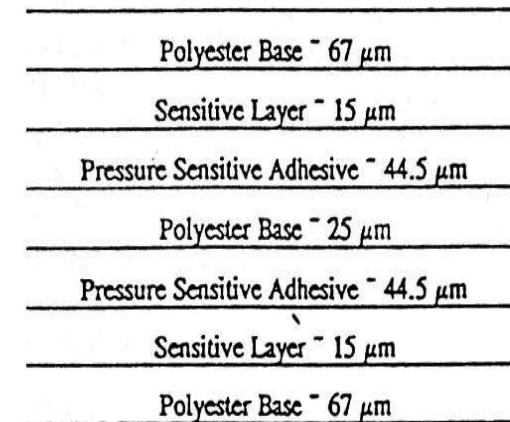
Film radiocromici: MD55-2



Struttura stratificata: basi di poliestere (due strati di 67 μm, uno centrale di 25 μm), strati sensibili (due strati di 15 μm) e strati di adesivo (due strati di 44.5 μm di spessore).

Elemento sensibile: un idrocarburo aromatico composto da elementi a basso numero atomico (H, C, O, N), le caratteristiche sono quelle di un materiale quasi "acqua equivalente" con numero atomico efficace $Z_{\text{eff}} = 6,2 \pm 0,3$.

MD - 55 - 2



Approximate Composition

Polyester Base:	Carbon	45 Atom %
	Hydrogen	36 Atom %
	Oxygen	19 Atom %
Sensitive Layer:	Carbon	31 Atom %
	Hydrogen	56 Atom %
	Nitrogen	5 Atom %
Adhesive Layer:	Oxygen	8 Atom %
	Carbon	33 Atom %
	Hydrogen	50 Atom %
Conductive Layer:	Oxygen	17 Atom %
	Indium Tin Oxide	

EBT

- Molto più sensibili (range raccomandato 1 – 300 cGy, ma adatte all'impiego fino a 800 cGy);
- Tempo di annerimento totale \approx 10 ore;
- Buona omogeneità (\approx 1.5%);
- Acqua-equivalente ($Z_{\text{eff}} \approx 7$)
- Scarsa dipendenza dallo spettro energetico della radiazione incidente;
- Assorbimento massimo nel rosso (636 nm);

EBT2

La dimensione della pellicola è 8" x 10" (e anche 14" x 17")

Caratteristiche principali

Pellicole a trasmissione

Range sensibilità dose:

1cGy – 10 Gy (canale rosso)

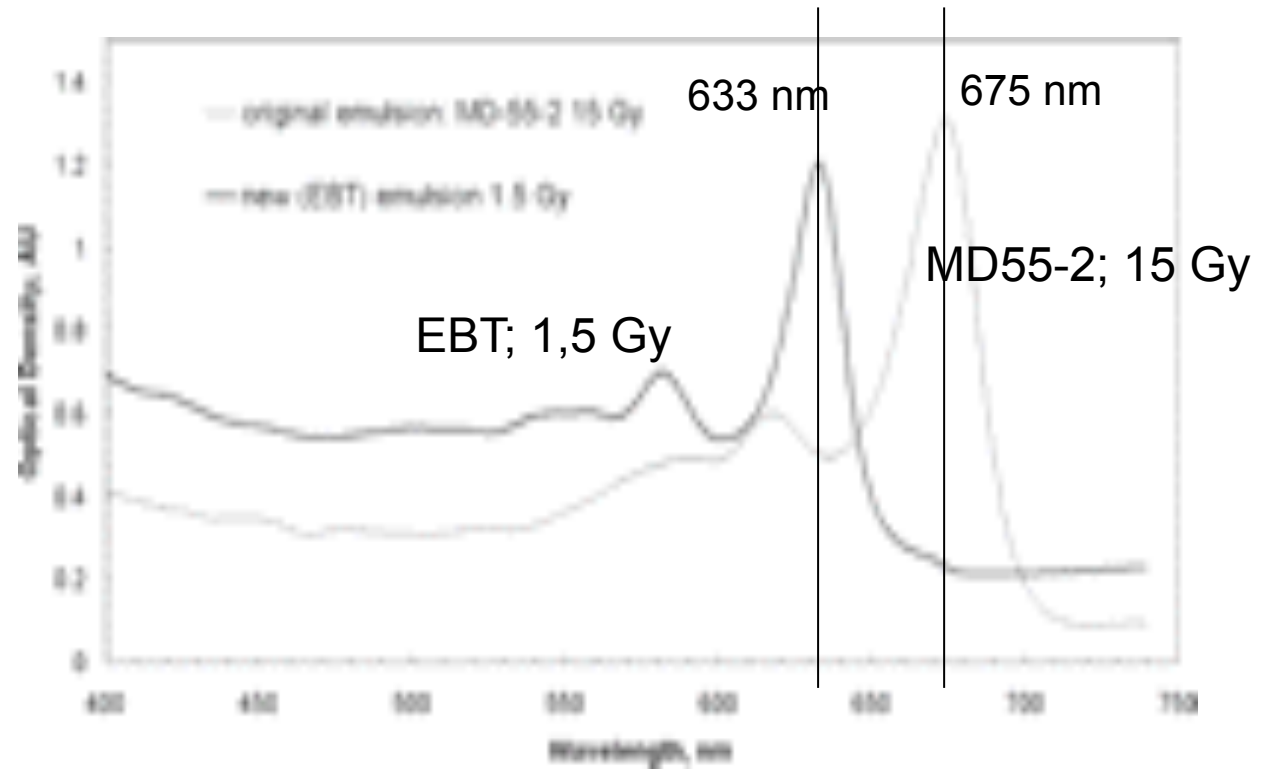
Fino a 40 Gy (canale verde)

Polyester Overlamine 50µm
Adhesive layer 25µm
topcoat 5µm
Active layer 30µm
Polyester substrate 175µm

$Z_{eff} \approx 7$

- Autosviluppo completo dopo 150 min.
- Uniformità <1%
- Risposta indipendente dall'energia
- Alta risoluzione spaziale
- Insensibile alla luce (10 volte meno delle EBT)

EBT vs Older Emulsion



Maggiore sensibilità

Risposta vs dose

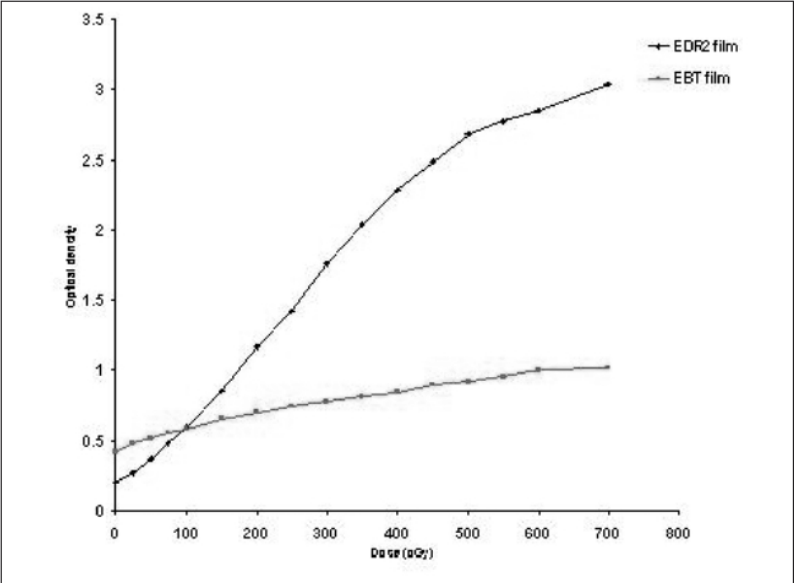
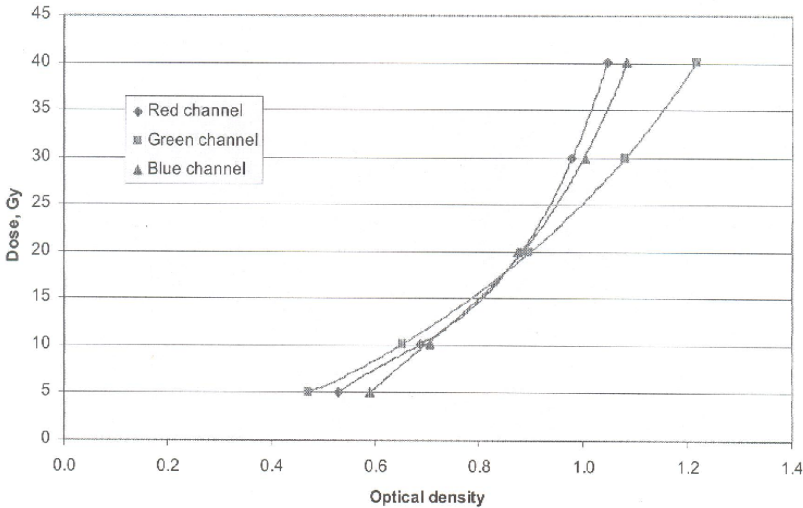
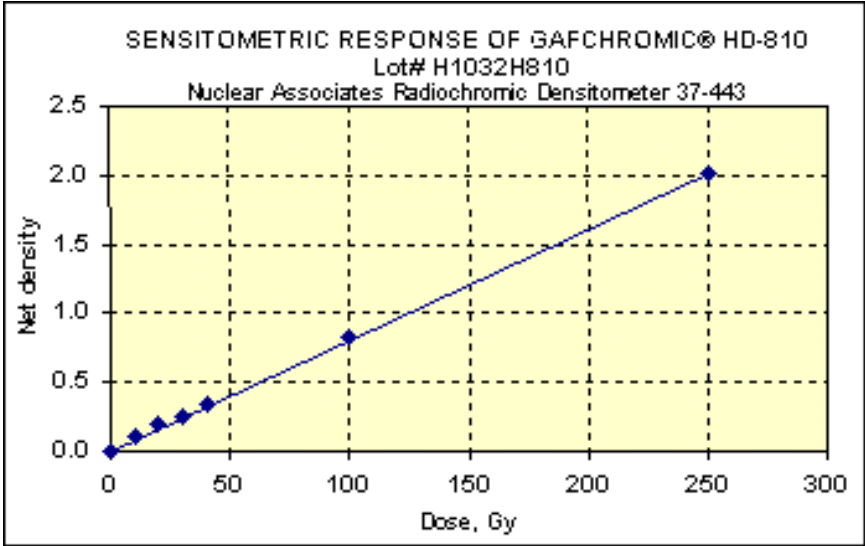
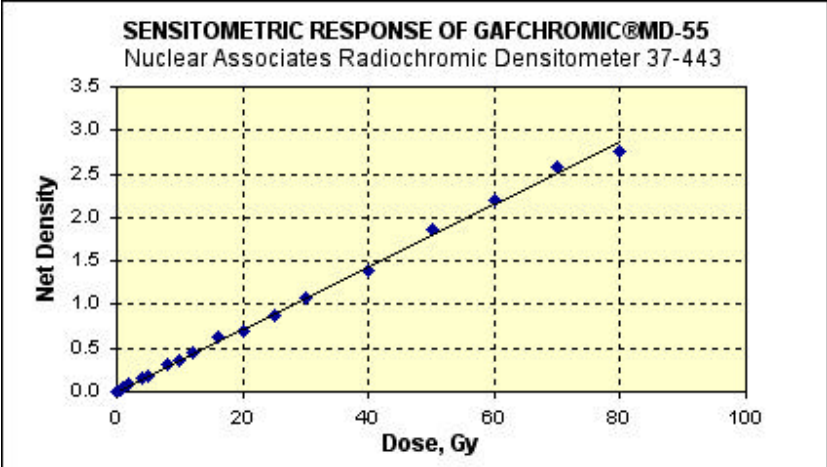
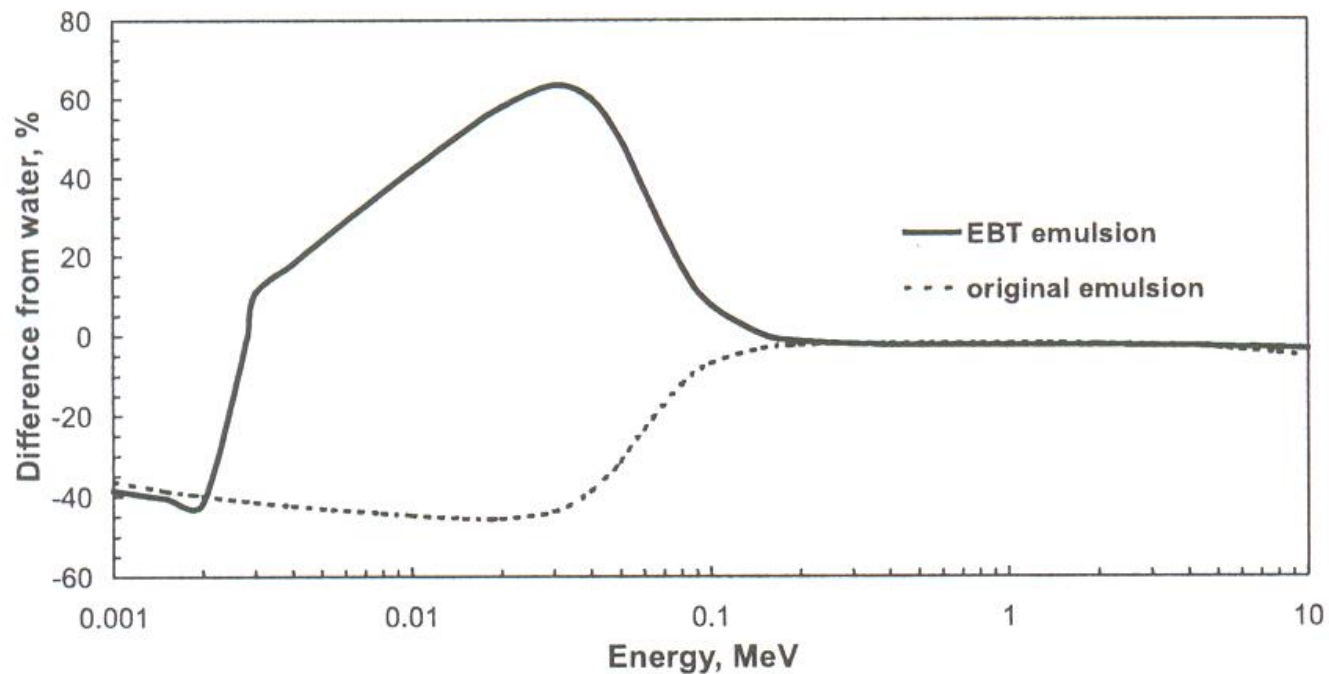


Figure 1: Sensitometric response of EDR2 and EBT films



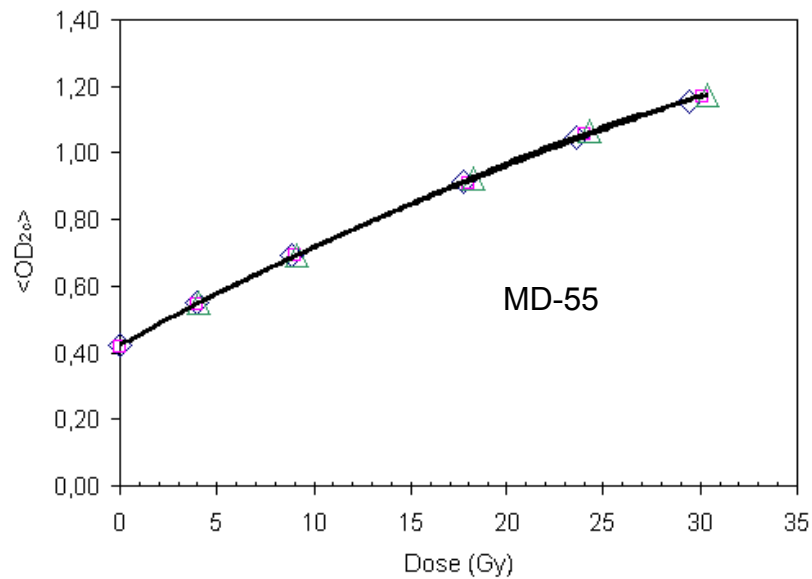
Dipendenza energetica

- Effective Z: 6.0 – 6.5
- Sensor material has similar electron stopping power as water & muscle
- Sensor material has similar mass-energy absorption coefficients as water & muscle for $h\nu > 100$ keV

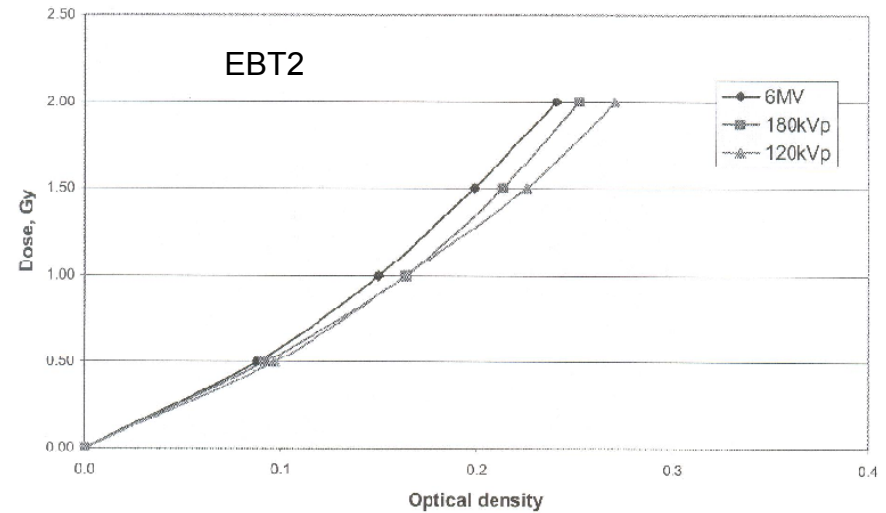


(Soares et al RPD 2010)

Dipendenza energetica



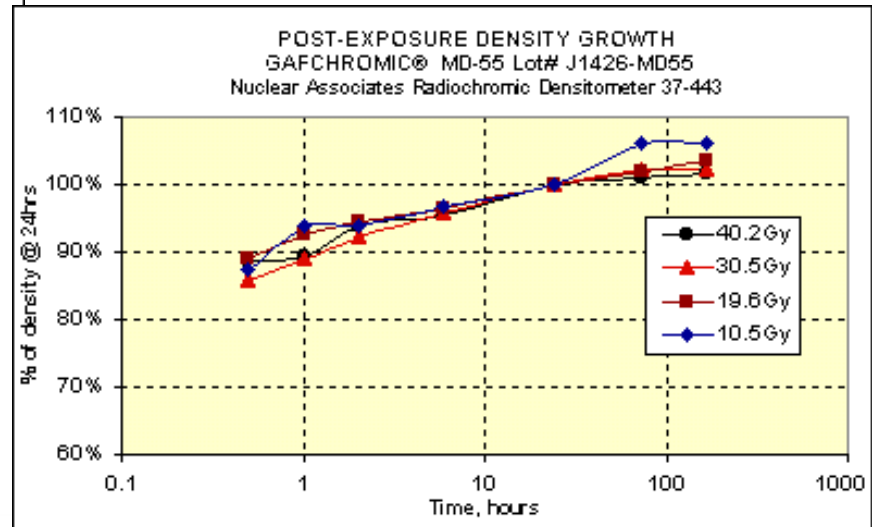
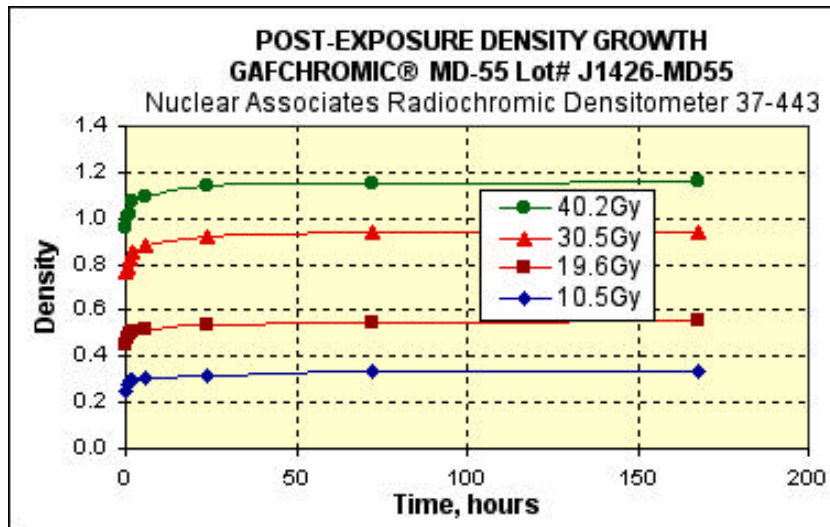
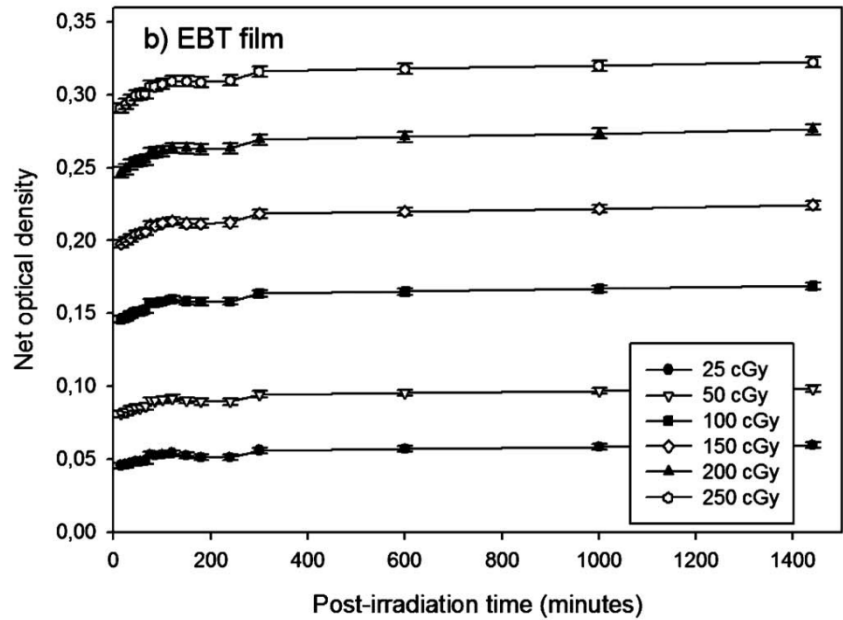
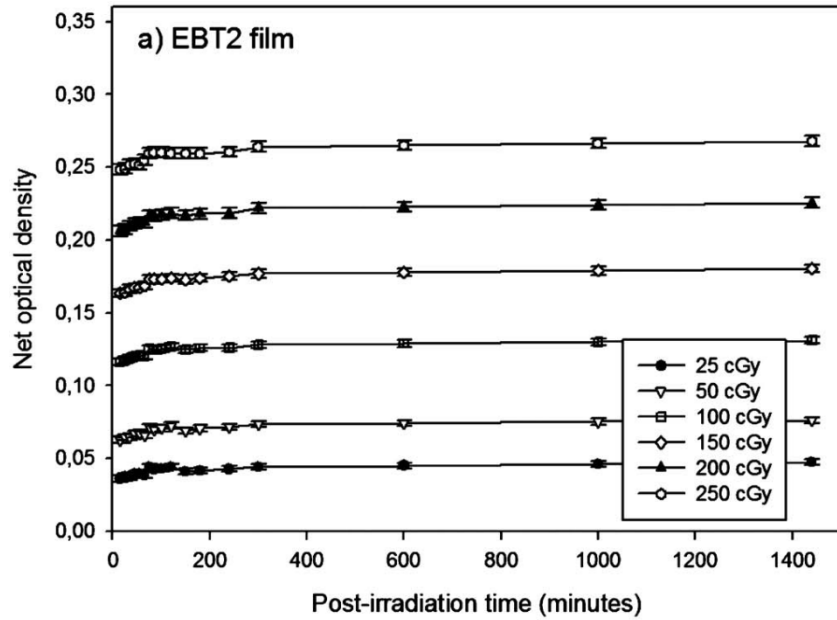
GafChromic MD-55 in fasci di elettroni (4.5, 6.0 e 7.5 MeV)



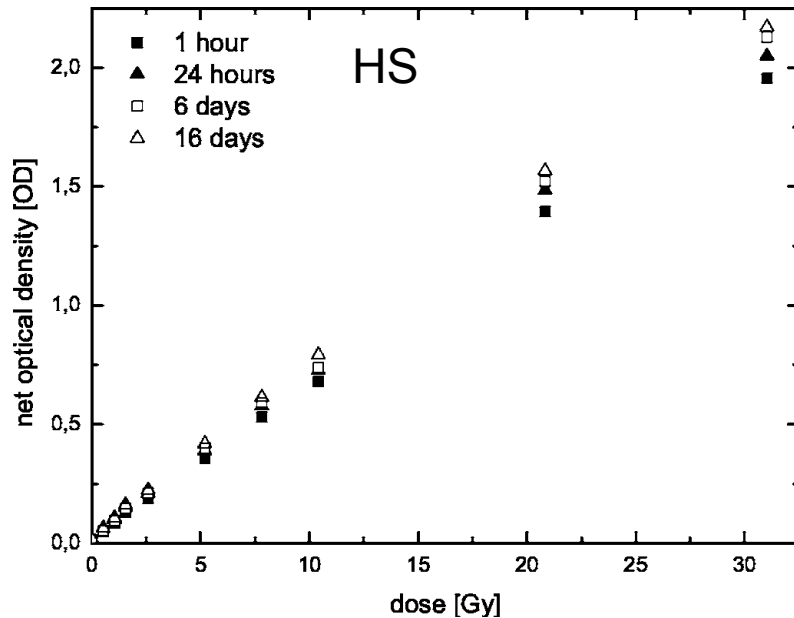
EBT2 film has a low energy dependency, showing about a 10% difference between 6 MV and keV photons

Variazione NOD vs tempo

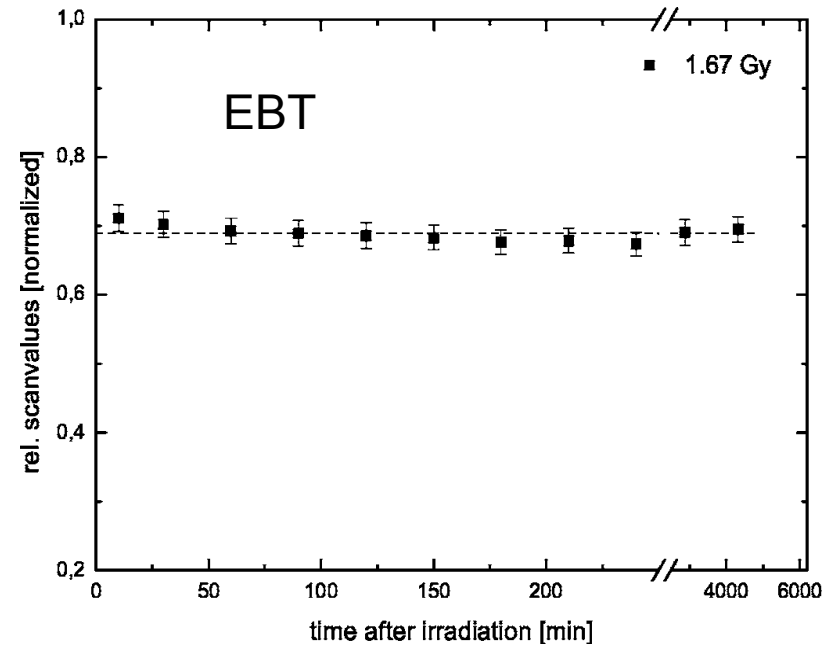
Andrés et al Med Phys 37, 2010



Variazione NOD vs tempo



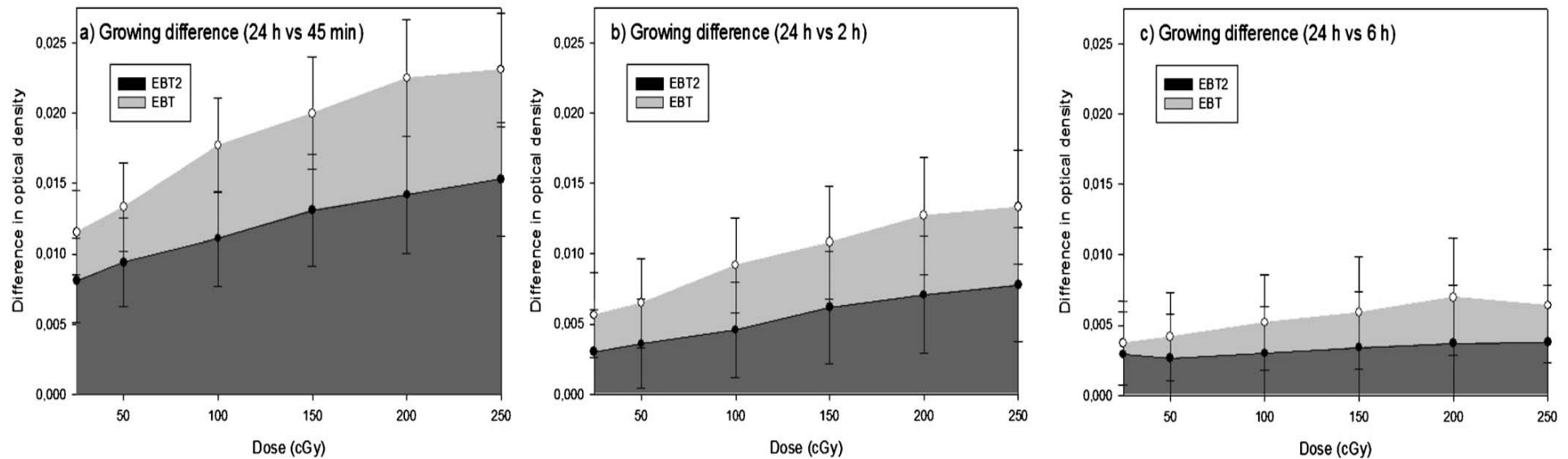
Dose response curves for the GafChromic HS at different times after irradiation.
A post-irradiation coloration of the GafChromic HS can be observed.



Dose response curves for the GafChromic EBT at different times after irradiation.

Variazione NOD vs tempo

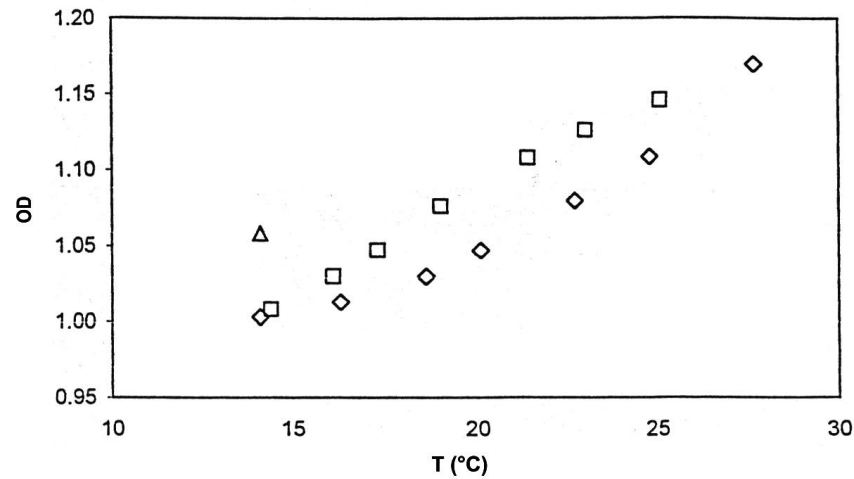
Andrés et al Med Phys 37, 2010



Variation of net optical density in both films after a 45 min, b 2 h, and c 6 h compared to optical density 24 h after irradiation. Results are provided for both radiochromic films and for six different dose levels.

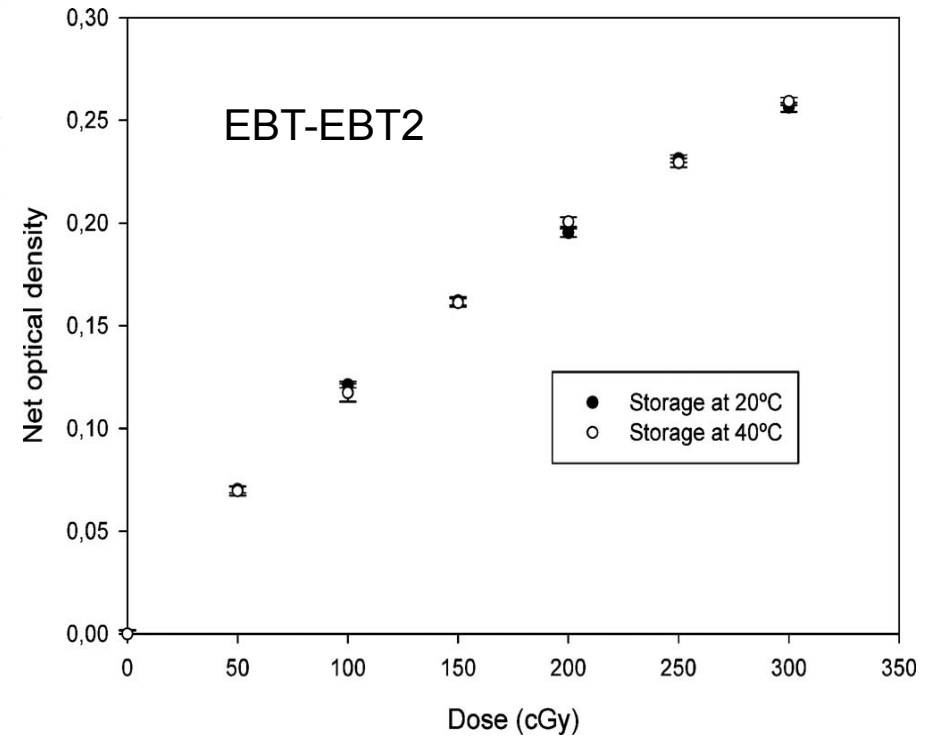
fast stabilization of EBT2 within two hours, while EBT takes at least 6 h

Dipendenza dalla temperatura

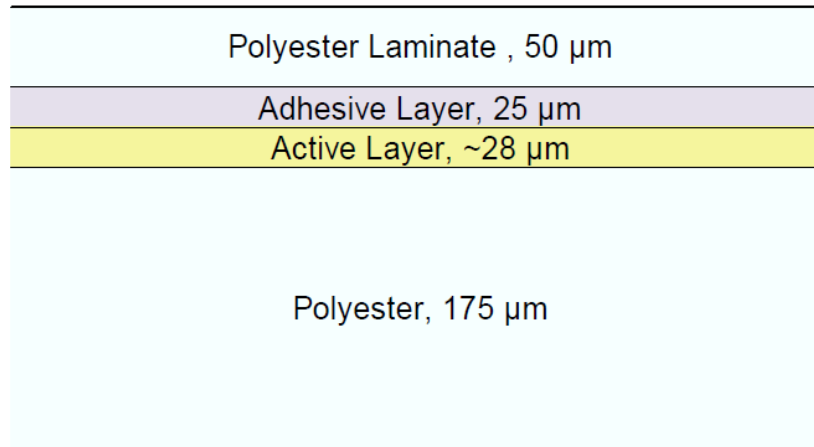


MD 55: OD della lastra irraggiata a 46 Gy, in funzione di valori crescenti (\diamond) e decrescenti (\square) della temperatura

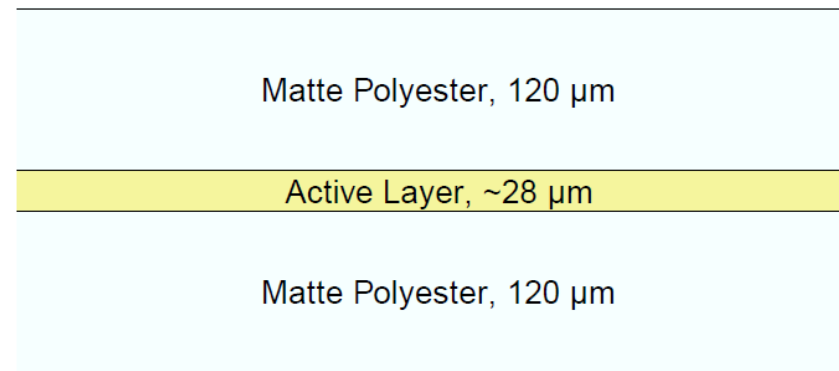
MD55-2:670 nm, + 5% when the irradiation temperature increase from 20 to 40 °C.



Configuration Change EBT2 to EBT3



EBT2



EBT3

For EBT3 Deviations with respect to the film side facing the scan window do not exceed 0.8% (0.9%)

EBT3 and EBT2 Compared

EBT2	EBT3	Comment
Active layer 26-28 μm	Active layer 26-28 μm	Active layer composition and response unchanged
Asymmetric structure	Symmetric structure	Scan EBT3 from either side
Smooth polyester substrate	Matte polyester substrate	Change prevents Newton's Rings formation
Density (unexposed) ~0.10 – 0.12	Density (unexposed) ~0.12 – 0.14	Matte polyester slightly hazy
Total thickness: ~ 0.28 mm	Total thickness: ~ 0.27 mm	
No fiducial marks	Pre-marked with fiducials	Automatic alignment using FilmQA Pro software

Dipendenza dalla orientazione

Stesso comportamento dei predecessori EBT/EBT2

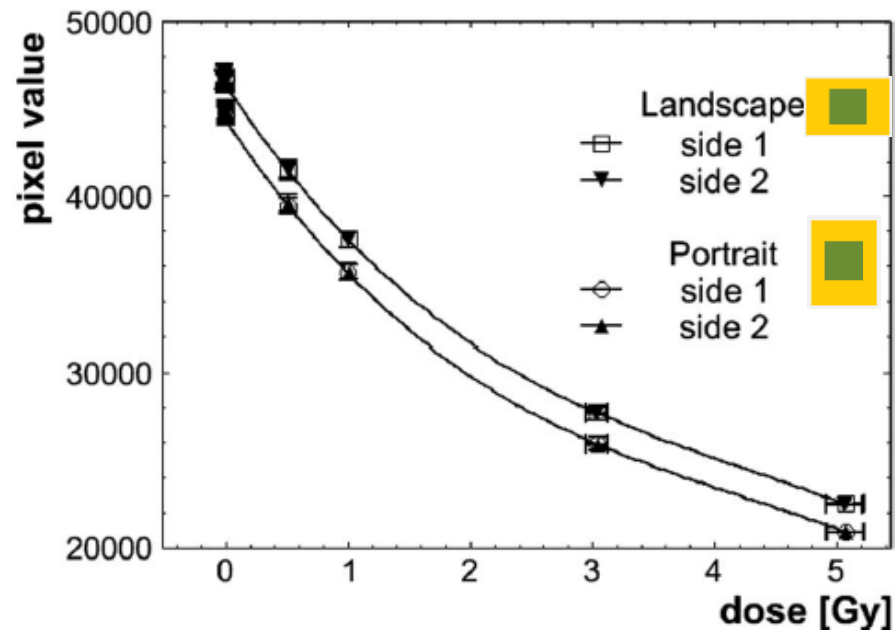


FIG. 1. EBT3 film sensitivity with respect to scanning and side orientation for different dose levels from photon exposure. Lines are shown to guide the eye. Side dependency is negligible for EBT3 films, while significant differences with respect to scanning direction (landscape, portrait) are present.

Dipendenza dal tempo (dopo esposizione)

Time after Exposure, minutes	Approximate change in dose/min.
15	0.16%
30	0.09%
60	0.05%
120	0.03%
240	0.01%
480	0.00%

Raccomandazione nell'uso dei film

Develop a protocol and stick to it

Bibliografia

- Guerda Massillon-JL et al International Journal of Medical Physics, Clinical Engineering and Radiation Oncology, 2012, 1, 60-65
- Recommendations of AAPM Radiation Therapy Committee Task Group No. 55
- Soares CG Radiat. Prot. Dosim. 2006;120(1-4):100-6.
- Devic S, Seuntjens J, Sham E, Podgorsak EB, Schmittlein CR, Kirov AS, Soares CG. Med Phys. 2005 Jul;32(7):2245-53
- Devic S, Tomic N, Pang Z, Seuntjens J, Podgorsak EB, Soares CG. Med Phys. 2007 Jan;34(1):112-8
- Slobodan et al Med. Phys. 34 (1), 2007
- Lindsay P. et al Med. Phys. 37 (2), 2010
- Slobodan et al Med. Phys. 32 (7), 2005
- Todorovic M. Med. Phys 33, (5) 2006