

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

**SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA
Sede di Forlì**

**CORSO DI LAUREA
IN INGEGNERIA MECCANICA
Classe 10**

**ELABORATO FINALE DI LAUREA
in
Tecnologie Speciali Lm**

**ANALISI E COMPARAZIONE DI TECNOPOLIMERI
RADIOPACHI NEI DISPOSITIVI MEDICALI E
SPERIMENTAZIONE DELLE CARATTERISTICHE CON
INTERAZIONE DI SORGENTI IONIZZANTI**

**CANDIDATO:
*Luca Strada***

**RELATORE:
*Prof. Ing. Lorenzo Donati***

Anno Accademico 2013/2014

Sessione III

INDICE

PREMESSA	7
CAPITOLO 1 - LA MACCHINA ED I SUOI COMPONENTI E FUNZIONI	9
1.1 – INTRODUZIONE	9
1.2 – DESCRIZIONE MACCHINARIO	9
1.3 – SOLUZIONE ATTUALE	11
CAPITOLO 2 - RADIAZIONI ED ESAME PANORAMICO	13
2.1 – RADIAZIONI IONIZZANTI	13
2.2 – SORGENTI	14
2.3 – MACCHINE RADIOGENE	16
2.3.1 – Tubo Coolidge	16
2.3.2 – Radiografie	18
2.4 – ESAME PANORAMICO.....	19
2.4.1 – Ortopantomografia.....	22
2.4.1.1 – Acquisizione Immagine Radiografica.....	23
CAPITOLO 3 - MATERIALI	26
3.1 – MATERIALI RADIOPACHI	26
3.2 – PIOMBO.....	27
3.2.1 – Galena	27
3.2.2 – Estrazione del Piombo	29
3.2.3 – Caratteristiche	31
3.2.4 – Proprietà Fisiche	32
3.2.5 – Proprietà Meccaniche	32
3.2.6 – Proprietà Chimiche	32
3.2.7 – Processi di Lavorazione.....	33
3.2.8 – Protezione contro le Radiazioni.....	35
3.2.9 – Tossicità.....	36
3.3 – TUNGSTENO.....	38
3.3.1 – Estrazione del Tungsteno.....	39
3.3.2 – Caratteristiche	41
3.3.3 – Classificazione.....	42
3.4 – RAME.....	43
3.4.1 – Produzione	44
3.4.2 – Proprietà.....	44
3.5 – MATERIALI POLIMERICI.....	45
3.5.1 – Definizione	45
3.5.2 – Tipologie.....	47
3.5.3 – Polimeri Amorfi e Cristallini	48
3.5.4 – Transizione Vetrosa e Plasticità.....	50

3.5.5 – Caratteristiche Meccaniche.....	52
3.5.6 – Polimeri Termoplastici	54
3.5.6.1 – Poliammide (PA) o Nylon.....	58
3.5.6.2 – Polipropilene (PP).....	59
3.5.6.3 – Principali Caratteristiche Termoplastici.....	60
3.5.7 – Polimeri Termoindurenti	60
3.5.7.1 – Principali Caratteristiche Termoindurenti.....	62
3.6 – COMPOSITI A MATRICE TERMOPLASTICA	63
3.6.1 – Materiali Compositi	63
3.6.1.1 – Rinforzo Particellato	64
3.6.1.2 – Compositi a Matrice Termoplastica.....	65
3.6.2 – Injection Molding	67
3.6.2.1 – Fasi del Processo di Stampaggio.....	69
3.7 – TECNOPOLIMERI RADIOPACHI	70
3.7.1 – Tecnopolimeri Radiopachi Lati	70
3.7.1.1 - Lati LatiGray 52/11-01 CX/70	71
3.7.1.2 - Lati LatiGray 82-03 CW/95.....	72
3.7.2 – Tecnopolimeri Radiopachi PolyOne.....	73
3.7.2.1 - PolyOne GraviTech GRV-NY-045-CU Copper.....	74
3.7.2.2 - PolyOne GraviTech GRV-NY-060-Copper	74
3.7.2.3 - PolyOne GraviTech-TP-050-CU Copper	75
3.7.2.4 - PolyOne Trilliant HC6200-5002 XR Grey.....	76
3.7.2.5 - PolyOne GraviTech GRV-NJ-090-W Black	77
CAPITOLO 4 - TEST ESEGUITI	79
4.1 - CONFRONTO RADIOPACITÀ PIOMBO-TECNOPOLIMERI RADIOPACHI.....	79
4.1.1 – Tipologie di Schermatura	79
4.1.2 – Acquisizione Dati	82
4.1.2.1 – Test Effettuati.....	87
4.1.3 – Elaborazione dei Dati Acquisiti.....	98
4.1.4 – Cernita dei Materiali Analizzati.....	104
4.1.5 – Curve Caratteristiche Piombo.....	106
4.1.6 – Equivalenza Piombo-Tecnopolimero	108
4.1.6.1 – Discussione dei Risultati Ottenuti.....	113
4.1.7 – Omogeneità dei Materiali	115
4.1.8 – Conclusioni Test Radiopacità	119
4.2 - TEST INVECCHIAMENTO ACCELERATO	120
4.2.1 - Olio Dielettrico.....	121
4.2.2 – Dati Iniziali	121
4.2.3 – Modello di Arrhenius.....	122

4.2.4 – Protocollo di Test.....	126
CONCLUSIONI.....	130
BIBLIOGRAFIA	132

PREMESSA

Il presente progetto di tesi è stato svolto in collaborazione con l'ufficio tecnico di Ricerca & Sviluppo dell'azienda Cefla s.c. Dentale, brand MyRay, situata a Imola (Bologna).

L'azienda Cefla Dentale è il primo produttore Europeo di riuniti dentali e da qualche anno è presente anche nel mercato dei radiografici dentali, con soluzioni che rispondono ai migliori standard qualitativi. La divisione MyRay si occupa della produzione e della vendita in quest'ultimo settore di business; gli apparecchi sviluppati contengono tecnologie di ultima generazione al fine di ottimizzare il risultato dell'indagine clinica, rispettando la massima tutela per la salute del paziente.

Per quanto riguarda i macchinari radiografici, in ambito medico, è ancora concesso l'utilizzo di piombo per la realizzazione delle schermature di protezione contro le radiazioni ionizzanti, in modo tale che esse non si disperdano nell'ambiente circostante e non vadano a interagire con gli individui presenti, a meno della dose di radiazioni necessaria ad effettuare la panoramica dentale.

Quello che ci si propone di fare in questa sede è quello di andare a realizzare radiografici dentali esenti da piombo, chiamati anche lead-free, attraverso l'ausilio di materiali ecocompatibili con l'ambiente, in quanto il piombo risulta essere tossico e nocivo se posto a contatto con le persone, oltre a essere difficile da lavorare dal punto di vista tecnologico.

A questo scopo si è deciso di utilizzare, come sostituto del piombo, materiali compositi radiopachi realizzati attraverso l'utilizzo di diversi tecnopolimeri quali la poliammide 12 (o Nylon 12), la poliammide 6, il polipropilene e il TPE-S (elastomero) caricati con particelle di tungsteno,



rame oppure materiali ceramici. Questi materiali ci sono stati forniti sia dall'azienda Lati di Varese, sia dall'azienda PolyOne, statunitense.

Su questi materiali verranno effettuati una moltitudine di test per valutare la loro effettiva validità, sia dal punto di vista della radiopacità (confrontandoli con il piombo), ritenuto l'aspetto più importante da valutare, sia dal punto di vista della durata nel lungo periodo, a contatto con olio dielettrico (contenuto all'interno della testata radiogena) e al continuo irradiazione da parte dei raggi X, oltre ad un test di compatibilità in aria.

Alla fine di tale trattazione si dovrà andare a valutare se questi tecnopolimeri potranno essere utilizzati per la schermatura delle radiazioni ionizzanti, in modo tale da andare a sostituire il piombo attualmente utilizzato, attraverso sia valutazioni relative alla radiopacità che di durata nel lungo periodo.

CAPITOLO 1

LA MACCHINA ED I SUOI COMPONENTI E FUNZIONI

1.1 – Introduzione

Cefla Dentale è azienda leader nel settore dentale, con una pluridecennale esperienza nel campo dei riuniti odontoiatrici, ed una più recente, in quello della diagnostica radiologica dentale, fornendo ai clienti una vasta gamma di strumenti ad alto livello tecnologico. Le soluzioni diagnostiche della radiologia dentale, sono opera della divisione radiologica: sfruttano tecnologie di ultima generazione, che si fondono assieme per garantire un'indagine clinica di alta qualità senza compromettere la sicurezza del paziente e del personale.

1.2 – Descrizione Macchinario

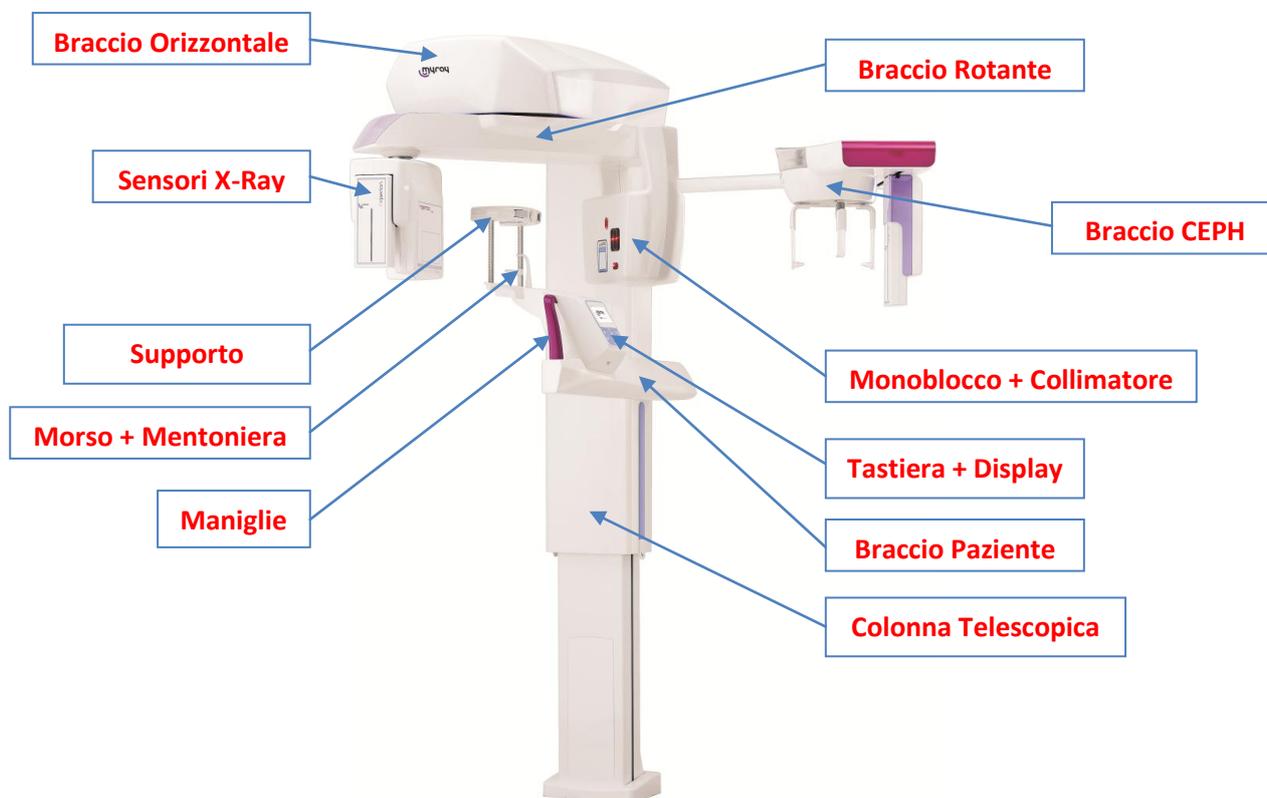


Figura 1.1 – OPT prodotto dall'azienda Cefla

L'apparecchio radiografico utilizzato per lo svolgimento del presente elaborato è un dispositivo medico della famiglia degli OrtoPanTomografi (noti anche con l'acronimo OPT), dove in figura 1.1 ne viene rappresentato un modello prodotto dall'azienda. La macchina è composta dai seguenti componenti:

- **Braccio orizzontale** → ha la funzione di sostenere l'intero braccio rotante.
- **Monoblocco + Collimatore** → il primo presenta al suo interno il tubo radiogeno, il quale ha la funzione di produrre ed emettere i raggi X; il tubo radiogeno è contenuto in un involucro in materiale termoplastico, il quale viene schermato con una lamina di piombo. Il collimatore, anch'esso contenuto all'interno del monoblocco e attualmente realizzato in piombo, ha la funzione di far collidere i raggi in una determinata porzione di superficie, avente una forma ben definita, in modo tale che i raggi non vengano irradiati nell'ambiente circostante e vadano ad interagire con il paziente solo nella zona prestabilita.
- **Sensori X-Ray** → hanno il compito di ricevere il segnale proveniente dal monoblocco, il quale ha attraversato il paziente.
- **Braccio rotante** → oltre a sostenere il monoblocco e i sensori X-Ray ha la funzione di far effettuare a questi due componenti una rotazione completa (360°), durante l'indagine radiografica.
- **Supporto tempie** → come dice il nome stesso, ha la funzione di sorreggere le tempie durante la radiografia.
- **Morso + Mentoniera** → il primo viene stretto fra i denti incisivi, in modo tale da far acquisire al paziente la posizione corretta durante l'indagine, e il secondo ha la funzione di sorreggere il mento.
- **Maniglie** → vengono tenute strette dal paziente e tirate verso sé durante l'esame radiografico.
- **Braccio CEPH** → utilizzato per sostenere sensore X-Ray e supporto tempie nel caso in cui si voglia utilizzare il macchinario per le teleradiografie.
- **Testiera + Display** → pannello di controllo della macchina.

- **Braccio paziente** → sorregge la tastiera, il display, le maniglie, morso, mentoniera e il supporto per le tempie.
- **Colonna telescopica** → regola l'altezza del macchinario, in funzione dell'altezza del paziente.

1.3 – Soluzione Attuale

Attualmente gli OPT Cefla, per la schermatura dei raggi X prodotti dal tubo radiogeno, utilizzano il consueto piombo, largamente utilizzato per questo scopo, soprattutto in ambito medico (in quanto la legge lo consente ancora).

I componenti, e di conseguenza le schermature, possono essere suddivisi in due sottogruppi:

- **Schermatura Raggi Primari** → sono componenti, e quindi schermature, direttamente irradiati dai raggi primari, uscenti dal tubo radiogeno, i quali devono possedere un elevato potere schermante. Questi componenti/schermature sono quelli che interessano direttamente il rivestimento esterno del tubo radiogeno e il collimatore presente all'interno del monoblocco, attualmente realizzati in piombo con uno spessore di 1,5 mm, riportate nelle immagini sottostanti.

Schermatura
in piombo



Figura 1.2 – Tubo radiogeno Toshiba, dove viene indicata la schermatura per le radiazioni uscenti da esso. È possibile notare il foto di uscita dei raggi X.



Figura 1.3 – Collimatore realizzato in piombo, attualmente utilizzato nell'OPT

- **Schermatura Raggi Secondari** → componente e schermatura interessate dai raggi secondari, molto meno potenti, e che quindi devono possedere un effetto schermante meno marcato rispetto a quelli esposti nel punto primo. Questo componente è la cover esterna al monoblocco, attualmente realizzata in materiale termoplastico ricoperta da una lamina di piombo spessa 0,5 mm.

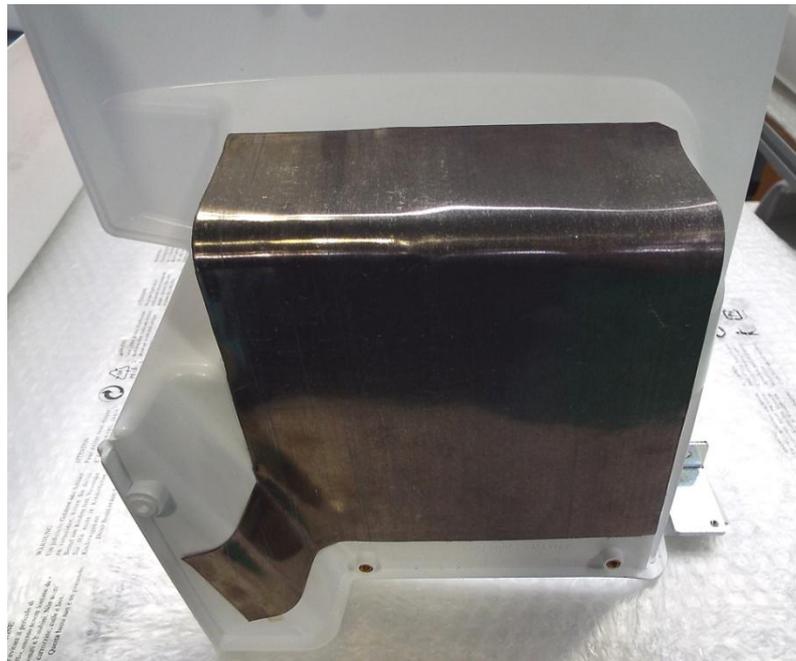


Figura 1.4 – Pannello esterno in materiale termoplastico con lamina di piombo spessa 0,5 mm per schermatura dei raggi secondari

Come scritto nella premessa, lo scopo di questa trattazione è sostituire il piombo attualmente utilizzato con materiali aventi lo stesso potere schermante, ma che non rappresentino un pericolo (nocivi/tossici) per i soggetti posti a contatto con essi.

CAPITOLO 2

RADIAZIONI ED ESAME PANORAMICO

2.1 – Radiazioni Ionizzanti

Il termine radiazione viene spesso utilizzato per descrivere fenomeni assai diversi fra di loro, come possono essere l'emissione di luce da parte di una lampada, il calore generato da una fiamma, particelle prodotte da una sorgente radioattiva.

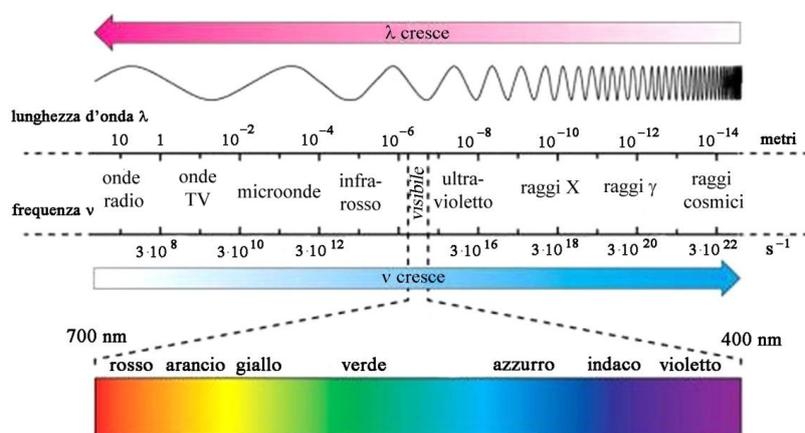


Figura 2.1 – Spettro radiazioni

Una caratteristica comune a queste tipologie di emissioni è il trasporto di energia nello spazio. Questa energia viene ceduta quando la radiazione viene assorbita dalla materia, molto spesso attraverso un aumento della temperatura in prossimità del punto in cui è avvenuto l'assorbimento. Purtroppo, oltre a questa tipologia di effetto, le particelle ionizzanti possono anche danneggiare l'organismo umano.

L'azione lesiva delle particelle ionizzanti sull'organismo è una diretta conseguenza dei processi fisici di eccitazione e ionizzazione degli atomi e delle molecole dei tessuti biologici dovuti agli urti delle particelle, che sono dette appunto particelle ionizzanti o anche radiazioni ionizzanti, quando hanno energia sufficiente per produrre questi processi.

A seconda che la ionizzazione del mezzo irradiato avvenga per via diretta o indiretta si usa distinguere tra radiazioni direttamente ionizzanti e radiazioni

indirettamente ionizzanti. Sono direttamente ionizzanti le particelle cariche (elettroni, particelle beta, particelle alfa, ecc.); sono invece indirettamente ionizzanti i fotoni (raggi X e raggi gamma) e i neutroni.

Le particelle cariche, dotate di massa e di carica elettrica, e i neutroni, dotati di massa, ma non di carica elettrica, sono radiazioni corpuscolari. I fotoni invece non hanno massa, né carica elettrica. Sono radiazioni elettromagnetiche, che si propagano con la velocità della luce.

Le particelle cariche più comuni sono le particelle alfa e le particelle beta, che vengono emesse nei decadimenti radioattivi. Le prime si compongono di due neutroni e due protoni. Le altre sono del tutto simili agli elettroni, ma contrariamente a questi possono avere carica sia negativa che positiva. I neutroni sono emessi nella disintegrazione spontanea di elementi pesanti prodotti artificialmente e nelle reazioni nucleari.

Una caratteristica molto importante delle radiazioni è la loro energia, che si misura in joule, o più diffusamente in fisica delle radiazioni in elettronvolt (eV). Un elettronvolt è l'energia che una carica elementare (quella di un elettrone o di un protone) acquista attraversando una differenza di potenziale di 1 volt. Ad esempio, in un tubo a raggi X un elettrone attraversando la differenza di potenziale di 100.000 volt, acquista una energia di 100.000 eV (100 keV).

2.2 – Sorgenti

L'atomo è la più piccola parte di un elemento che mantiene le caratteristiche dell'elemento stesso e nel contempo è la principale sorgente di radiazioni sia elettromagnetiche che corpuscolari.

Esso è composto da un nucleo e di particelle più leggere, gli elettroni, di carica elettrica negativa che gli ruotano intorno in orbite energeticamente ben definite. Un elettrone, ricevendo energia, può passare da orbite interne ad orbite esterne, oppure uscire dall'atomo. Nel primo caso l'atomo risulta eccitato, nel secondo ionizzato.

A sua volta il nucleo è costituito da protoni, aventi carica elettrica positiva, e neutroni, elettricamente neutri. Protoni e neutroni hanno una massa

all'incirca 1835 volte maggiore degli elettroni. Il numero di protoni determina l'elemento cui l'atomo appartiene.

Ogni atomo ha lo stesso numero di protoni e di elettroni e risulta, quindi, elettricamente neutro. Gli atomi di uno stesso elemento, pur avendo lo stesso numero di protoni, possono avere diverso numero di neutroni, dando origine a diversi isotopi.

Vi possono essere due tipologie di radioattività:

- **Naturale** → numerosi elementi esistenti in natura sono costituiti da atomi i cui nuclei sono energeticamente instabili. Il ritorno alla stabilità avviene con emissione di radiazione corpuscolare (alfa o beta), spesso accompagnata da radiazione elettromagnetica (raggi gamma). I nuclei si dicono radioattivi e la menzionata emissione di radiazione viene detta decadimento radioattivo o radioattività. Il fenomeno è regolato dalla fondamentale legge del decadimento radioattivo secondo la quale, per ogni radionuclide, deve trascorrere un tempo caratteristico (chiamato tempo di dimezzamento) affinché il numero di nuclei radioattivi presenti si dimezzi:

$$N(t) = N_0 * e^{-\lambda t} \quad \text{dove}$$

$N(t)$ = n° di atomi presenti all'istante t nel materiale radioattivo

N_0 = n° di atomi presenti inizialmente

λ = costante caratteristica per ogni materiale radioattivo

t = tempo

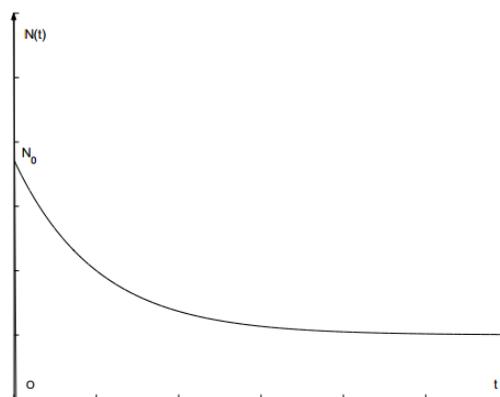


Figura 2.2 – Legge del decadimento

- **Artificiale** → il fenomeno della radioattività può essere indotto artificialmente in nuclei stabili attraverso le reazioni nucleari. Si ha una reazione nucleare quando delle particelle (ad esempio protoni, neutroni) colpiscono i nuclei della materia: il nucleo colpito (nucleo bersaglio) assorbe la particella lanciata (proiettile) ed in generale ne emette un'altra o più di una, restando modificato nella sua struttura. Si possono considerare come particolari reazioni nucleari anche i casi in cui la particella emessa è la stessa incidente, ovvero quando si verifica una semplice deviazione di questa (fenomeno detto diffusione): il nucleo non cambia natura, ma tutt'al più si eccita (diffusione anelastica) o resta inalterato (diffusione elastica). Quando quest'ultimo si trova in uno stato energeticamente instabile, si ha il fenomeno della radioattività artificiale.

2.3 – Macchine Radiogene

Questa macchina sfrutta il fatto che i raggi X vengono prodotti dal frenamento che subiscono gli elettroni di elevata energia quando interagiscono con una sostanza. Questo fenomeno viene chiamato effetto Bremsstrahlung, il quale si ha quando l'elettrone, passando vicino a un nucleo, subisce l'attrazione coulombiana fra cariche di segno opposto (elettrone e nucleo), con conseguente deviazione dalla sua traiettoria ed emissione di radiazioni. Questo processo può essere provocato e controllato utilizzando un tubo all'interno del quale gli elettroni vengono accelerati e poi fatti incidere su un bersaglio metallico, provocando appunto l'emissione di raggi X.

2.3.1 – Tubo Coolidge

Questo appena descritto è il principio su cui si basa il così detto tubo di Coolidge (o tubo radiogeno) il quale consiste in una coppia di elettrodi (anodo e catodo) contenuta in un involucro di vetro al cui interno è fatto il vuoto, al fine di evitare le interazioni con le molecole d'aria. Il catodo è un

filamento metallico (tungsteno) avvolto in una spirale lunga 2÷3 mm: riscaldato elettricamente a temperature di qualche migliaio di gradi (2200°÷2500°C), emette elettroni per effetto termoionico. Tanto più elevata è la temperatura cui viene riscaldato e tanto maggiore è il numero di elettroni emessi nell'unità di tempo, che quindi può venire regolata agendo sull'intensità della corrente circolante nel filamento.

Il tubo è alimentato da una tensione alternata rettificata (in modo da non far variare la polarità degli elettrodi) che permette di accelerare gli elettroni che vanno così a colpire l'anticatodo-bersaglio emettendo radiazioni secondo i processi sopra descritti.

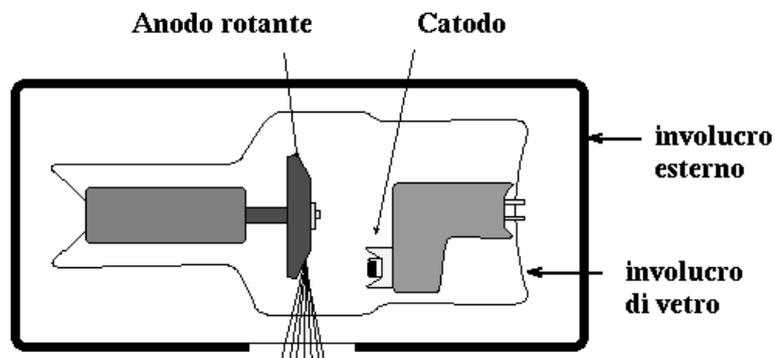


Figura 2.3 – Tubo di Coolidge

Come si è accennato, vi è una forte dispersione di calore che rende necessari degli accorgimenti nella costruzione dell'anodo: si sceglie, da una parte, un materiale con alto punto di fusione, come appunto il tungsteno (circa 3422°C), dall'altra si fa ruotare l'anodo, così da presentare una superficie continuamente diversa al fascio distribuendo quindi il calore generato su di una superficie più ampia possibile.

L'area d'incidenza del fascio è detta macchia focale e, per dare una buona qualità dell'immagine, dovrebbe essere la più piccola possibile, ma, in realtà, le sue dimensioni sono tanto più grandi quanto maggiore è la potenza richiesta dal tubo. Se l'anodo fosse fisso, infatti, l'elevata intensità di elettroni ne provocherebbe rapidamente la fusione. La maggior parte dei tubi per diagnostica ha due filamenti, così da poter scegliere fra macchie focali di diverse dimensioni, disposti parallelamente nella testata del catodo e focalizzati in modo tale che le due macchie risultino sovrapposte.

Si deve tenere conto che è anche necessario minimizzare l'esposizione del paziente e quindi il tempo della radiografia. È chiaro che maggiore è l'intensità del fascio e più rapidamente si ottiene la formazione dell'immagine: ma per aumentare l'intensità occorre aumentare (a parità di altre condizioni) la macchia focale. Poiché si deve trovare un compromesso, si usa inclinare l'anodo di circa 20° rispetto al catodo in modo da avere un'area apparente minore di quella reale.

2.3.2 – Radiografie

Per quanto riguarda l'applicazione del tubo di Coolidge all'ambito medico (per la realizzazione di radiografie), si rende necessario usare una schermatura che assorba i fotoni aventi direzioni diverse da quella utile ai fini dell'esame radiologico. Questa si realizza con una guaina di piombo che lascia libera solo una finestra del tubo, dalla quale i raggi, a causa del vetro e di uno strato di olio, escono privati della loro componente meno energetica. Il tutto (il tubo di vetro avvolto nel suo schermo di piombo) è in genere alloggiato entro un contenitore metallico, con opportune connessioni elettriche.

Infine, è in genere desiderabile poter intervenire sulla dimensione del fascio in modo da irraggiare solo la zona prescelta, senza conferire dose inutile a quanto si trova fuori dalla zona in questione. Per fare questo si usano dei collimatori, che sono dei diaframmi mobili in piombo, che possono venire avvicinati o allontanati per ottenere appunto le dimensioni volute del fascio. Per regolare opportunamente la direzione del fascio (orientando il tubo) e la sua dimensione (col collimatore) si fa uso di un dispositivo ottico, che proietta un fascio luminoso nella stessa geometria del fascio di raggi X ma, a differenza di questo, è visibile all'occhio umano e non è pericoloso.

2.4 – Esame Panoramico

La prima radiografia dentale seguì di qualche settimana la scoperta dei raggi X (1895) e fu effettuata da Friedrich Otto Walkhoff su sé stesso, con un tempo d'esposizione alla radiazione di 25 minuti.

Per tre quarti di secolo, il principio dell'elaborazione dell'immagine radiografica è restato invariabilmente lo stesso:

- **Tubo radiogeno** → tubo a raggi X che emette un fascio omogeneo.
- **Soggetto** → organo o tessuto radiografato, attraversato dal fascio incidente.
- **Ricettore** → ricco di sali che raccoglie l'immagine latente e la rivela chimicamente.

L'odontoiatria ha seguito il progresso della radiologia:

- 1) messa in evidenza di strutture spontaneamente radiotrasparenti, con l'introduzione di un contrasto positivo opaco ai raggi X (scialografia).
- 2) separazione strato a strato, di strutture complesse (tomografia).
- 3) ortopantomografia (Paatero, 1950).
- 4) prestazioni migliorate dei tubi radiologici che permettono la teleradiografia intra orale o tecnica del cono lungo.
- 5) miglioramento costante delle emulsioni dei ricettori al bromuro d'argento.

Risale al 1972 la rivoluzione più grande in termini di diagnostica medica per immagini, con l'invenzione della tomodensitometria o C.T.-scanning (computed tomography scanning) a raggi X, da parte di Godfrey Newbold Hounsfield. La tomodensitometria è una metodica diagnostica per immagini, che sfrutta radiazioni ionizzanti (raggi X) e consente di riprodurre sezioni o strati (tomografia) corporei del paziente ed effettuare elaborazioni tridimensionali. Per la produzione delle immagini è necessario l'intervento di un elaboratore di dati (computer). Nel processo di acquisizione delle immagini, la pellicola radiografica è sostituita da una corona di camere di ionizzazione allo xenon e le informazioni sulla densità acquisite al

passaggio del fascio emergente di raggi X, sono trattate in maniera informatica: l'arrivo del computer nel processo di trattamento è l'atto di nascita della diagnostica per immagini in medicina.



Figura 2.4 – C.T.-scanning

Seguirono diversi anni, affinché i macchinari potessero essere ottimizzati anche per indagini odontoiatriche intraorali e nel 1982, fu introdotta la radiovideografia o RVG.



Figura 2.5 – RVG

La radiovideografia è un sistema che permette di eseguire, mediante un sensore ottico e un computer, la radiografia endorale e la visione della stessa sul monitor del computer. Diversamente dai sistemi convenzionali di radiologia, per la radiovideografia non si devono aspettare i tempi per lo sviluppo della lastrina, in quanto l'immagine appare immediatamente sul

monitor; non si tengono più i liquidi per lo sviluppo che sono tossici ed inquinanti (maggior rispetto per l'ambiente) e può ridurre del 90% l'esposizione del paziente alle radiazioni senza comunque compromettere la qualità delle immagini.

L'immagine radiologica dentaria rimane tutt'oggi esclusivamente dipendente dai raggi X a causa del suo contenuto minerale, che assicura al dente e all'osso la migliore definizione ed il massimo contenuto informativo.



Figura 2.6 – OPT prodotto dall'azienda Cefla

Le tecniche extra orali sono rappresentate essenzialmente dall'ortopantomografia (OPT), parola che deriva dal greco antico "Orto", che significa rettilineo, "Pan" tutto, "Tomo" in profondità/spessore, "Grafia" disegno/descrizione, chiamata anche radiografia panoramica dentaria, introdotta da Paatero nel 1950.

2.4.1 – Ortopantomografia

L'ortopantomografia è l'esame di diagnostica per immagini preliminare, sempre necessario e a volte sufficiente, integrato eventualmente da radiografie endorali e/o occlusali. Eventuali esami di maggiore invasività (tomografia) vengono presi in considerazione solamente dopo la valutazione attenta di questa prima tecnica diagnostica. Una pellicola di screening di prima istanza, analizza continuamente una sezione tomografica relativamente spessa e curvilinea, seguendo la forma dell'arcata dentaria da una articolazione temporo-mandibolare all'altra; comprende tutte le strutture ossee ed alveolari nella loro posizione naturale locoregionale e permette un utile ed immediato paragone fra lato destro e sinistro.

I limiti principali di questa tecnica risiedono nel posizionamento: al fine di ottenere un'immagine definita degli incisivi, lo spessore utile del taglio largo nella regione dei molari decresce in senso disto-mediale, generando frequentemente difficoltà da parte dell'operatore nel posizionare correttamente il paziente.

Una radiografia panoramica ideale, dovrebbe quindi essere priva di errori legati alla tecnica di posizionamento paziente o alla strumentazione utilizzata; tuttavia nella realtà clinica, capita di ottenere risultati non perfetti ma con una presenza di errore accettabile. In altri casi invece si incorre in errori non trascurabili, tali da richiedere una ripetizione dell'esame, con conseguente riesposizione del paziente alla radiazione e perdita di tempo del personale clinico. Il criterio principale per l'accettazione di una panoramica dentale è l'adeguato riconoscimento di tutte le strutture della regione maxillo-facciale: se anche solo una di queste strutture non risulta ben identificabile, l'esame deve essere ripetuto. Nello specifico, si ritiene necessaria la ripetizione, qualora non siano ben visualizzabili (per esempio a causa di ostruzione, saturazione o sfocatura) le seguenti strutture anatomiche: condili della giunzione temporo-mandibolare, mandibola mascella della regione anteriore, rami mandibolari.



Figura 2.7 – Panoramica dentale effettuata in maniera corretta (leggermente sorridente)

In generale, vi sono due caratteristiche che differenziano una buona panoramica da una insufficiente e sono un'esposizione adeguata, il che implica che ci sia un contrasto tale da permettere il riconoscimento delle diverse strutture, e una rappresentazione anatomica corretta, cioè ci deve essere sufficiente quantità di struttura ossea e rappresentata con un certo grado di accuratezza.

2.4.1.1 – Acquisizione Immagine Radiografica

Gli ortopantomografi sono tradizionalmente impiegati nell'acquisizione di radiografie panoramiche. Queste particolari radiografie, richiedono un movimento sincronizzato della sorgente a raggi X (tubo radiogeno) e del sensore: l'immagine è acquisita colonna per colonna; per ogni colonna, il tubo radiogeno e il sensore compiono una rototraslazione tale per cui il fuoco segue l'arco dentale. Questo è equivalente a dire che l'asse principale della radiazione X, interseca in maniera più ortogonale possibile l'arco dentale, sfocando allo stesso tempo, le zone lontane da esso; tale movimento può anche essere visto come mantenere fisso il centro di rotazione istantaneo dell'arco dentale e traslarlo lungo l'arco.

Per permettere questo movimento complesso, l'apparato radiografico è progettato con quattro gradi di libertà: sono generalmente due per la traslazione, uno per la rotazione del braccio portante del tubo radiogeno e uno per il sensore.

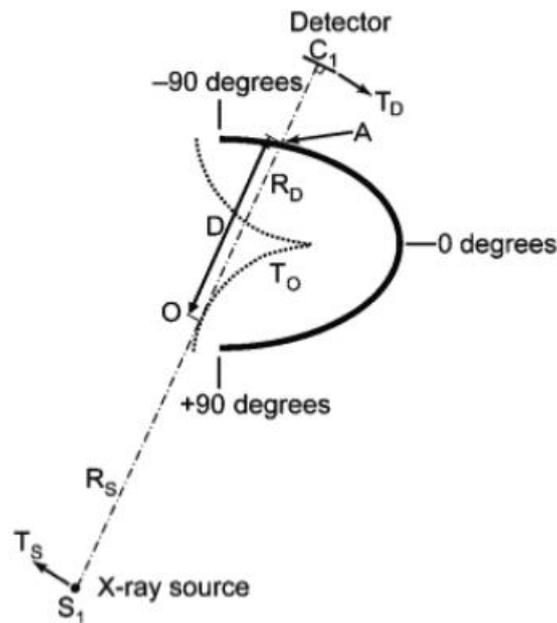


Figura 2.8 – Geometria del sistema panoramico d'acquisizione

Le vecchie versioni del sistema ortopantomografo richiedono l'utilizzo di un film che viene fatto scorrere lungo una traiettoria rettilinea. Con l'avvento delle tecnologie digitali, il meccanismo è stato sostituito da sensori CCD (Charge-Coupled Device, dispositivo ad accoppiamento di carica) in grado di operare in Time Delay Integration (TDI). La possibilità offerta dalle tecnologie digitali, di memorizzare ed elaborare a posteriori l'informazione acquisita, ha consentito lo sviluppo di una ricostruzione tomografica completa, utilizzando ortopantomografi.

Un design adeguato delle traiettorie dell'emettitore di raggi X e del sensore, è necessario al fine di ottenere un set d'immagini che possano essere attendibili; ciò è solitamente ottenuto mediante un angolo limitato di acquisizione che permette di ridurre sia l'intensità della radiazione, che il tempo di esposizione a cui è soggetto il paziente.

Sono possibili differenti strategie d'acquisizione, per questo scopo; gli apparecchi descritti sopra catturano una serie di proiezioni mantenendo la sorgente di raggi X fissa, mentre il sensore ruota attorno ad esso e le cariche vengono shiftate lungo le colonne del sensore: in questo modo, si ottiene una traiettoria a fascio conico (Cone Beam), rappresentato in figura 2.9.

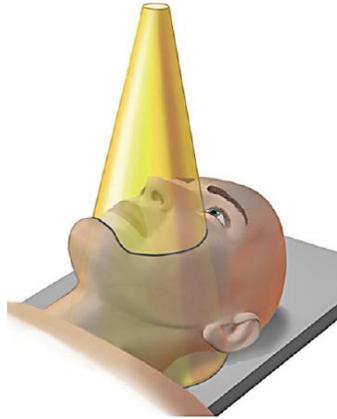


Figura 2.9 – Modalità di emissione attraverso fascio conico (Cone Beam)

Un altro metodo, consiste nella traslazione parallela di sensore e raggio X, mentre le cariche vengono spostate lungo le colonne del sensore: in questo caso si parla di fascio a ventaglio (Fan Beam), rappresentato in figura 2.10.

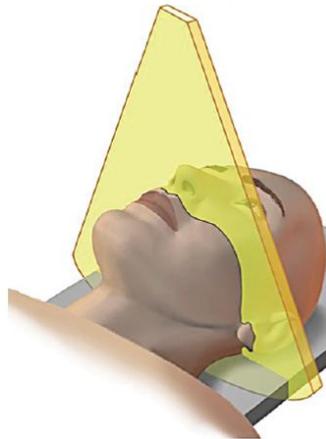


Figura 2.10 – Modalità di emissione attraverso fascio a ventaglio (Fan Beam)

CAPITOLO 3

MATERIALI

3.1 – Materiali Radiopachi

Con il termine radiopaco si intende quella categoria di materiali che ha lo scopo di schermare le radiazioni ionizzanti, principalmente i raggi X. Come dice la parola stessa, esso si presenta opaco se irradiato da radiazioni.

Questi materiali vengono utilizzati in ambito radiologico per far sì che le radiazioni non vengano disperse nell'ambiente circostante, andando a colpire oggetti o persone che non devono essere irradiate.

La caratteristica principale di questi materiali è la loro densità. Per far sì che essi siano radiopachi, devono presentare un elevato peso specifico. Più il materiale si presenta denso, più esso sarà schermante contro le radiazioni. A tal proposito, il materiale più comunemente utilizzato sia in ambito medico che industriale per la schermatura delle radiazioni è il piombo. Esso infatti presenta un elevato peso specifico (11,34 kg/dm³), ma ha il difetto di essere tossico se posto a contatto con degli individui ed è inquinante per l'ambiente.

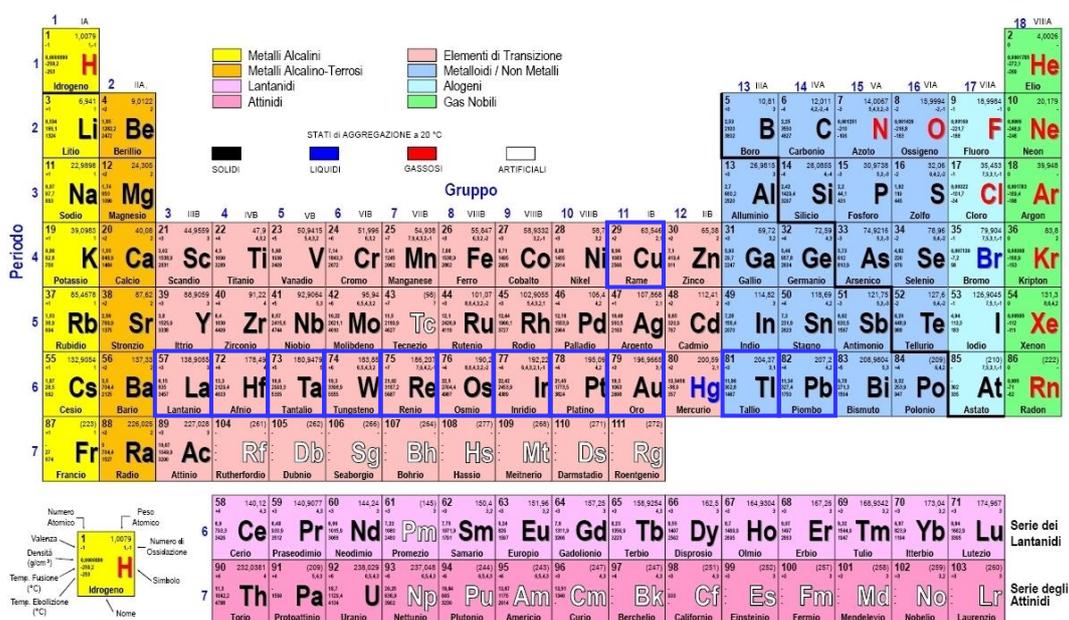


Figura 3.1 – Tavola periodica degli elementi, con indicati i materiali ad elevata densità (radiopachi)

Materiale	Densità (kg/dm ³)	Materiale	Densità (kg/dm ³)
Afnio	13,3	Iridio	22,5
Tantalio	16,7	Platino	21,4
Tungsteno	19,25	Oro	19,3
Renio	21	Tallio	11,85
Osmio	22,6	Piombo	11,34
Rame	8,92		

Tabella 3.1 – Materiali ad alta densità utilizzati nei tecnopolimeri radiopachi

Negli ultimi anni altri materiali hanno incominciato ad essere utilizzati per lo stesso scopo. Fra questi il più utilizzato è indubbiamente il tungsteno, il quale presenta anch'esso un elevato peso specifico (19,25 kg/dm³), addirittura superiore rispetto al piombo stesso. Questo materiale, a differenza del piombo, non è tossico per gli individui e non è inquinante per l'ambiente. Oltre a questo materiali molto spesso viene utilizzato anche il rame, il quale presenta anch'esso un peso specifico (8,92 kg/dm³) abbastanza elevato, anche se non paragonabile a quello del tungsteno.

3.2 – Piombo

Il piombo è un metallo abbastanza presente nella crosta terrestre. Esistono più di 60 minerali contenenti piombo sotto varie forme, ma solitamente il piombo minerale si trova sotto forma di solfuro di piombo (PbS), denominato Galena, molto spesso legato all'argento.

Insieme ad altre due tipologie di minerali, quali la Cerussite e l'Anglesite, essi producono più del 95% di tutto il piombo generato per prima fusione. Il piombo è spesso associato a minerali contenenti solfuri di zinco, sali solforati e molto spesso è legato ad altri metalli, quali il rame, arsenico, cadmio e bismuto.

3.2.1 – Galena

Si trova soprattutto in giacimenti filoniani di origine idrotermale, accompagnata da diversi tipi di ganga (materiale roccioso), come ad esempio calcite, quarzo, fluorite e barite.



Figura 3.2 – Minerale di Galena

Questo solfuro si presenta tenero, con una durezza di 2,5/3 secondo la scala Mohs, con un peso specifico molto simile a quello del ferro ($7,4 \text{ kg/dm}^3$) e tendenzialmente fragile. Fonde abbastanza facilmente, dando origine a un grumo di litargirio (monossido di piombo).

La sua struttura reticolare è abbastanza semplice: due reticoli cubici a facce centrate (aventi, cioè, un atomo di zolfo o di piombo agli otto vertici e al centro di ogni cubo) sono compenetrati l'uno nell'altro e traslati di metà del lato del cubo. Ne deriva un'alternanza continua di atomi di zolfo e di piombo ai vertici e a metà degli spigoli dei cubi.

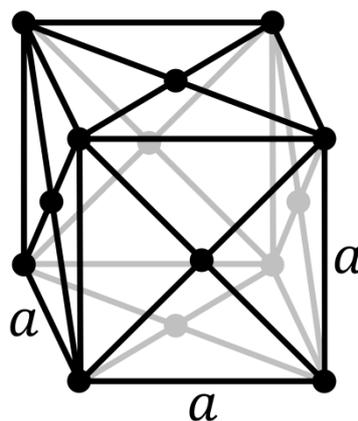


Figura 3.3 – Struttura CFC

3.2.2 – Estrazione del Piombo

Per quanto riguarda il processo di estrazione del piombo dalla Galena, una volta estratto il minerale è necessario separarlo dai residui di roccia ancora presenti. Per far ciò si eseguono le seguenti operazioni:

- **Frantumazione** → i frammenti di Galena sono ridotti di dimensioni mediante frantumazione a secco (con frantoi a mascelle o rotanti) e poi macinati ad umido in mulini a palle o a barre, fino a ridurne la pezzatura a 0,1 mm di diametro.
- **Flottazione** → ha lo scopo di separare le particelle di minerale contenenti solfuri e gli eventuali metalli preziosi dal resto dei prodotti. Il minerale finemente macinato viene immerso in un contenitore pieno di acqua, chiamato cella di flottazione. A questo punto alla mistura di minerale granulato e acqua, chiamata slurry, è aggiunto l'1% di olio di pino (o composti simili). In seguito allo slurry è applicata una forte agitazione meccanica contemporanea ad un insuflaggio di aria; in questo modo l'olio cattura i particolati di solfato generando così una schiuma oleosa che risale nella parte alta della cella mentre i residui rocciosi, chiamati ganga, scendono verso il fondo.
- **Arrostimento e Sinterizzazione** → una volta finito il processo di flottazione il minerale, per separarlo dall'acqua, è fatto passare attraverso un filtro, dove viene tolta più del 90% d'acqua; in questo modo si ottiene un concentrato avente il 40÷80% di piombo. Al concentrato, ora, sono aggiunti altri materiali portatori di piombo con l'ulteriore aggiunta di sabbia e calcare. Dopo di che, questa mistura viene stesa su di una griglia attraverso la quale viene soffiata aria calda ad una temperatura di 1400°C. A questo punto, è aggiunto del coke avente la funzione di combustibile e di agente ossidante; infatti il piombo si ossida e i solfuri presenti nella mistura reagiscono col carbonio generando diossido di zolfo gassoso, un'importante sottoprodotto della lavorazione del minerale di piombo, il quale viene captato e separato per poi produrre acido solforico. Ad arrostitimento

concluso, si ottiene un materiale molto poroso e fragile, detto verde, per la maggior parte composto da ossido di piombo, contenente però anche ossidi di zinco, di ferro, di silice, e anche calce e solfuri. In conclusione il verde viene spezzato con l'ausilio di mazze ed inviato infine all'altoforno.

- **Fusione** → i principali reagenti all'interno dell'alto forno sono: il coke, caricato dall'alto insieme al minerale, e l'aria, insufflata da condotti posizionati nella parte bassa del forno. Il coke viene aggiunto per due funzioni: la prima è per far fronte alla richiesta di calore e la seconda è immesso come agente riducente. Nelle vicinanze delle tubiere (posizionate in fondo al forno) il carbonio è il primo ad ossidarsi, generando anidride carbonica in una reazione esotermica, parte di questa anidride carbonica reagisce poi con il coke caldo formando monossido di carbonio in una reazione invece endotermica. I gas caldi, derivati da tale reazione, fondono la carica facendola scendere e contemporaneamente, nella risalita verso l'alto, completano la riduzione degli ossidi. La carica dell'altoforno viene effettuata dall'alto, immettendo il sinterizzato e il coke a 25°C, mentre i top gas escono a 170÷200°C. Ciò permette la rimozione dell'umidità presente nella carica nella fase iniziale della sua discesa e quando poi avrà raggiunto una temperatura di circa 200°C, inizierà il processo di riduzione, che proseguirà fino ad una temperatura di circa 400°C. Al di sopra di tale punto, la temperatura aumenta rapidamente a 700÷750°C e la riduzione del metallo per opera del monossido di carbonio aumenterà di efficacia, mentre lo zinco presente nei gas sarà riossidato. Da un metro sotto la parte alta della fornace fino quasi all'altezza delle tubiere, la temperatura della carica e dei gas va da 750 a 900°C. In questa zona i solfuri di piombo reagiscono con l'ossido di piombo per dare piombo metallico. Nella parte terminale del forno la temperatura raggiunta è di 1200°C ed è qui che inizia la fusione della scoria e il metallo fuso viene spillato ad una temperatura di 1150÷1180°C.

- **Affinamento** → dopo che il piombo fuso è spillato dall'altoforno, il bagno contiene altri elementi come: rame, argento, oro, antimonio, arsenico e bismuto. Nel processo di affinazione è quindi necessario recuperare i metalli preziosi e nel contempo eliminare le impurezze. Per fare ciò, si usa la pirometallurgia o l'affinazione elettrolitica. Durante l'elettrolisi, le purezze presenti nel piombo si dissolvono e si depositano sull'anodo, da cui saranno poi rimosse tramite lavaggio e successiva fusione. Comunemente, alla fine del processo, si effettua un ulteriore trattamento con soda caustica. Alla fine, il piombo prodotto è estremamente puro e raggiunge valori prossimi al 99,996%.

3.2.3 – Caratteristiche

Si presenta di colore argento brillante, ma se esposto all'aria diventa subito grigio/grigio bianco a causa della formazione di un film d'ossido di carbonato basico o di solfato basico il quale protegge il metallo da future ossidazioni. Molti sali e cristalli di piombo hanno bassa solubilità e questo fa del piombo uno dei metalli più durevoli nel tempo e più resistenti all'azione corrosiva dell'ambiente; per questo motivo viene anche largamente recuperato e riciclato per poi essere riutilizzato.

Presenta una durezza molto bassa, infatti è un metallo molto duttile e malleabile; di conseguenza non è particolarmente laborioso fargli assumere forme complesse senza bisogno di frequenti ricotture o addolcimenti, come richiesto invece nelle lavorazioni di altri metalli.

Il piombo ha una temperatura di fusione di 327°C, quindi relativamente bassa; ciò rappresenta un grande vantaggio nelle operazioni di fonderia e di saldatura ed inoltre il piombo è utilizzato anche per lo studio del comportamento a creep di altri metalli, in quanto ha un comportamento meccanico a temperatura ambiente simile a quello di altri materiali portati ad alta temperatura. Durezza non elevata, malleabilità e temperatura di fusione bassa sono caratteristiche dovute alla debole forza di legame atomica caratteristica degli atomi del piombo.

3.2.4 – Proprietà Fisiche

Proprietà	Valore
Densità	11,34 kg/dm ³
Numero Atomica	82
Serie Chimica	Metalli del Gruppo p
Peso Atomico	207,2
Struttura Cristallina	Cubico Facce Centrate (CFC)
Stato (T _{amb})	Solido
Temperatura di Fusione	327,42°C
Temperatura di Ebollizione	1740°C
Durezza	1,5 (Mosh)

Tabella 3.2 – Principali proprietà fisiche del piombo

3.2.5 – Proprietà Meccaniche

Come si può notare dalla tabella 3.2, il piombo presenta una temperatura di fusione molto bassa. Di conseguenza questo metallo viene utilizzato a temperature non troppo elevate. Quando sottoposto a sforzi permanenti è soggetto a creep, anche a temperatura ambiente, oltre a ricristallizzazione se soggetto a bassi carichi. Questo comporta che i test meccanici (modulo elastico, durezza, ecc.) sono influenzati dal tipo di carico applicato e anche dalla specifica composizione chimica della lega di piombo in esame.

Presenta una durezza Brinnell fra le più basse all'interno dei materiali metallici (compresa fra 3 e 4), quindi lo rende estremamente malleabile.

Anche il modulo elastico è molto basso, nell'intorno dei 15 GPa, come anche il carico di rottura a trazione, circa 10/13 MPa a seconda della lega.

3.2.6 – Proprietà Chimiche

Il piombo ha una forte resistenza all'attacco da parte di un'ampia gamma di acidi e di sali a diverse concentrazioni. La resistenza alla corrosione dipende da due importanti fattori: il primo, dovuto alla bassa solubilità in soluzioni acquose di molti dei suoi sali e cristalli in un ampio range di pH, con l'importante eccezione degli acetati, nitrati e cloruri; il secondo fattore,

decisivo, è la formazione di uno strato superficiale di ossido molto compatto che protegge il metallo da ulteriori ossidazioni.

- **Resistenza in aria** → il piombo non si opacizza in aria secca, ma in aria umida si ossida superficialmente, dando origine ad uno strato di ossido protettivo di carbonato di piombo, che non causa abbassamenti delle proprietà meccaniche.
- **Resistenza in acqua** → l'acqua pura non attacca il piombo; l'acqua comune, invece, contiene vari elementi tra cui ossigeno, anidride carbonica, carbonati, solfuri e clorati, alcuni dei quali possono condurre un attacco superficiale. La velocità di corrosione, quindi, varia secondo la natura dell'acqua con la quale il piombo è esposto, ma in genere è di $2\div 20\ \mu\text{m}/\text{anno}$.
- **Resistenza chimica** → il piombo presenta buona resistenza ad acidi solforici, solforici, cromatici e fosforici e a loro sali. La resistenza a corrosione dipende dalla polarizzazione del locale anodo nella cella di corrosione e dall'aderenza del film protettivo e dalla sua relativa stabilità, la quale è il fattore che maggiormente governa la resistenza a corrosione del piombo. Presenta una rapida corrosione in acido nitrico, acetico e formico, in linea quindi con l'elevata solubilità dei loro rispettivi sali in acqua. La resistenza del piombo, è comunque fortemente dipendente dalla temperatura e dalle relative concentrazioni.

3.2.7 – Processi di Lavorazione

Come già detto in precedenza, il piombo è un metallo che possiede un'elevata malleabilità e duttilità e questo ne fa un materiale estremamente deformabile, anche a temperature non elevate. L'incrudimento dovuto a lavorazioni a freddo, tipico di molti materiali metallici, non avviene nel piombo. Da rilevare che la bassa temperatura di fusione del piombo rappresenta un'evidente vantaggio per le operazioni di fonderia.

Vediamo, ora, qualche metodo di produzione di questo materiale metallico:

- **Laminazione** → i laminati di piombo sono utilizzati soprattutto nel campo dell'edilizia e negli impianti chimici. La temperatura

di lavorazione è moderatamente bassa: $100\div 180^{\circ}\text{C}$, con una velocità delle lastre di $30\div 50$ m/min e con una riduzione di 30 mm. Riduzioni più leggere sono effettuate con velocità maggiori, circa 100 m/min, e sono tipicamente effettuate nelle passate finali. Nell'operazione di laminazione sono usate emulsioni di olio per lubrificare e per l'asportazione di calore. Dopo la laminazione vera e propria, gli ultimi passaggi consistono in: lucidatura, taglio, raffreddamento e avvolgimento in rotoli. Con la laminazione si producono anche fogli aventi spessori di 0,005 mm.

- **Estrusione** → con l'estrusione si producono molte tipologie di manufatti, fra i quali tubi, cavi e fili. La facilità di lavorazione del piombo a modeste temperature, permette di avere anche estrusi di varie e complesse forme. Utilizzando piombo fuso, è possibile effettuare estrusioni continue ad una temperatura di $400\div 450^{\circ}\text{C}$, utilizzando un sistema simile a quello adottato nello stampaggio per materie plastiche (attraverso vite senza fine, quindi).
- **Stampaggio per colata** → la colata del piombo fuso è effettuata per gravità in stampi in sabbia, per pressofusione o in modalità continua. Molto spesso vengono utilizzati anche stampi in acciaio o in ghisa. Come già detto, il piombo e le sue leghe sono idonei alla formazione di getti, grazie alla bassa temperatura di fusione e per la mancanza di solubilità nei confronti di gas come idrogeno e ossigeno che il piombo contiene allo stato fuso.
- **Saldatura** → la saldatura tra lastre di piombo è effettuata con fiamma ossiacetilenica o con gas ossipropanico. Per alcune applicazioni si utilizza anche la saldatura ad arco. Dato che il piombo ha bassa temperatura di fusione, non è necessario un grande apporto di calore, ma per contro è necessario molta attenzione nella tecnica e condizioni di saldatura, questo per evitare sovra riscaldamenti con una conseguente possibile eccessiva penetrazione, la quale può generare la formazione di pori sulla lastra stessa.

3.2.8 – Protezione contro le Radiazioni

Il piombo è utilizzato per la protezione contro le radiazioni X e gamma; infatti è possibile constatare che la protezione garantita da una lastra di piombo dello spessore di 4 mm equivale a quella fornita da una lastra di acciaio spessa 53 mm o da un muro in mattoni di 450 mm. Per tale applicazione si usa piombo puro, con l'aggiunta di piccole quantità di antimonio per migliorare le caratteristiche meccaniche.

L'attenuazione delle radiazioni sono frutto di due fenomeni:

- **Effetto Compton** → ha luogo quando l'energia del fotone incidente è molto più elevata dell'energia di legame dell'elettrone con il quale interagisce. Il fenomeno può essere descritto dalla meccanica classica come un urto elastico tra due particelle.
- **Effetto fotoelettrico** → avviene quando un fotone, interagendo con un elettrone fortemente legato ad un atomo, cede completamente la sua energia, espellendo un elettrone.

Per le radiazioni a bassa energia l'effetto fotoelettrico, il quale ha come origine la collisione dei nuclei pesanti, è l'effetto predominante. La sezione efficace di collisione varia secondo la potenza Z^5 , di interesse particolare per un materiale schermante è l'aver un numero atomico elevato come il piombo ($Z=82$).

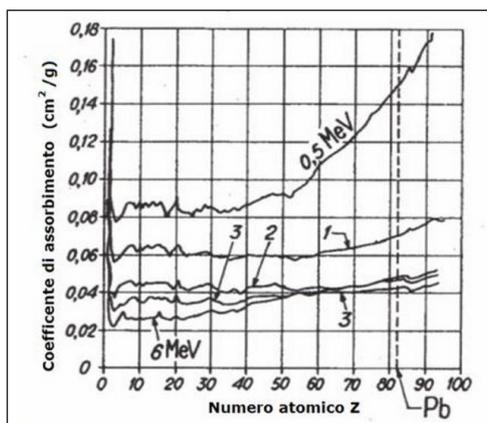


Figura 3.4 - Assorbimento totale delle radiazioni gamma a diverse energie e in funzione del numero atomico degli elementi.

Nel campo di energia più elevata (superiore all'ordine di grandezza di un megaelettronvolt (MeV)), il coefficiente di assorbimento è semplicemente una funzione del numero atomico e la superiorità del piombo nella protezione contro le radiazioni si fa più pronunciata.

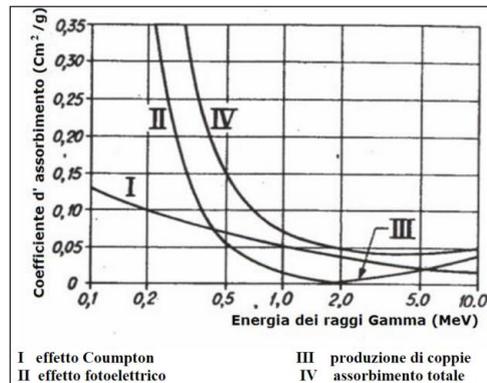


Figura 3.5 - Assorbimento delle radiazioni gamma da parte del piombo a diverse energie

Lo spessore della lastra di piombo da utilizzare per ridurre i valori di radiazioni ad un valore inferiore al massimo consentito, a un metro di distanza dalla sorgente radiogena, viene riportato nella figura 3.6.

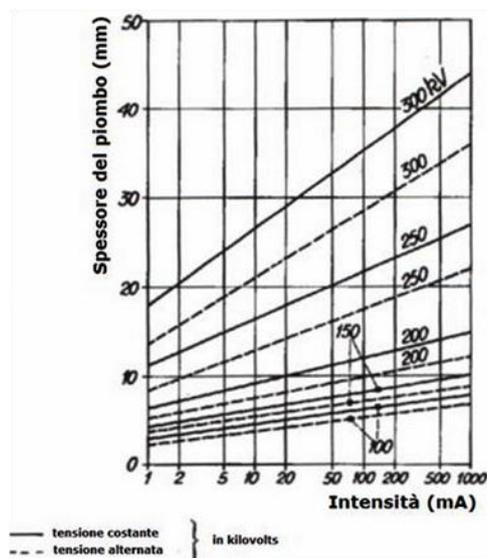


Figura 3.6 – Spessore del piombo in funzione dell'intensità di corrente

3.2.9 – Tossicità

Il piombo figura al secondo posto nella lista delle sostanze pericolose indicate dall'ATSDR (Agency for Toxic Substances and Disease Registry). La nocività di questo metallo è nota da molto tempo, specie nelle sue

manifestazioni acute (colica saturnina). Tuttavia recentemente, come è accaduto per numerosi altri agenti inquinanti, la dose considerata critica è stata notevolmente abbassata. Fino a circa trent'anni fa l'avvelenamento cronico da piombo era definito dalla presenza di una dose superiore a 80 µg/dl nel sangue, mentre attualmente viene considerata alta una dose di piombo di 30 µg/dl e potenzialmente nocive, specie nello sviluppo, quantità uguali o superiori a 10 µg/dl, cioè (0,1 ppm).

Assorbito essenzialmente attraverso la respirazione e la nutrizione, il piombo non viene metabolizzato ma per larga parte escreto, mentre il resto (circa 20%) si distribuisce nei tessuti e in particolare:

- **Sangue** → circola quasi esclusivamente negli eritrociti
- **Tessuti Minerali** → (ossa e denti), ove si accumula
- **Tessuti Molli**

La presenza di piombo nel sangue, all'interno dei globuli rossi e in massima parte legato all'emoglobina, provoca anemia, che deve però considerarsi non un sintomo, ma una manifestazione tardiva dell'avvelenamento da piombo; attraverso il sangue, poi, il piombo si distribuisce in tutti gli altri tessuti.

Il piombo è in grado di danneggiare praticamente tutti i tessuti, in particolare i reni e il sistema immunitario. La manifestazione più subdola e pericolosa dell'avvelenamento da piombo è quella a carico del sistema nervoso. L'esposizione intensa ad elevate dosi di piombo (da 100 a 200 µg/dl) provoca encefalopatia, i cui sintomi sono: vertigini, insonnia, cefalea, irritabilità e successivamente crisi convulsive e coma.

La tossicità del piombo deriva in larga misura dalla sua capacità di “imitare” il calcio, ovvero di sostituirsi ad esso in molti dei processi cellulari fondamentali che dipendono dal calcio. Il piombo può attraversare la membrana cellulare mediante diversi sistemi, non ancora completamente chiariti. Poiché il piombo è largamente utilizzato (anche se molto meno che in passato), molte sono le possibilità di esposizione. Il piombo può essere introdotto nell'organismo attraverso tre vie:

- **Inalatoria** → sotto forma di polveri e fumi, finisce nell'organismo attraverso le vie respiratorie.
- **Orale e Cutanea**

3.3 – Tungsteno

La storia del tungsteno risale al XVII secolo. Nel 1758 il chimico e mineralista svedese Axel Fredrick Cronstedt, scoprì e descrisse un'inusuale minerale pesante a cui diede il nome di tung-steen, che in lingua svedese significa roccia pesante. Egli ebbe l'intuizione che questo materiale contenesse un elemento nuovo e quindi ancora non scoperto. Tuttavia si dovette attendere il 1781 quando un farmacista svedese, Carl Wihelms Scheele, riuscì ad isolare quello che è ora conosciuto come il triossido di tungsteno. Indipendentemente da Scheele, due chimici spagnoli, i fratelli Elhuyar de Suvisa, ridussero per primi il minerale della wolframite ottenendo il tungsteno metallico nel 1783.

Jöns Jacob Berzelius nel 1816 e più tardi Friedrich Wöhler nel 1824 descrissero gli ossidi e i bronzi del tungsteno e diedero al metallo il nuovo nome di wolframio. Mentre in Germania e in Scandinavia prendeva piede questa dicitura, i paesi anglosassoni preferivano il nome di tungsteno. Nel 1821, Karl Cäsar Ritter von Leonhard propose il nome Scheelite per il minerale CaWO_4 .

Il primo tentativo di produrre acciai al tungsteno fu fatto nel 1855, ma il suo uso industriale non era possibile a causa dell'alto costo del tungsteno metallico. La prima applicazione industriale del tungsteno come elemento di lega nel metallo risale al XIX secolo. Il lancio degli acciai rapidi da parte della Bethlehem acciai agli inizi del 1900 all'esposizione mondiale di Parigi contribuì allo sviluppo su scala mondiale di questo metallo come alligante negli acciai super rapidi (HSS).

Il secondo importante sprone allo sviluppo delle applicazioni che sfruttavano il tungsteno, fu dato da William David Coolidge nel 1903. Coolidge riuscì ad ottenere un filo di tungsteno duttile drogando il tungsteno prima della riduzione da ossido. La risultante polvere metallica fu pressata, sinterizzata e forgiata in cilindri di piccolo spessore. Sottoponendo questi cilindri a trazione, Coolidge riuscì ad ottenere un filo molto sottile. Questo era l'inizio della metallurgia delle polveri di tungsteno, che fu alla base del futuro sviluppo dell'industria delle lampade a incandescenza.

Bisogna aspettare il 1923 per la deposizione di un'ulteriore pietra miliare nella storia del tungsteno. Quest'anno annovera infatti l'invenzione del metallo duro (oggi giorno chiamato Widia, ottenuto combinando carburo di tungsteno e cobalto, sfruttando la fase liquida della sinterizzazione) per mano di K. Schröter. Brevettato poi nel 1926, il metallo duro è rimasto fino ai giorni nostri la maggiore applicazione del tungsteno, per la realizzazione di utensili per la lavorazione dei metalli.



Figura 3.7 – A sinistra la Scheelite e a destra la Wolframite

3.3.1 – Estrazione del Tungsteno

Una volta estratte le rocce (scheelite e wolframite) contenenti tungsteno, queste vengono frantumate in particelle molto fini, in modo tale da avere una grande superficie di reazione quando si andrà ad estrarre tungsteno. Per la vagliatura delle granulometrie si utilizza il metodo di separazione chiamato floating separation, molto spesso affiancata da una serie di sistemi magnetici o ad alta tensione per favorire la selezione della granulometria ottimale.

Nella riduzione del tungsteno è necessario ottenere, come intermedio di reazione, il paratungstato di ammonio (APT). Per ottenere ciò si procede alla decomposizione delle rocce sfruttando attacchi acidi o processi in autoclave (più utilizzato) che sfruttano entrambi la reattività del sodio. Il processo in autoclave consiste in un mantenimento per un tempo variabile da 1 a 4 ore a $130\div 190^{\circ}\text{C}$ di una soluzione al $10\div 18\%$ di carbonato di sodio contenente scheelite o la wolframite e una pressione compresa fra 14 e 20

bar. Avvenute le reazioni necessarie si abbassa la temperatura a circa 80°C e si porta il valore di pH a 9÷9,5 mediante opportune aggiunte. Si aggiungono, quindi, solfati di alluminio e manganese e si tiene il sistema in agitazione per circa 1 ora. In questo modo elimino definitivamente fosforo ed arsenico e riduco la percentuale di silicio a circa 0,03÷0,06%.

Per la rimozione del molibdeno è necessario aggiungere solfuro di sodio mantenendo la temperatura a circa 80°C, ma elevando ulteriormente il pH fino a valori di 10. A questo punto devo mantenere queste condizioni per circa 1 ora, al termine della quale si acidifica la soluzione a pH 2,5÷3 e si mantiene tutto in agitazione per 7÷9 ore, al fine di far precipitare il solfuro di molibdeno. A seguito di questi trattamenti ottengo una soluzione di tungstato di sodio. Questa soluzione può essere ripulita dalle impurezze rimanenti usando un processo di scambio di ioni in fase liquida. Si estrae quindi ammonio tungstato dalla soluzione di ammoniacca. La soluzione ottenuta viene quindi mandata in un evaporatore per ottenere paratungstato di ammonio cristallino. Quando il paratungstato di ammonio è decomposto in ossido di tungsteno, mostra tutte le cromie che caratterizzano le diverse stechiometrie: il triossido è giallo (ottenuto attraverso riscaldamento a 250°C), il diossido ambrato scuro e l'ossido intermedio violetto/blu. Nella maggior parte dei casi, il paratungstato di ammonio viene decomposto nell'ossido intermedio in un forno a rotazione, attraverso l'utilizzo di getti di idrogeno gassoso i quali hanno la funzione di decomporre parzialmente i gruppi ammonio presenti nei cristalli e trasformarli in idrogeno e azoto, mantenendo tuttavia un'atmosfera riducente. Il forno rotante è diviso in 3 zone mantenute rispettivamente a 850°, 875°, 900°C. L'ossido intermedio può essere infine ridotto a tungsteno metallico (sotto forma di polveri) in forni comuni ad una temperatura compresa tra 550° e 850°C. Durante questo processo l'ossido è caricato in opportuni contenitori, chiamati boats, realizzati di Inconel (lega a base di nichel di cui si sfrutta la buona resistenza meccanica ad alte temperature). Le polveri vengono quindi introdotte in dei canali cilindrici, generalmente organizzati a file di due, i quali vengono scaldati in modo diverso e crescente in 3 zone diverse.

3.3.2 – Caratteristiche

Il tungsteno puro ha un colore che varia dal grigio acciaio al bianco. Si presenta estremamente duro, temperatura di fusione estremamente elevata (la più alta fra i materiali puri), la più bassa pressione di vapore e la più alta resistenza alla trazione a temperature oltre i 1650°C fra tutti i metalli. Ha una ottima resistenza alla corrosione, la maggior parte degli acidi minerali lo intacca solo debolmente. Sulla superficie del tungsteno metallico si forma uno strato protettivo di ossido all'aria, ma questa protezione viene meno alle alte temperature, a cui l'ossidazione non viene fermata.

Proprietà	Valore
Densità	19,25 kg/dm ³
Numero Atomico	74
Serie Chimica	Metalli di Transizione
Peso Atomico	183,84
Struttura Cristallina	Cubica Corpo Centrato (CCC)
Stato (a T _{amb})	Solido
Temperatura di Fusione	3422°C
Temperatura di Ebollizione	5555°C
Durezza	7,5 (Mosh)
Modulo Elastico	406 GPa

Tabella 3.3 – Principali proprietà del tungsteno

Presenta un valore del modulo elastico molto alto e una buona resistenza al creep. Tuttavia, la sua alta densità, la sua scarsa duttilità a basse temperature e la sua forte reattività in aria limitano fortemente i suoi usi. Le massime temperature di applicazione per il tungsteno vanno dai 1900° ai 2500°C, ma è necessaria una protezione superficiale se si intende lavorare attorno a queste temperature limite in aria. La lavorazione a freddo conferisce al tungsteno buona resistenza meccanica, fortemente direzionata lungo la direzione di lavorazione. La tenacità a temperatura ambiente non è elevata. Se riscaldato attorno ai 1370°C, si induce una ricristallizzazione che ha come effetto quello di infragilire il materiale. E' dunque necessario utilizzare elementi in lega per innalzare la temperatura di ricristallizzazione del tungsteno e rendere così migliori le proprietà ad alte temperature. L'alta temperatura di fusione del tungsteno lo rende una scelta molto indicata per le applicazioni strutturali soggette ad alte temperature. A temperature basse

viene sfruttato il suo elevato modulo elastico, la sua elevata densità e il suo potere schermante dalle radiazioni.

3.3.3 – Classificazione

Il tungsteno e le sue leghe sono prodotti mediante metallurgia delle polveri in quanto, come è già stato scritto, esso possiede una temperatura di fusione molto elevata. Questi materiali, quindi, subiscono le fasi di pressatura, sinterizzazione e forgiatura in fogli, barre o fili. Spesso le fasi di forgiatura sono complesse e necessitano della tecnologia near net shape.

I prodotti industriali del tungsteno possono essere divisi in 3 distinti gruppi sulla base del loro comportamento a ricristallizzazione:

- **Gruppo 1** → fanno parte il tungsteno non legato fuso ad arco, altre forme di tungsteno puro e il tungsteno legato con renio o molibdeno. Questi materiali, a seguito della prima cristallizzazione, mostrano una struttura cristallina a grani equiassici. Temperatura di cristallizzazione e dimensione dei grani diminuiscono all'aumentare dello stress indotto a freddo.
- **Gruppo 2** → comprende le polveri di tungsteno di purezza commercial grade. Come il primo gruppo mostrano la formazione di grani equiassici, ma le temperature di ricristallizzazione sono maggiori dei materiali del primo gruppo. In questo modo questi materiali non mostrano una diminuzione della temperatura di cristallizzazione e della dimensione dei grani all'aumentare dello stress indotto a freddo.
- **Gruppo 3** → Il terzo gruppo comprende il tungsteno AKS (ovvero drogato con alluminio, potassio e silicio), il tungsteno legato con renio, e il tungsteno puro legato con più dell'1% di biossido di torio. Questi materiali sono caratterizzati da alte temperature di ricristallizzazione (superiori a 1800°C) e da un'unica struttura della grana cristallina. Questa struttura è ideale per la produzione di fili in tungsteno in cui si ricerca una microstruttura a grani allungati interconnessi. Particolarmente interessante è il tungsteno AKS: durante la trafilatura il potassio

contenuto nei grani viene spinto in avanti lungo la direzione di lavorazione. Quando il filo viene scaldato il potassio volatilizza in un filamento lineare di particelle di dimensioni submicrometriche. Queste particelle bloccano i grani allineandoli e comportandosi come una seconda fase dispersa. Le file di particelle diventano più fini e lunghe all'aumentare della deformazione. In questo modo la temperatura di ricristallizzazione cresce e la struttura interconnessa si fa sempre più pronunciata.

3.4 – Rame

Conosciuto fin dalla preistoria, il rame è stato probabilmente il primo metallo utilizzato per costruire armi, utensili e attrezzi rudimentali. Oggetti di rame sono stati trovati tra i resti di molte civiltà antiche, ad esempio in Egitto, in Asia, in Europa e in Grecia; i romani, che lo chiamarono *cyprum*, lo utilizzavano anche per la realizzazione di strumenti adibiti alle pratiche religiose.

I minerali del rame si trovano nella crosta terrestre sotto varie forme e concentrazioni. Nei 10 km più esterni della crosta terrestre, ve ne sono 33 grammi per tonnellata di roccia. Può trovarsi sotto forma di solfuri, ossidi, carbonati, silicati o altro composti, o più raramente, allo stato nativo. I minerali più abbondanti, che coprono l'80% dei depositi conosciuti a livello mondiale, sono la calcopirite e la bornite, che contengono entrambi solfuri di rame e ferro.



Figura 3.8 – Minerale di rame

Il rame è un'importante metallo, molto usato sia allo stato puro che combinato con altri metalli per generare leghe. Se utilizzato allo stato puro presenta una straordinaria combinazione di proprietà per certe applicazioni industriali, fra le quali è possibile citare:

- Alta conducibilità, sia elettrica che termica.
- Buona resistenza alla corrosione.
- Facilità di lavorazione.
- Buone caratteristiche meccaniche.

Se si vogliono ottenere caratteristiche meccaniche più elevate, vengono utilizzate leghe quali ottone (rame legato con zinco) e bronzi (rame e stagno).

3.4.1 – Produzione

Come scritto nel paragrafo introduttivo, il rame viene estratto da minerali che contengono solfuri di rame e ferro. Il solfuro di rame concentrato, ottenuto da minerali poveri, viene fuso in un forno a riverbero per produrre la così detta metallina, che è un insieme di solfuri di rame e ferro, che viene poi separata dalla scoria. Il solfuro di rame, contenuto all'interno della metallina, viene quindi convertito chimicamente in rame grezzo (con tenore maggiore del 98%) per mezzo di aria insufflata. In questa operazione il solfuro di ferro viene ossidato per primo e rimosso come scoria. In seguito la maggior parte delle impurezze presenti nel rame grezzo vengono rimosse in un forno di raffinazione ed eliminate come scoria. Il rame raffinato alla fiamma viene chiamato rame “tough pitch” e, benché possa essere usato per molte applicazioni, la maggior parte viene ulteriormente raffinata per via elettrolitica per ottenere un rame “raffinato elettrolitico” al 99,95%.

3.4.2 – Proprietà

Elemento metallico marrone-rosso, di simbolo Cu e numero atomico 29, con struttura reticolare cubica a facce centrate; appartiene agli elementi di transizione della tavola periodica. Presenta una densità pari a 8,92 kg/dm³ e

una temperatura di fusione di 1083°C. di seguito, in tabella 3.4, vengono riportate le principali caratteristiche fisiche e meccaniche di questo materiale metallico, allo stato puro.

Proprietà	Valore
Numero Atomico	29
Struttura Reticolare	CFC
Peso Atomico	63,546
Densità	8,96 kg/dm ³
Temperatura Fusione	1083°C
Modulo Elastico	117 GPa
Carico Rottura	216 MPa
Carico Snervamento	48 MPa
Allungamento a Rottura	48 %
Durezza	3 (Mosh)

Tabella 3.4 – Principali proprietà fisiche e meccaniche del rame

3.5 – Materiali Polimerici

Sono materiali sintetici derivati dal petrolio, ottenuti attraverso processi di sintesi, composti principalmente da carbonio e idrogeno. Sono il componente base di tutto ciò che viene chiamato plastica. Hanno una grande importanza, dovuta principalmente alla loro modulabilità, basso costo, estrema leggerezza e un elevato allungamento a rottura.

3.5.1 – Definizione

I materiali polimerici sono macromolecole (cioè presentano un elevato peso molecolare) costituite da un gran numero di gruppi molecolari (monomeri), tenuti assieme da legami di tipo covalente, i quali formano lunghe catene.

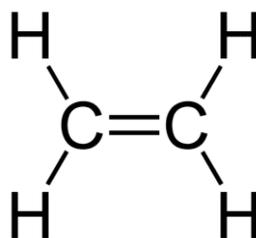


Figura 3.9 – Etilene, monomero più semplice.

Si può notare il legame doppio fra gli atomi di carbonio

Questi gruppi molecolari, chiamati monomeri, possono generare due tipologie di polimeri:

- **Omopolimeri** → in questo caso i monomeri sono tutti uguali fra loro.
- **Copolimeri** → in questo caso i monomeri sono diversi fra loro. I copolimeri possono essere a loro volta:
 - **Casuali** → in questo caso i monomeri sono disposti in maniera casuale; ad esempio ABBABAA, prendendo in considerazione un copolimero formato da due monomeri diversi:



Figura 3.10 – Copolimero casuale

- **Alternati** → i monomeri sono disposti in maniera alternata; facendo sempre un esempio, ABABAB.



Figura 3.11 – Copolimero alternato

- **Blocchi** → i monomeri sono alternati a due a due; ad esempio AABBA.



Figura 3.12 – Copolimero a blocchi

- **Innesto** → i monomeri sono collegati alla catena principale, formata da monomeri dello stesso tipo, a modi grappolo; ad esempio:

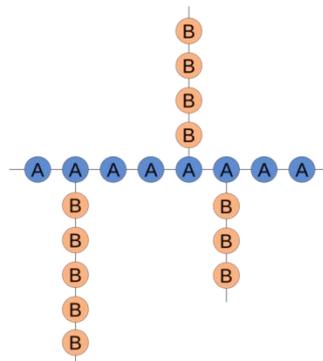


Figura 3.13 – Copolimero ad innesto

3.5.2 – Tipologie

A seconda del tipo di legame che si viene a formare fra le varie lunghe catene di monomeri (tenuti assieme da legami di tipo covalente, come precedentemente scritto), è possibile avere due tipologie differenti di materiali polimerici:

- **Termoplastici** → presentano legami di tipo debole, come legami di Van der Waals, legami secondari. Questo comporta la caratteristica di essere fusibili, quindi riciclabili. Il processo di formazione di questa tipologia di polimeri viene chiamato polimerizzazione.
- **Termoindurenti** → presentano legami molto forti fra le varie catene, come legami covalenti, difficili da rompere; il polimero, quindi, si presenta come una grossa macromolecola. Questo comporta la caratteristica di essere infusibili, quindi non riciclabili. Il processo di formazione di questa tipologia di polimeri viene chiamato reticolazione.

Oltre a questa distinzione, è possibile effettuarne un'ulteriore, a seconda di come si vengono a distribuire le lunghe catene di monomeri. In base a ciò, si definiscono polimeri:

- **Lineari** → le lunghe catene si distribuiscono a modi spaghetti, in maniera disordinata.

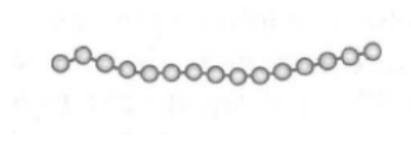


Figura 3.14 – Polimero lineare

- **Ramificati** → quando le catene hanno alcune ramificazioni laterali.

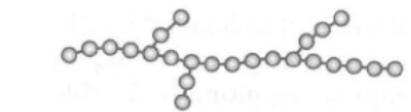


Figura 3.15 – Polimero ramificato

- **Legami incrociati** → fra le varie catene si instaurano legami di tipo primario, come legami covalenti. E' ciò che avviene nei polimeri termoindurenti.

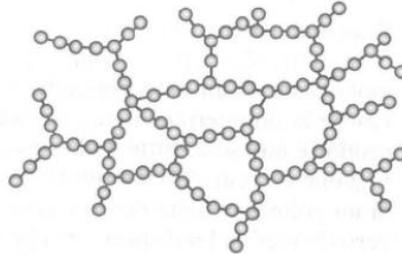


Figura 3.16 - Polimero a legami incrociati

- **Reticolati (Cross Linked)** → anche in questo caso si hanno sempre legami di tipo primario fra le varie catene.

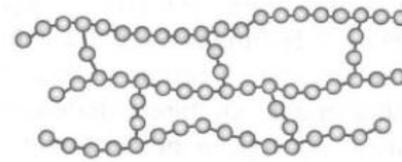


Figura 3.17 – Polimero reticolato

3.5.3 – Polimeri Amorfi e Cristallini

Un'altra caratteristica fondamentale dei materiali polimerici è il loro grado di cristallinità. Un cristallo solido è una struttura in cui le unità costituenti (atomi e molecole) sono disposte in maniera ordinata nello spazio secondo schemi ripetitivi. Nessun polimero è completamente cristallino; solitamente sono materiali semicristallini, cioè materiali in cui si possono distinguere zone cristalline e zone amorfe.

- **Struttura amorfa** → si intende un polimero in cui le lunghe catene di monomeri sono disposte in maniera disordinata. Una volta solidificati hanno un comportamento del tutto simile a quello del vetro, compresa la sua trasparenza, come ad esempio il policarbonato, il quale è estremamente amorfo e più trasparente del vetro stesso.
- **Struttura cristallina** → si intende un polimero in cui le lunghe catene di monomeri sono disposte in maniera ordinata. Questo

comporta un minor contenuto energetico, con caratteristiche meccaniche maggiori. Il grado di cristallinità può variare fra il 5 e il 95% (quest'ultima può essere raggiunta solo nel caso di polimeri termoplastici, come il polietilene ad alta densità); il 100% non può essere mai raggiunto da un polimero.

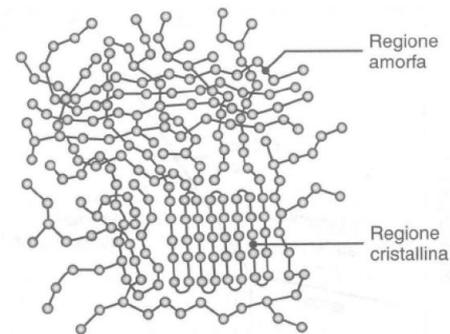


Figura 3.18 – Polimero amorfo e cristallino

La struttura cristallina si genera attraverso il compattamento delle lunghe catene di monomeri, come rappresentato in figura 3.19.



Figura 3.19 – Struttura cristallina compattata

Durante la solidificazione del polimero fuso, si origina il primo germe. In seguito si ha la nucleazione secondaria, con ripiegamenti della catena e formazione di una nuova lamella secondo un accrescimento sferico. Ciò è molto simile al processo che avviene nei materiali metallici, con appunto fase di nucleazione e successivo accrescimento. Questo processo prosegue, formando la così detta sferulite, la quale è una regione semicristallina all'interno di un polimero lineare non ramificato. Man mano che queste sferuliti crescono possono incontrarsi le une con le altre, dando origine al bordo di sferuliti. Tale bordo risulta essere una zona particolarmente fragile del materiale polimerico.

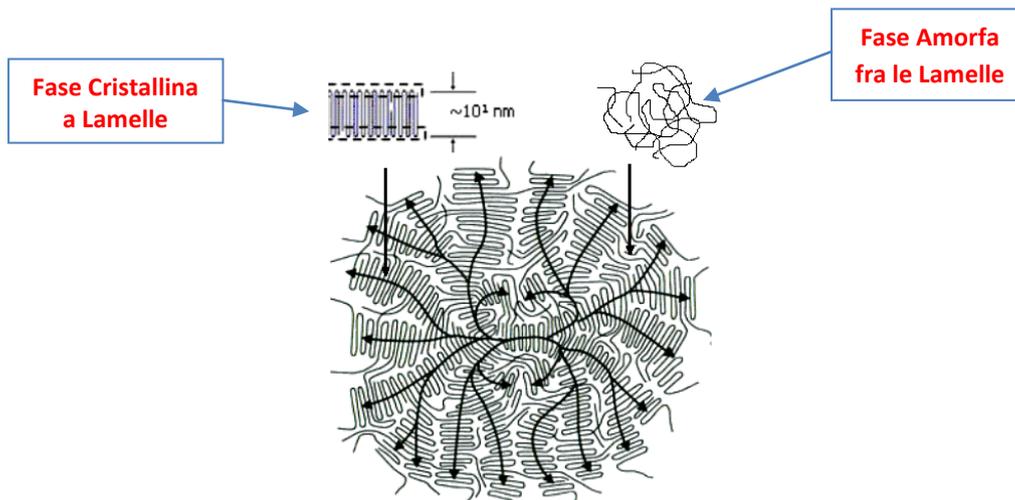


Figura 3.20 - Rappresentazione schematica dell'arrangiamento delle lamelle in uno sferulita; le frecce indicano le direzioni dei piani delle lamelle.

Non tutti i polimeri possono cristallizzare: occorrono regolarità di costituzione e di configurazione. Più è regolare la catena, più è facile che la percentuale di cristallinità sia elevata, in quanto le macromolecole riescono ad allinearsi ordinatamente nello spazio. I polimeri ad alta cristallinità possiedono proprietà meccaniche migliori e presentano una temperatura di fusione più elevata.

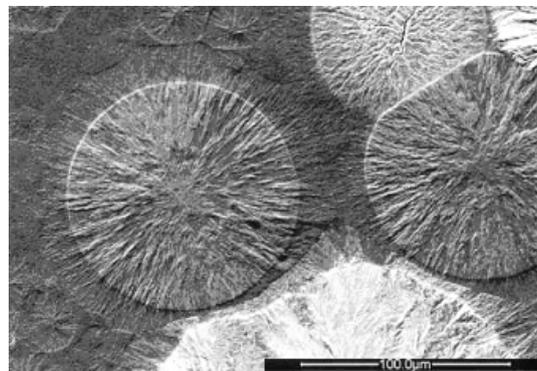


Figura 3.21 - Immagine al microscopio elettronico di cristalli in forma di sferuliti nel polipropilene (PP).

3.5.4 – Transizione Vetrosa e Plasticità

Nei polimeri cristallini, aumentando la temperatura, si arriva alla fusione del materiale (temperatura di fusione T_m , appunto).

Nei polimeri amorfi, invece, si ha la così detta transizione vetrosa, a una temperatura indicata come temperatura di transizione vetrosa (T_g). Sotto questa temperatura il polimero è caratterizzato da una mobilità molecolare

limitata e si presenta vetroso, mentre al di sopra di essa si presenta gommoso; aumentando ancora la temperatura, diventa fluido a causa della relativa libertà di scorrimento delle catene.

La transizione vetrosa non è una transizione termodinamica, ma cinetica, alla quale non corrisponde alcun cambiamento della posizione degli atomi/molecole nello spazio; il polimero conserva il disordine strutturale caratteristico dello stato amorfo. La variazione di mobilità delle catene polimeriche si traduce in una dipendenza della rigidità dalla temperatura; infatti, in corrispondenza della temperatura di transizione vetrosa, la variazione del modulo elastico è di circa tre ordini di grandezza (si passa dal GPa al MPa). Per temperature prossime alla $T_g+100^\circ\text{C}$, il modulo si riduce drasticamente, tanto che non si può più parlare di rigidità, ma il materiale si considera un fluido. Se un polimero presenta una temperatura di transizione vetrosa maggiore della temperatura ambiente, essi si presentano rigidi e fragili a temperatura ambiente, come il PVC, il PC, PS o il PMMA. Al contrario, essi si presenteranno duttili come il PE o il PP.

Considerando che la stragrande maggioranza dei materiali polimerici sono semicristallini (quindi presentano zone cristalline e zone amorfe), essi presenteranno sia la temperatura di transizione vetrosa, sia la temperatura di fusione. Questo comporta che una parte di materiale (amorfo) subisce solamente la transizione vetrosa, mentre la parte rimanente (cristallino) subisce solo la fusione. E' possibile, quindi, distinguere tre zone di temperatura:

- $T < T_g \rightarrow$ si ha una situazione in cui si possono distinguere la fase cristallina e amorfa.
- $T_g < T < T_m \rightarrow$ le due fasi sono ancora distinte, con una fase gommosa e una fase cristallina.
- $T > T_m \rightarrow$ si ha uno stato fluido, in cui non si distinguono più le due fasi.

Quando un polimero cristallino fonde, alla temperatura di fusione si ha un assorbimento di calore, senza variazione di temperatura (calore latente). Quando, invece, un polimero amorfo raggiunge la temperatura di transizione vetrosa, non si ha calore latente; la temperatura continua ad aumentare,

anche se con pendenza diversa, in quanto il calore specifico del polimero è cambiato.

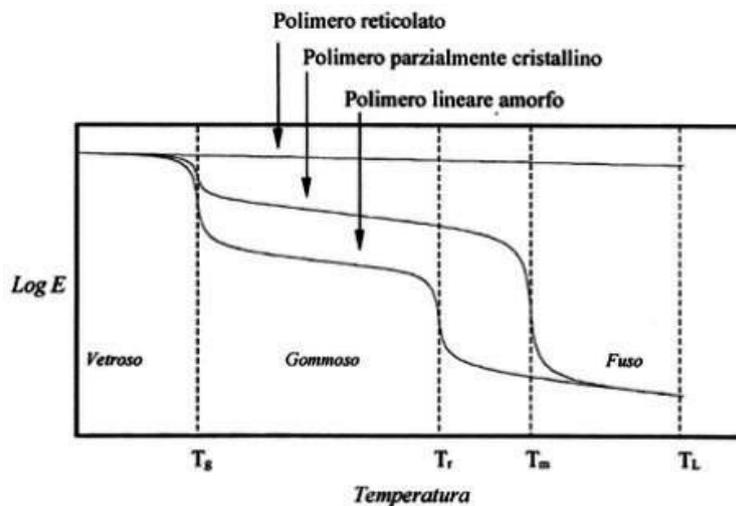


Figura 3.22 – Modulo elastico in funzione della temperatura, al variare del grado di cristallinità

3.5.5 – Caratteristiche Meccaniche

I materiali polimerici sono in genere caratterizzati da bassi valori del modulo elastico (E), nell'ordine di qualche GPa, il quale comporta bassa rigidità e anche da bassi valori di resistenza. La rigidità di un materiale polimerico dipende dalla temperatura; infatti, all'aumentare di essa, la rigidità tende a diminuire. La rottura di un materiale polimerico può avvenire in due modi:

- **Crazing** → in questo caso si ha un comportamento fragile del materiale, dovuto alla formazione di microcricche, con rottura improvvisa.
- **Scorrimento** → in questo caso si ha un comportamento duttile del materiale, con frattura che ha luogo a grandi deformazioni.

Un polimero semicristallino presenta un diagramma tensione-deformazione di questo tipo:

- 1) Tratto **lineare elastico**, dove la struttura amorfa funziona da molla. In questa zona vale la legge di Hooke.
- 2) In questo tratto anche i cristalli iniziano ad orientarsi in direzione dello sforzo applicato, pur essendo sempre in condizioni lineari elastiche.

- 3) Zona di strizione, dove si generano degli scorrimenti all'interno delle lamelle , con formazione di lamelle sempre più piccole.

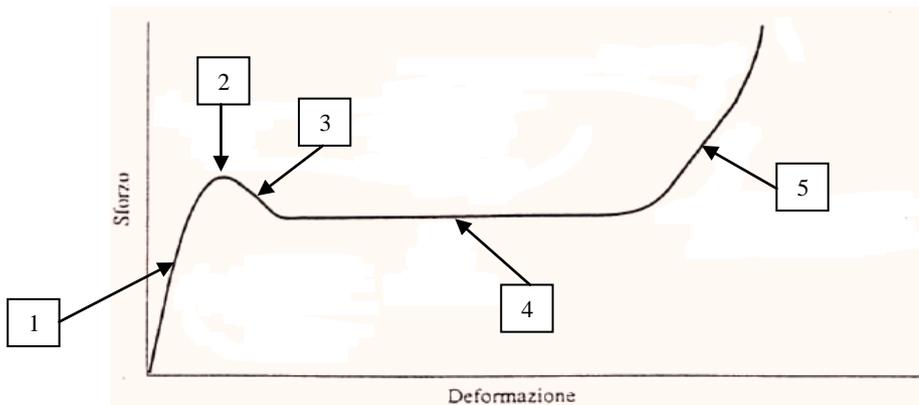


Figura 3.23 – Diagramma Tensione-Deformazione polimero semicristallino

- 4) I cristalli tendono sempre di più ad orientarsi in direzione dello sforzo applicato, con un notevole aumento della resistenza. Si ha un allungamento della zona caratterizzata dalla strizione. Se vado a riscaldare il materiale, otterrei la struttura di partenza, con perdita dello stiramento.
- 5) Tutti i cristalli all'interno del polimero sono orientati nella direzione dello sforzo. Questo comporta un aumento considerevole della resistenza del materiale, il quale comporta la rottura del materiale. Si rompono le così dette strutture laccio.

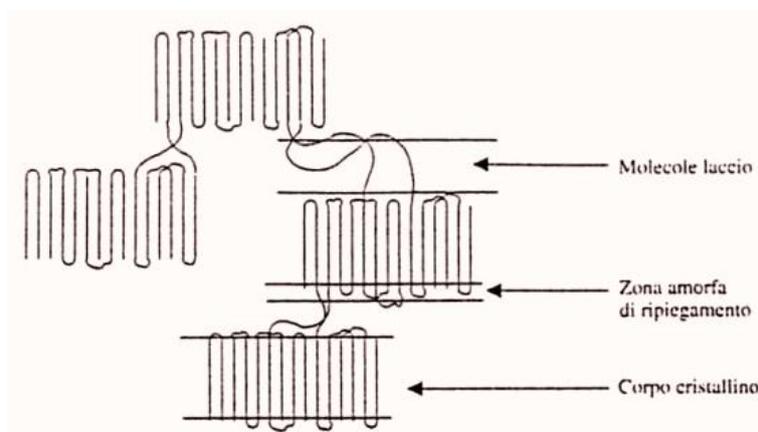


Figura 3.24 – Strutture laccio

3.5.6 – Polimeri Termoplastici

I polimeri termoplastici sono costituiti da catene principali molto lunghe, formate da atomi di carbonio e altri elementi legati attraverso legami di tipo covalente, unite fra loro da legami deboli, quali legami di Van der Waals, legami idrogeno.



Mediante calore e pressione possono essere plasmati e dopo raffreddamento mantengono la loro forma.

Se sottoposti a riscaldamento, a temperature superiori alla temperatura di fusione o di transizione vetrosa, i legami secondari si rompono temporaneamente, a causa della vibrazione indotta termicamente, e le molecole hanno la possibilità di muoversi con maggiore libertà attorno alla loro posizione. In questo modo, i polimeri termoplastici possono essere rimodellati più volte, senza cambiamenti significativi delle loro proprietà e morfologia. Dopo raffreddamento, le molecole vengono congelate nella nuova posizione e i legami intermolecolari fra le lunghe catene vengono ripristinati e riportati allo stato iniziale. Questa è una caratteristica fondamentale per questa tipologia di materiali, in quanto per effetto del calore possono essere lavorati con estrema facilità anche dopo la fase di polimerizzazione. Tale proprietà, però, è anche il loro tallone d'Achille, in quanto non possono essere utilizzati per impieghi ad alte temperature (relativamente).

Vediamo, ora, una carrellata di polimeri termoplastici di uso più comune:

- **Polietilene (PE)** → è la materia plastica più utilizzata. Si ottiene per polimerizzazione del gas etilene (monomero). E' inerte all'acqua, poco resistente ai solventi e agli acidi. Degrada sotto l'effetto delle radiazioni ultraviolette della luce; ha una limitata resistenza termica in quanto rammollisce attorno ai 100°C. Ha costi molto contenuti.

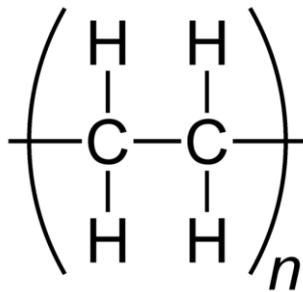


Figura 3.25 – Polietilene, formula bruta

A seconda del processo produttivo con il quale viene realizzato, è possibile ottenere due tipologie di polietilene:

- **LDPE** → acronimo di polietilene a bassa densità (0,91÷0,93 kg/dm³). Si ottiene utilizzando pressioni molto elevate (1000÷2000 bar), con temperature di 100÷300°C per ottenere macromolecole ramificate. In questo modo si ottiene un grado di cristallinità del 50÷60%.
 - **HDPE** → acronimo di polietilene ad alta densità (0,95÷0.96 kg/dm³). Si ottiene utilizzando pressioni di 1 - 70 bar e temperature di 50°÷200°C, ottenendo macromolecole lineari ad alta cristallinità, fino al 95%.
- **Polivinilcloruro (PVC)** → è un polimero totalmente amorfo, quindi si presenta sempre trasparente. Molto duro, resistente alla fiamme e al calore. Se bruciato genera acido cloridrico, dovuto alla presenza di cloro all'interno del monomero. Molto utilizzato per la realizzazione di tubi.

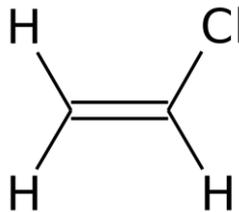


Figura 3.26 - Cloruro di vinile, formula bruta (monomero)

- **Polistirene (PS)** → anche questo polimero è quasi totalmente amorfo, in quanto presenta un gruppo laterale molto ampio (anello benzenico). Si presenta trasparente e duro. Difficilmente

viene utilizzato puro; attraverso l'aggiunta di additivi, si ottiene il polistirene espanso e quello antiurto. Molto utilizzato per la realizzazione dei copolimeri.

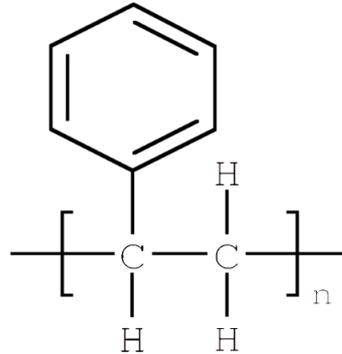


Figura 3.27 – Polistirene, formula bruta

- **Polimetilmetacrilato (PMMA)** → è il così detto Plexiglass. Anche questo polimero è molto amorfo, infatti viene utilizzato come sostituto del vetro, in quanto ha un peso specifico molto inferiore ed è molto trasparente. Resiste bene alla luce, è facilmente stampabile ed è poco duttile.

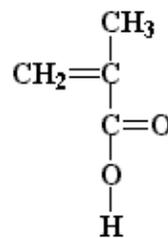


Figura 3.28 - Metacrilato di metile, formula bruta

- **Policarbonato (PC)** → si presenta estremamente amorfo, infatti è più trasparente del vetro. E' un generico poliestere dell'acido carbonico. I gruppi laterali sono abbastanza mobili, quindi possiede una buona duttilità.

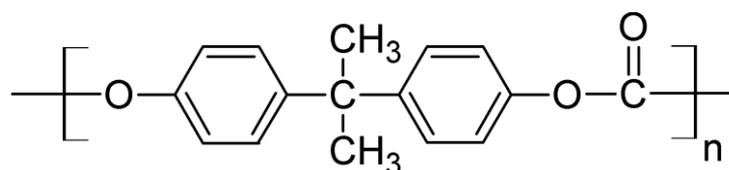


Figura 3.29 – Policarbonato, formula bruta

- **Polietilentereftalato (PET)** → In funzione dei processi produttivi e della storia termica può esistere in forma amorfa (trasparente) o semi-cristallina (bianca ed opaca). Viene utilizzato principalmente per la realizzazione delle bottiglie di plastica, in quanto è impermeabile all'acqua e ai gas, ma anche per la realizzazione di fibre.

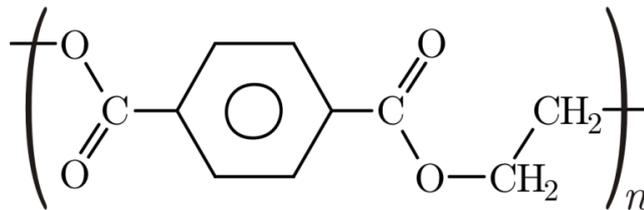


Figura 3.30 – Polietilentereftalato, formula bruta

- **Acrilonitrile – Butadiene – Stirene (ABS)** → è un copolimero formato da tre monomeri quali l'acrilonitrile, il butadiene e lo stirene; si presenta amorfo, viene prodotto tramite polimerizzazione in emulsione o in massa dei tre monomeri sopra elencati. Ottimo isolante elettrico, poco igroscopico, ha buone proprietà di smorzamento ed è incollabile. Viene utilizzato per componenti che devono resistere agli urti e presenta anche un'ottima rigidità.

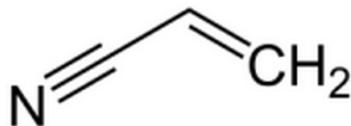


Figura 3.31 – Acrilonitrile

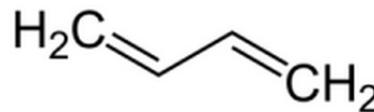


Figura 3.32 – Butadiene

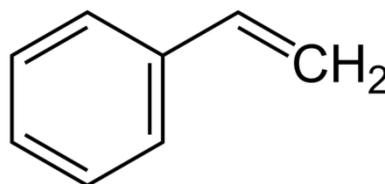


Figura 3.33 – Stirene

- **Politetrafluoroetilene (PTFE)** → è il così detto Teflon. Può raggiungere gradi di cristallizzazione anche molto elevati. Presenta una densità molto elevata per essere un polimero; per questo motivo viene realizzato per sinterizzazione. Le

caratteristiche meccaniche non sono molto elevate. Possiede un coefficiente d'attrito molto basso, oltre ad una elevata resistenza agli agenti chimici. Alle elevate temperature emette gas nocivi. Può essere espanso per ottenere delle pellicole porose chiamate in gergo Goretex.

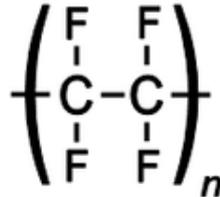


Figura 3.34 – Politetrafluoroetilene, formula bruta

3.5.6.1 – Poliammide (PA) o Nylon

Prendendo in considerazione il tecnopolimero oggetto di studio, il LatiGray 82-03 CW/95, esso è un composito a matrice termoplastica, quale la poliammide 12 (o Nylon 12), caricato con particelle di tungsteno. Verrà quindi trattato un paragrafo a parte per quanto riguarda questo polimero termoplastico.

Le poliammidi vengono ottenute per policondensazione di diammine e acido dicarbossilico, oppure a partire da monomeri aventi sia una funzionalità amminica che acida. Le diverse poliammidi si differenziano quindi per il numero di atomi di carbonio dei monomeri; si ottengono di conseguenza nylon 6, nylon 6/6, nylon 6/12 e così via. Le poliammidi sono polimeri semicristallini, tenaci, con basso coefficiente di attrito, che si prestano ad applicazioni tecniche quali cuscinetti a scorrimento, ingranaggi, pulegge.

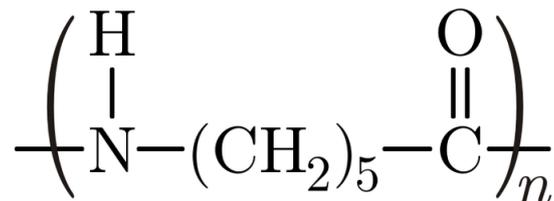


Figura 3.35 – Nylon 6, formula bruta

I nylon presentano T_g relativamente bassa ($50 \div 60^\circ\text{C}$), al di sopra della quale avviene una riduzione di modulo elastico; tuttavia la fase cristallina, con

temperature di fusione a 220÷260°C, consente di mantenere resistenze e rigidità apprezzabili anche a temperature più elevate.

Un fattore di rilievo per le poliammidi è rappresentato dal marcato assorbimento di acqua, che può raggiungere diverse unità percentuali e, se da una parte ha effetto plasticizzante con aumento della tenacità e flessibilità, dall'altra comporta una limitata stabilità dimensionale per componenti sottoposti a variazioni di umidità ambientale.

Una particolare classe di poliammidi aventi unità aromatiche in catena, le aramidi (commercializzate dall'azienda DuPont con il nome di Kevlar), presentano caratteristiche liquido cristalline con proprietà uniche nell'ambito dei polimeri. La presenza di anelli benzenici e la struttura molecolare particolarmente rigida conferiscono grande resistenza termica e permettono di ottenere fili di elevatissima resistenza che trovano applicazioni in rinforzi per compositi e protezioni balistiche.

3.5.6.2 – Polipropilene (PP)

è molto simile al polietilene appena descritto, ma avendo come gruppo laterale il gruppo CH₃ (metile), che è leggermente più grande di H (idrogeno), ha un grado di cristallinità inferiore; di conseguenza presenta una minore duttilità, in quanto la frazione amorfa è maggiore. Questo comporta proprietà meccaniche maggiori rispetto al polietilene.

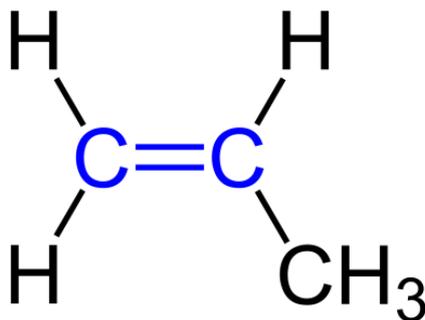


Figura 3.36 – Propilene, formula bruta

3.5.6.3 – Principali Caratteristiche Termoplastici

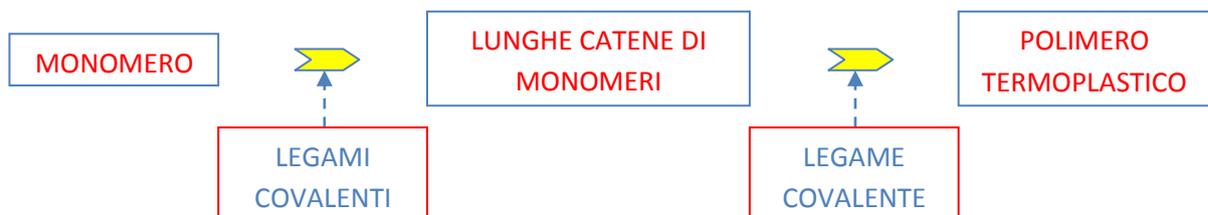
In tabella 3.5 vengono illustrate le principali caratteristiche dei polimeri termoplastici di uso più comune.

Materiali	Densità (kg/dm ³)	Temperatura Fusione (°C)	Temperatura Transizione Vetrosa (°C)	Tensione di Rottura a Trazione (MPa)	Modulo di Young (GPa)	Allungamento a Rottura (%)
LDPE	0,91÷0,93	110	-90	10÷15	0,2	600
HDPE	0,95÷0,96	130	-110	20÷30	1÷1,2	500
PP	0,9	200	-20	30	1,5	500
PVC	1,3÷1,5	200	85	40	2,5÷4	50
PS	1,05	200	90	35÷50	2÷3	2
PMMA	1,2	160	100	50÷70	3	4
PC	1,2	230	150	75	2,5	100
PET	1,2	260	75	60	4	100
ABS	1,04÷1,12	105	100	30÷50	2,8	30
PTFE	2,1	320	-90	10÷40	0,5	300
PA	1,1	250	50	80	3÷4	250

Tabella 3.5 – Principali caratteristiche dei polimeri termoplastici

3.5.7 – Polimeri Termoindurenti

Sono polimeri totalmente amorfi, in cui le lunghe catene di monomeri sono unite fra di loro sempre da legami di tipo primario (covalenti), motivo per cui non hanno una temperatura di fusione, ma all'aumentare della temperatura si ha un degrado del materiale. Questo è un aspetto negativo, in quanto rende il processo di reticolazione irreversibile (non possono essere riciclati).



Sono il componente principale per la realizzazione dei materiali compositi (matrice), in quanto presentano caratteristiche meccaniche elevate per via dei legami covalenti presenti all'interno di tutto il materiale.

Solitamente sono sistemi bi o policomponenti, in cui i reattivi vengono tenuti separati prima della fase di polimerizzazione.

Questa tipologia di polimeri si ottengono con il così detto processo di curing. Si parte, in genere, con la resina a temperatura ambiente allo stato liquido. Essa è costituita da un insieme di molecole tutte uguali svincolate le une dalle altre, ossia libere di muoversi. Mediante l'utilizzo di opportuni catalizzatori (sostanze chimiche che promuovono le reazioni fra le varie molecole di partenza) e l'applicazione di calore e pressione avviene un processo chimico chiamato appunto curing. Durante tale processo si formano dei legami covalenti (cross-link) che uniscono le varie molecole, dando vita alla struttura tridimensionale tipica della resine termoindurenti.

I materiali polimerici termoindurenti più utilizzati sono i seguenti, in ordine di caratteristiche meccaniche (dal più scadente al più prestazionale):

- **Resine Poliestere** → sono le più economiche e le meno prestazionali. Presentano dei legami doppi C=C all'interno della macromolecola pronti ad aprirsi e a legarsi con le molecole adiacenti. Con particolari catalizzatori induriscono anche a temperatura ambiente. Vengono principalmente utilizzate per la realizzazione dei compositi rinforzati con fibre di vetro.

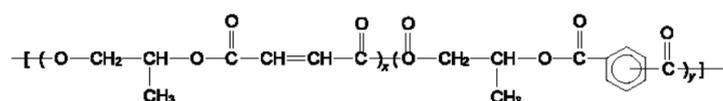


Figura 3.37 – Resina poliestere insatura, formula di struttura

- **Resine Fenoliche** → presenta caratteristiche intermedie fra la resina poliestere e la epossidica. Si formano attraverso il processo di condensazione, dove appunto si viene a generare una molecola di acqua. Viene principalmente utilizzata per la realizzazione di truciolati in legno. Contiene formaldeide (tossica) al suo interno, la quale viene emessa sotto forma di gas.

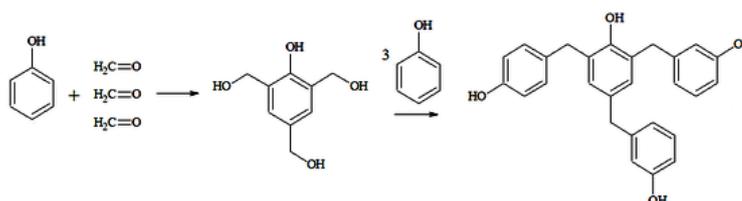


Figura 3.38 – Resina fenolica

- **Resine Epossidiche** → sono caratterizzate dal gruppo epossidico. Durante la fase di polimerizzazione, si rompe il legame fra ossigeno e CH₂ (metilene) all'interno della molecola dell'ossido di etilene, in modo tale che esso si possa legare ad altre molecole, generando il polimero.

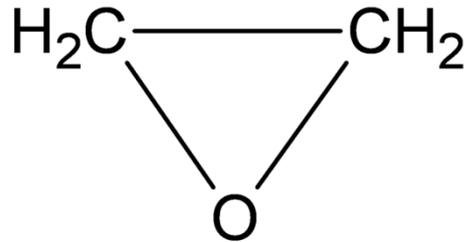


Figura 3.39 – Ossido di etilene

- Sono resine bi componenti, con elevate caratteristiche meccaniche, e anche molto costose. Infatti vengono utilizzate come matrici per i compositi in fibra di carbonio, quindi componenti alto prestazionali.

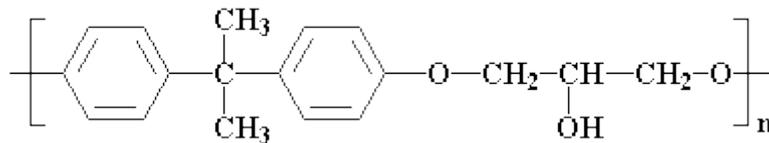


Figura 3.40 – Resina epossidica, formula bruta

3.5.7.1 – Principali Caratteristiche Termoindurenti

In tabella 3.6 vengono illustrate le principali caratteristiche delle tre resine termoindurenti descritte nel precedente paragrafo.

Materiale	Densità (kg/dm ³)	Tensione Rottura a Trazione (MPa)	Modulo di Young (GPa)	Allungamento a Rottura (%)
Resina Poliesteri	1,1÷1,3	55	2	5
Resina Fenolica	1,3÷1,5	70	3	4
Resina Epossidica	1,2	60÷130	10	10

Tabella 3.6 – Principali caratteristiche dei polimeri termoindurenti

3.6 – Compositi a Matrice Termoplastica

In questo capitolo verrà effettuato un accenno su materiali compositi, a matrice termoplastica con rinforzo particellato, e sul processo di injection molding (o stampaggio ad iniezione).

Materiali compositi in quanto i tecnopolimeri testati sono materiali composito a matrice termoplastica, quale la poliammide 12 (o Nylon 12), la poliammide 6 e il Polipropilene caricati con particelle di tungsteno, rame o materiale ceramico con una percentuale in peso variabili.

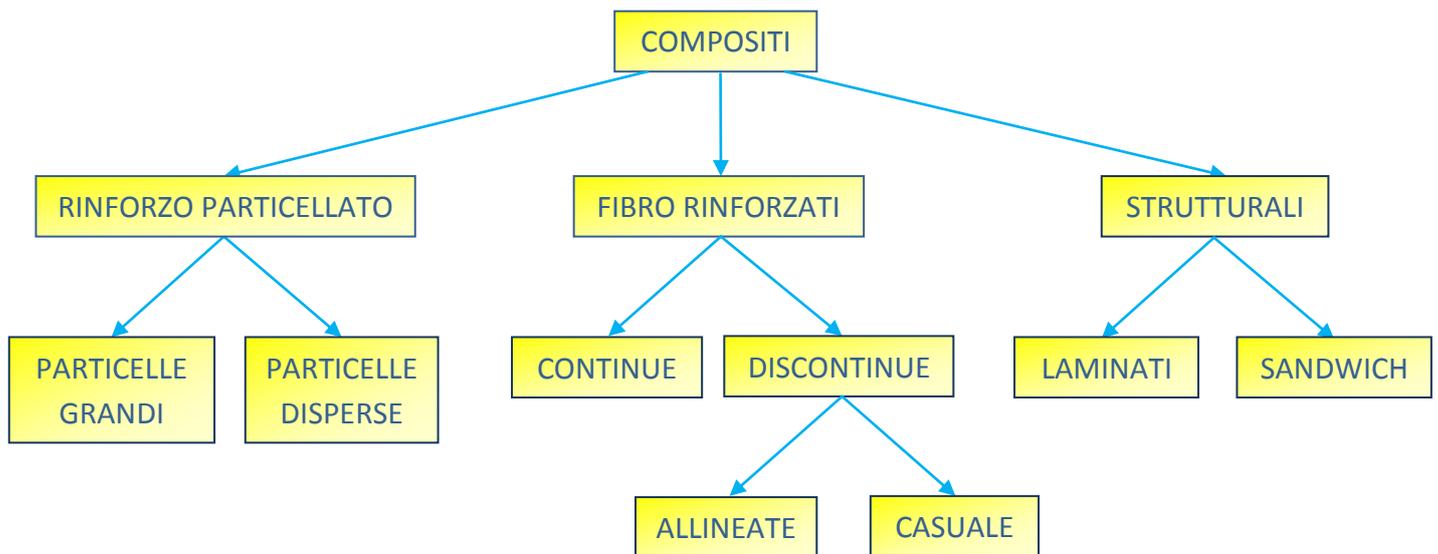
Per quanto riguarda il processo di injection molding, esso viene utilizzato per la realizzazione di questo composito in quanto si adatta molto ai materiali polimerici termoplastici. Questo processo è molto vantaggioso dal punto di vista della produttività, in quanto è molto più veloce e ripetitivo rispetto alla realizzazione di materiali in piombo, materiale attualmente utilizzato sull'OPT Cefla per la schermatura dei raggi X.

3.6.1 – Materiali Compositi

I materiali compositi sono materiali polifasici in cui le fasi non possono essere trasformate le una nell'altra mediante trattamenti termomeccanici. Esistono compositi sia di origine naturale, come il legno o le ossa, sia di origine artificiale, di interesse ingegneristico.

È possibile effettuare una classificazione dei materiali compositi, riportata nello schema 3.1.

Per quanto riguarda la seguente trattazione, come scritto nella parte introduttiva, i tecnopolimeri radiopachi sono compositi a matrice termoplastica caricati con particelle di vario materiale (rinforzo particellato), le quali non hanno una vera e propria funzione di rinforzo, ma hanno il compito di schermare le radiazioni X. Verrà, quindi, effettuato un breve accenno su di essi.



Schema 3.1 – Classificazione materiali compositi

3.6.1.1 – Rinforzo Particellato

Come si può notare dallo schema 3.1, i compositi particellari possono essere distinti in compositi a particelle di grandi dimensioni e compositi rinforzati con dispersione di particelle. Questa distinzione deriva sia dal tipo di rinforzo utilizzato che dal particolare tipo di meccanismo di aumento della resistenza:

- **Particelle di Grandi Dimensioni** → Con il termine particelle di grandi dimensioni si intende indicare che le interazioni fra matrice e rinforzo non possono essere trattate su scala atomica o molecolare, ma piuttosto si deve ricorrere all'ipotesi di mezzo continuo. Nella maggior parte dei compositi particellari, il particolato è formato da una fase più dura e rigida della matrice e ha lo scopo di limitare i movimenti della matrice. In pratica la matrice trasferisce parte dello sforzo a cui è sottoposta alle particelle di rinforzo, le quali sopportano una parte del carico. Appare pertanto evidente che il grado di rinforzo e il miglioramento delle caratteristiche meccaniche dipendono dalla forza del legame fra matrice e rinforzo. Le particelle di rinforzo possono avere diverse dimensioni, ma devono essere equiassiche. Per far sì che la struttura sia realmente rafforzata, le particelle devono essere piuttosto piccole ed equamente distribuite in tutta

la matrice. Oltre a ciò, anche la loro percentuale in volume rispetto alla matrice influenza il comportamento del composito: maggiore è la quantità di particolato, maggiori sono le caratteristiche meccaniche del composito. Fra i materiali compositi rinforzati con particelle di grandi dimensioni è possibile citare i cermet (ceramico-metallico), il più comune dei quali è il carburo cementato formato da carburo di tungsteno (WC) o carburo di titanio (TiC) annegati in una matrice metallica di cobalto o nickel.



Figura 3.41 – Placchette in Cermet

- **Dispersione di Particelle** → In questo caso le dimensioni delle particelle di rinforzo sono decisamente più piccole rispetto al caso precedente. Infatti esse vanno da 0,01 a 0,1 μm . In questo caso l'interazione tra il rinforzo e la matrice avviene a livello molecolare. Questo meccanismo è molto simile al meccanismo di rinforzo per precipitazione, dove appunto le fini particelle disperse all'interno del materiale metallico impediscono il movimento della maggior parte delle dislocazioni, con aumento delle caratteristiche meccaniche. Per quanto riguarda la presente trattazione, questa tipologia di composito è quella di nostro interesse, in quanto le particelle di tungsteno utilizzate per il rinforzo hanno dimensioni veramente molto piccole.

3.6.1.2 – Compositi a Matrice Termoplastica

Questi materiali trovano diffuse applicazioni in ambito industriale e in prodotti di largo consumo. Le loro caratteristiche e prestazioni sono

determinate prevalentemente dalle matrici. Vengono lavorati con le comuni tecnologie dei polimeri e per questo sono solitamente considerati come polimeri caricati, piuttosto che come compositi veri e propri. Le cariche sono aggiunte a volte per aumentare le prestazioni meccaniche, ma molto spesso per ragioni economiche o funzionali, quali modifica della conducibilità termica/elettrica, delle proprietà barriera, del colore/trasparenza, oppure, come nel caso oggetto di studio, per rendere radiopaco un materiale.

Nonostante gli sforzi e gli investimenti, tuttavia, esistono solo poche applicazioni di compositi termoplastici con fibre continue o tessuti, in gran parte a causa delle maggiori difficoltà tecnologiche rispetto ai compositi a matrice termoindurente.

Tra le numerose matrici termoplastiche considerate inizialmente per la produzione di compositi di alte prestazioni, solo poche hanno trovato successo commerciale. Nella tabella 3.7 sono riportati i materiali termoplastici più comunemente utilizzati per la realizzazione di compositi a matrice termoplastica.

Polimero	Resistenza (MPa)	Modulo Elastico (GPa)	Temperatura di Transizione Vetrosa (°C)	Temperatura di Fusione (°C)
PP	30	1,4	-8	165
PA	80	4	50	250
PPS	90	3,5	90	285
PEEK	110	4	143	340
PES	80	2,7	220	700
LCP	180	10	100	280

Tabella 3.7 – Principali polimeri termoplastici per materiali compositi

I termoplastici sono resine ad alto peso molecolare, portate a fusione e rammollimento per riscaldamento, le cui molecole interagiscono per effetto di legami secondari deboli. A causa dell'elevato peso molecolare, la viscosità dei termoplastici durante il processo è di ordini di grandezza superiore a quella dei termoindurenti. Poiché i legami secondari sono reversibili, i compositi a matrice termoplastica, diversamente dai termoindurenti, consentono processi di formatura che possono richiedere riscaldamenti ripetuti. Sebbene in linea di principio il termoplastico possa essere processato ripetutamente numerose volte, nella pratica la

degradazione progressiva ne riduce l'effettiva rilavorabilità e il materiale riprocessato può essere solitamente riciclato per impieghi con requisiti inferiori. I compositi termoplastici possono essere consolidati e formati in tempi molto rapidi, dell'ordine dei minuti o dei secondi, in quanto, a differenza dei termoindurenti, non ci sono reazioni chimiche in gioco.

3.6.2 – Injection Molding

Come scritto nella parte introduttiva, l'injection molding è il processo con cui vengono realizzati il materiali oggetto di studio.

Lo stampaggio ad iniezione è la principale tecnica per ottenere componenti di dimensioni finite in materia plastica. Il principio alla base del processo è di iniettare il polimero fuso all'interno di uno stampo chiuso, raffreddato, in cui avviene la solidificazione. L'impianto è costituito da tre unità principali:

- **Sistema di iniezione** → consente di plastificare ed iniettare il polimero nello stampo. Il polimero in forma granulare è inserito attraverso la tramoggia all'interno del cilindro riscaldato da resistenze che consentono di regolarne la temperatura. Il materiale così riscaldato è trascinato verso lo stampo dal movimento rotatorio della vite punzonante che scorre nel cilindro ed in seguito è iniettato attraverso l'ugello con un movimento di avanzamento della vite stessa.



Figura 3.42 – Sistema di iniezione

- **Sistema di chiusura** → ha la funzione di tenere chiuso lo stampo durante tutta la fase di iniezione e di mantenimento in pressione, oltre ad aprirlo al momento dell'estrazione. L'unità di chiusura è

composta da una piastra di supporto, saldamente fissata al basamento della pressa, da una piastra di fissaggio, anch'essa solidale alla pressa a cui è applicata la matrice dello stampo, ed infine dalla piastra di fissaggio mobile, guidata nel suo spostamento avanti e indietro da colonne. Le piastre di fissaggio sono munite di fori di centraggio.



Figura 3.43 – Sistema di chiusura a ginocchiera (a sinistra) e a pistone idraulico (a destra)

- **Stampo** → lo stampo rappresenta il cuore dello stampaggio ad iniezione: contiene, infatti, i negativi che daranno la forma al prodotto finito, oltre ai canali di alimentazione, al sistema di condizionamento e agli estrattori. Fondamentalmente è costituito da due parti: una piastra mobile (in gergo stampo o maschio) ed una piastra fissa (in gergo controstampo o femmina), sulle quali sono realizzate le impronte. Solitamente vengono realizzati in materiale metallico, principalmente acciaio. Questo comporta un notevole costo; infatti possono arrivare a costare anche decina di migliaia di euro.

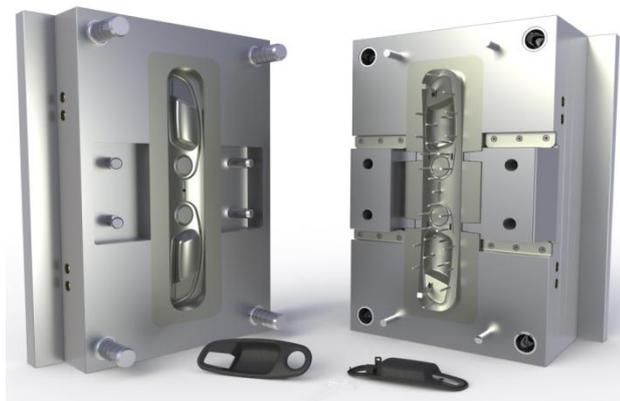


Figura 3.44 – Stampo

3.6.2.1 – Fasi del Processo di Stampaggio

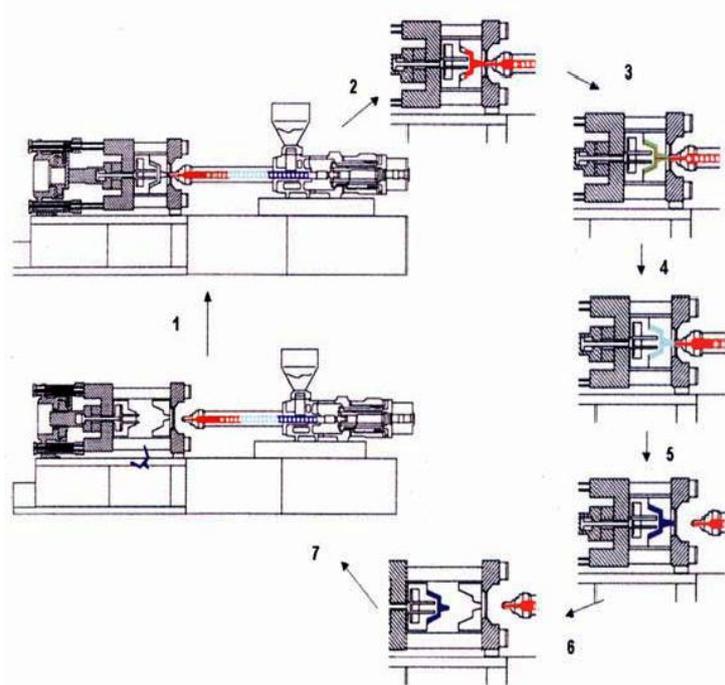


Figura 3.46 – Sequenza di stampaggio

In figura 3.46 sono rappresentate le varie fasi del processo di stampaggio. Partendo da 1 fino a 7 è possibile identificare:

- 1) il materiale nella camera di accumulo al momento dello stampo chiuso.
- 2) lo stampo parzialmente riempito alla fine del riempimento con materiale residuo nella camera d'accumulo.
- 3) il completamento del riempimento della cavità a fine compattazione con ancora materiale residuo nella camera (cuscinetto) per assicurare l'apporto di polimero durante questa fase.
- 4) la vite che si ritrae caricando nuovo materiale durante la fase di raffreddamento.
- 5) il distacco del gruppo di plastificazione a stampo chiuso.
- 6) l'apertura dello stampo con il pezzo stampato saldamente ancorato alla parte mobile.
- 7) l'estrazione del pezzo mediante l'azione delle spine estrattrici collegate a un tavolino mobile situato nella parte posteriore dello stampo che viene azionato idraulicamente o, anche, per semplice incontro con un punzone fisso. Questa operazione può essere fatta anche manualmente da un operatore.

3.7 – Tecnopolimeri Radiopachi

La presenza del piombo all'interno degli apparecchi radiografici a raggi X è da sempre considerata una necessità insormontabile. La crescente attenzione per problematiche legate all'ambiente ed alla salute rendono sempre più complesso lo smaltimento e la manipolazione di questo metallo pesante, soprattutto dovuto alla sua tossicità. Nonostante ciò, le sue caratteristiche fisiche e la sua lavorabilità lo rendono adatto ad essere impiegato ovunque vi sia la necessità di realizzare schermature efficienti contro i raggi X, come appunto accade nelle apparecchiature medicali, per la radiografia industriale e la manipolazione di sorgenti radioattive, dove il piombo viene utilizzato per la produzione di lastre e contenitori che fungano da isolamento e protezione per chi lavori con tali apparecchiature e debba operare in sicurezza. I problemi principali per chi opera con questa tipologia di materiale sta nella sua manipolazione e nello smaltimento, fasi caratterizzate da un notevole impatto ambientale e sulla salute.

Detto ciò sono stati messi a punto materiali che presentano le stesse caratteristiche di radiopacità del piombo, ma invece di presentare al loro interno questo metallo, sono realizzati attraverso l'utilizzo di tecnopolimeri termoplastici caricati con materiali ad elevata densità, quali rame, materiali ceramici e tungsteno. Possono essere considerati compositi a rinforzo particellato a tutti gli effetti.

I materiali oggetto di studio in questa trattazione ci sono stati gentilmente forniti da due aziende: la Lati, italiana, e la PolyOne, statunitense. Di seguito vengono illustrati i materiali utilizzati nei test.

3.7.1 – Tecnopolimeri Radiopachi Lati

Con quanto detto nell'introduzione l'azienda Lati, con alle spalle 60 anni di esperienza nel campo dei materiali termoplastici, ha messo a punto diversi materiali compositi in grado di sostituire il piombo nella schermatura dei raggi X (e non solo), denominati LatiGray.

I compound di questa famiglia sono ricavati impiegando cariche a spiccato potere d'arresto contro le radiazioni, quindi ad alto peso specifico. Fra

questi materiali è possibile citare le ceramiche, ossidi metallici, cariche minerali e metalli ecocompatibili quale il tungsteno; questi materiali vengono utilizzati sotto forma di polvere, dando origine ad un così detto composito con rinforzo particellato. Questi prodotti radiopachi sono realizzati impiegando le più svariate resine termoplastiche, dal polipropilene (PP) alla poliammide (PA), fino a polimeri alto prestazionali quali polifenilensulfide (PPS) e il polietereeterchetone (PEEK), in modo tale da soddisfare ogni esigenza di progetto, sia meccanica che termica.

Il LatiGray, essendo un materiale composito a matrice termoplastica con rinforzo particellato, viene realizzato attraverso la tecnica dello stampaggio ad iniezione (injection molding), già ampiamente discussa nel paragrafo 3.6.2. Con questa tecnica è possibile realizzare le forme più disparate, anche molto complesse, con un tempo di realizzazione veramente molto breve se confrontata con il processo utilizzato per produrre i componenti in piombo. Le capacità schermanti dei LatiGray sono ottimizzabili a seconda delle esigenze, adattando la tipologia e la quantità di carica radiopaca aggiunta alla matrice termoplastica. In questo modo è possibile ottenere compound che risultino semplicemente opachi ai raggi X oppure completamente schermanti (nel caso in cui si vada ad utilizzare tungsteno). Con quest'ultimo compound è possibile ottenere una efficienza schermante del tutto comparabile a quella del piombo, aspetto di notevole interesse per l'oggetto di studio di questa tesi.

L'azienda Lati ci ha messo a disposizione due diversi tecnopolimeri radiopachi quali il LatiGray 52/11-01 CX/70 e il LatiGray 82-03 CW/95. Di seguito verranno illustrate le principali caratteristiche di questi due tecnopolimeri radiopachi.

3.7.1.1 - Lati LatiGray 52/11-01 CX/70

Questo tecnopolimero è un compound radiopaco basato su un polimero (per la precisione un omopolimero) termoplastico quale il polipropilene (PPh), caricato con particelle ceramiche. In figura 3.47 e 3.48 vengono riportati i provini utilizzati durante i test di radiopacità, con tre differenti spessori.

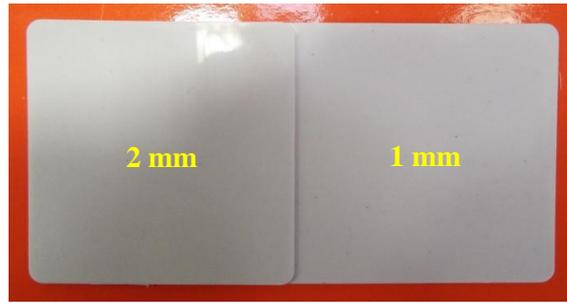


Figura 3.47 – Provino di Lati LatiGray 52/11-01 CX/70 utilizzato durante i test di radiopacità

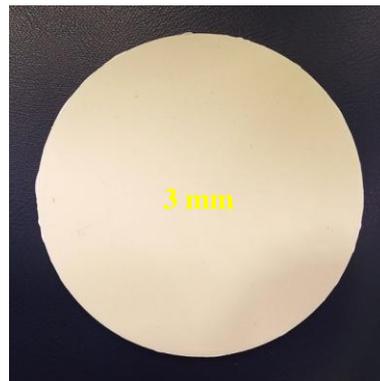


Figura 3.48 – Provino di Lati LatiGray 52/11-01 CX/70 utilizzato durante i test di radiopacità

Nella tabella 3.8 vengono elencate le principali caratteristiche di questo materiale, ricavate direttamente dal data sheet fornitoci dall'azienda Lati.

Caratteristiche	Valore (unità di misura)
Matrice	Polipropilene (PPh)
Rinforzo	Particelle Ceramiche
Densità	1,97 kg/dm ³
Allungamento a Trazione	1,2%
Carico di Rottura a Trazione	20 MPa
Modulo di Young	2,9 GPa
Punto di Rammollimento	140°C

Tabella 3.8 – Caratteristiche Lati LatiGray 52/11-01 CX/70

3.7.1.2 - Lati LatiGray 82-03 CW/95

Questo compound è realizzato attraverso l'utilizzo di un polimero termoplastico quale la poliammide 12 (PA 12, chiamato anche Nylon 12) caricato con particelle di tungsteno, con una percentuale in peso del 95%. Nella figura sottostante viene riportato il provino utilizzato durante le prove

di radiopacità, con spessori di 0,8 e 2,55 mm. Oltre a questo è stato utilizzato anche un provino con spessore di 1,5 mm.

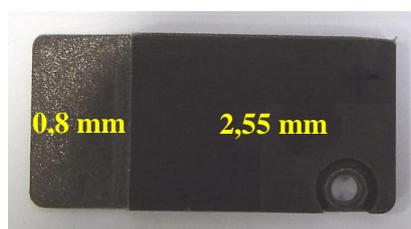


Figura 3.49 – Provino di Lati LatiGray 82-03 CW/95 utilizzato durante i test di radiopacità

Nella tabella 3.9 vengono illustrate le principali caratteristiche di questo tecnopolimero.

Caratteristiche	Valore (unità di misura)
Matrice	Poliammide 12 (PA 12)
Rinforzo	Tungsteno
Densità	8,58 kg/dm ³
Allungamento a Trazione	1,2 %
Carico di Rottura a Trazione	40 MPa
Modulo di Young	5,4 GPa
Punto di Rammollimento	165°C

Tabella 3.9 - Caratteristiche Lati LatiGray 82-03 CW/95

3.7.2 – Tecnopolimeri Radiopachi PolyOne

La PolyOne è un'azienda statunitense leader nella produzione di materiali polimerici, principalmente di tipo termoplastico. Essa ci ha fornito cinque materiali da testare, di cui due a densità medio bassa, quali il GraviTech GRV-NY-045-CU Copper, il GraviTech GRV-NY-060-Copper e il GraviTech-TP-050-CU Copper, mentre due ad alta densità quali il Trilliant HC6200-5002 XR Grey e il GraviTech GRV-NJ-090-W Black. Questi tecnopolimeri radiopachi sono tutti realizzati attraverso l'utilizzo di una matrice termoplastica caricata con particelle di varia natura. Anche questo caso questi materiali vengono realizzati attraverso la tecnica dell'injection molding, tecnica molto vantaggiosa sotto molti punti di vista, come già descritto nel paragrafo 3.6.2.

Di seguito vengono illustrate le principali caratteristiche di questi cinque tecnopolimeri radiopachi.

3.7.2.1 - PolyOne GraviTech GRV-NY-045-CU Copper

Questo tecnopolimero è realizzato attraverso l'utilizzo di una matrice quale la poliammide 6 (PA 6) caricato con particelle di rame. In figura 3.50 viene riportato il provino utilizzato, a spessori differenziati da 1 a 3 mm.



Figura 3.50 – Provino di PolyOne GraviTech GRV-NY-045-CU Copper utilizzato durante i test di radiopacità

Di seguito viene riportata la tabella relativa alle sue principali caratteristiche, ricavata direttamente dal data sheet fornitoci dalla PolyOne.

Caratteristiche	Valore (unità di misura)
Matrice	Poliammide 6 (PA 6)
Rinforzo	Rame
Densità	4,99 kg/dm ³
Allungamento a Trazione	1%
Carico di Rottura a Trazione	58,6 MPa
Modulo di Young	12,4 GPa

Tabella 3.10 - Caratteristiche PolyOne GraviTech GRV-NY-045-CU Copper

3.7.2.2 - PolyOne GraviTech GRV-NY-060-Copper

Questo materiale polimerico è basato su un polimero termoplastico quale la poliammide 6 (PA 6) caricato con particelle di rame. Di seguito viene riportato il provino utilizzato durante le prove di radiopacità, con relativi spessori.



Figura 3.51 – Provino di PolyOne GraviTech GRV-NY-060-Copper utilizzato durante i test di radiopacità

Nella tabella sottostante vengono riportate le principali caratteristiche di questo tecnopolimero, direttamente estrapolate dal data sheet fornitoci dall'azienda PolyOne.

Caratteristiche	Valore (unità di misura)
Matrice	Poliammide 6 (PA 6)
Rinforzo	Rame
Densità	6 kg/dm ³
Allungamento a Trazione	1,2 %
Carico di Rottura a Trazione	41 MPa
Modulo di Young	16,5 GPa

Tabella 3.11 - Caratteristiche PolyOne GraviTech GRV-NY-060-Copper

3.7.2.3 - PolyOne GraviTech-TP-050-CU Copper

Questo tecnopolimero, a differenza degli altri esaminati, è un elastomero termoplastico (per l'esattezza un copolimero a blocchi stirenici, TPE-S) caricato con particelle di rame. L'unico spessore che ci è stato fornito dall'azienda è stato pari a 2 mm, riportato nella figura 3.52.



Figura 3.52 – Provino di PolyOne GraviTech-TP-050-CU Copper utilizzato durante i test di radiopacità

Le sue principali caratteristiche meccaniche vengono riportate nella tabella 3.12, ricavate dal data sheet fornitoci dall'azienda PolyOne.

Caratteristiche	Valore (unità di misura)
Matrice	TPE-S
Rinforzo	Rame
Densità	5 kg/dm ³
Allungamento a Trazione	80%
Carico di Rottura a Trazione	3 MPa

Tabella 3.12 - Caratteristiche PolyOne GraviTech-TP-050-CU Copper

3.7.2.4 - PolyOne Trilliant HC6200-5002 XR Grey

Questo tecnopolimero è un compound radiopaco basato su un polimero termoplastico quale la poliammide 12 (PA 12), caricato con una particolare miscela di polvere metallica chiamata Trilliant. Anche in questo caso il provino presenta 3 differenti spessori, da 1 a 3 mm.



Figura 3.53 – Provino di PolyOne Trilliant HC6200-5002 XR Grey utilizzato durante i test di radiopacità

Nella tabella 3.13 vengono elencate le principali caratteristiche di questo materiale, ricavate direttamente dal data sheet fornitoci dall'azienda PolyOne.

Caratteristiche	Valore (unità di misura)
Matrice	Poliammide 12 (PA 12)
Rinforzo	Trilliant
Densità	8 kg/dm ³
Allungamento a Trazione	2%
Carico di Rottura a Trazione	45 Mpa
Modulo di Young	5 GPa

Tabella 3.13 - Caratteristiche PolyOne Trilliant HC6200-5002 XR Grey

3.7.2.5 - PolyOne GraviTech GRV-NJ-090-W Black

Anche questo tecnopolimero radiopaco ci è stato fornito dall'azienda PolyOne. Il compound presenta una base di poliammide 12 (PA 12) caricato con particelle di tungsteno, come si può dedurre anche dal nome del materiale (W, simbolo utilizzato per indicare questo materiale). Come tutti i provini fornitici dall'azienda PolyOne, a parte il compound a matrice TPE-S, anche questo provino presenta 3 spessori differenziati, da 1 a 3 mm, rappresentato in figura 3.54.



Figura 3.54 – Provino di PolyOne GraviTech GRV-NJ-090-W Black utilizzato durante i test di radiopacità

Nella tabella 3.14 vengono elencate le principali caratteristiche di questo materiale, ricavate direttamente dal data sheet fornitoci dall'azienda PolyOne.

Caratteristiche	Valore (unità di misura)
Matrice	Poliammide 12 (PA 12)
Rinforzo	Tungsteno
Densità	8,85 kg/dm ³
Allungamento a Trazione	1%
Carico di Rottura a Trazione	60 MPa
Modulo di Young	11 GPa

Tabella 3.14 - Caratteristiche PolyOne GraviTech GRV-NJ-090-W Black

CAPITOLO 4

TEST ESEGUITI

4.1 - Confronto Radiopacità

Piombo-Tecnopolimeri Radiopachi

In questo capitolo verrà illustrato il confronto di radiopacità fra i diversi materiali presi in considerazione in questo trattato, cioè il piombo e i vari tecnopolimeri oggetto di studio forniti sia dall'azienda Lati che dall'azienda PolyOne, in modo tale da verificare l'effettiva validità di questi materiali sotto questo punto di vista. I test sono stati effettuati all'interno dell'azienda Cefla, attraverso l'utilizzo dell'OPT descritto nel capitolo 1. Quello che si vuole ottenere sono i millimetri necessari affinché questi tecnopolimeri siano schermanti, rispetto ai raggi X, quanto il piombo attualmente utilizzato.

Questi sono test preliminari che vengono effettuati per valutare l'effettiva radiopacità di questi tecnopolimeri, in modo tale da effettuare un prima cernita di questi materiali, che successivamente andranno utilizzati per la realizzazione delle varie schermature all'interno dell'OPT.

4.1.1 – Tipologie di Schermatura

Per quanto riguarda la schermatura di questi materiali polimerici, rispetto ai raggi X, è possibile effettuare una distinzione a seconda che esso debba schermare da raggi di tipo primario oppure secondario:

- **Raggi Primari** → con questa dicitura si intende individuare le radiazioni che vengono prodotte direttamente dal tubo radiogeno e colpiscono i materiali radiopachi in modo diretto. Questa tipologia di schermatura deve essere altamente radiopaca, in quanto la potenza di queste radiazione è molto elevata. Infatti queste schermature vengono utilizzate per la schermatura del tubo

radiogeno e per la realizzazione del collimatore presente all'interno dell'OPT, il quale ha lo scopo di indirizzare i raggi X uscenti dal tubo radiogeno in una determinata porzione di superficie. Per questo scopo lo spessore di piombo attualmente utilizzato è pari a 1,5 mm.



Figura 4.1 – Tubo radiogeno Toshiba, con schermatura in piombo per le radiazioni uscenti da esso. È possibile notare il foro di uscita dei raggi X.



Figura 4.2 – Tubo radiogeno Toshiba



Figura 4.3 – Collimatore realizzato in piombo, attualmente utilizzato nell'OPT

- **Raggi Secondari** → a differenza dei raggi primari questa tipologia di radiazioni sono molto meno potenti, in quanto sono già stati filtrati dalle schermature utilizzate per i raggi primari. In questo caso, come è logico attendersi, la capacità schermate che devono possedere questi materiali deve essere inferiore rispetto a quelli descritti nel primo punto. Questa tipologia di schermatura viene utilizzata nella cover esterna del monoblocco, per far sì che le radiazioni ionizzanti non vadano a diffondersi nell'ambiente circostante. Considerando il basso livello di potenza di queste radiazioni, lo spessore di piombo utilizzato per questo scopo è pari a 0,65 mm.

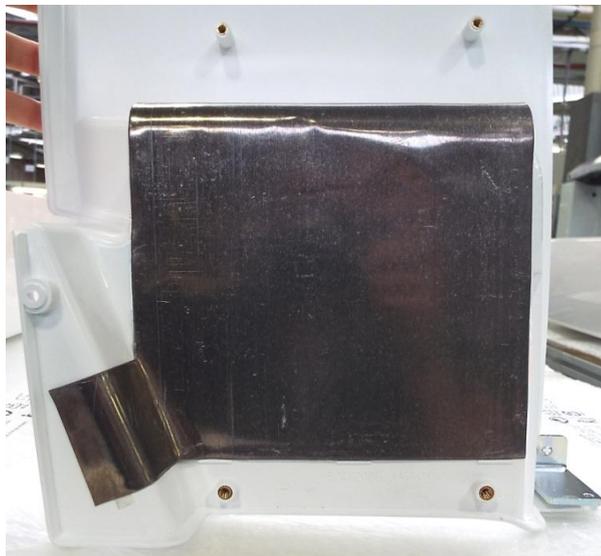


Figura 4.4 – Pannello esterno in materiale termoplastico con lamina di piombo spessa 0,65 mm per schermatura dei raggi secondari

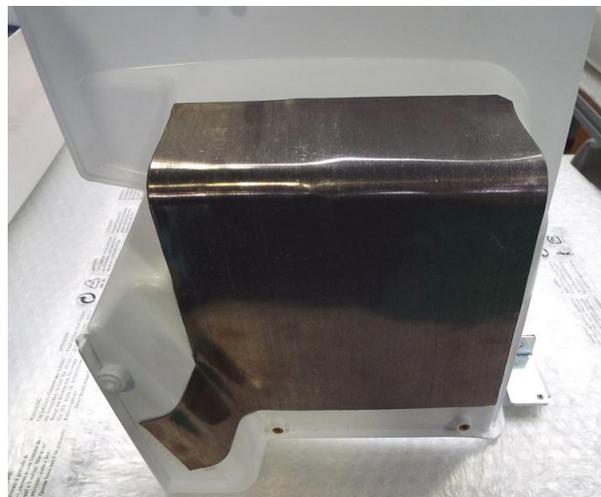


Figura 4.5 – Schermatura dei raggi secondari

4.1.2 – Acquisizione Dati

Veniamo ora al cuore dei test effettuati su questi tecnopolimeri: l'acquisizione dei livelli di radiopacità. Questa fase è stata effettuata attraverso l'utilizzo dell'OPT Cefla, illustrato nel capitolo 1, per andare ad acquisire i livelli di grigio di ogni singolo materiale descritto del paragrafo 3.7.1 e 3.7.2. I test svolti sono stati 5, dove in ogni singola prova venivano testati diversi tecnopolimeri.

Questi test hanno lo scopo di effettuare una prima scrematura sui materiali messi a disposizione dalle due aziende. Se i requisiti di radiopacità non risultavano soddisfacenti venivano scartati a priori, in quanto questo è l'aspetto considerato più importante fra tutti quelli analizzati. Per effettuare questa prima cernita, in tutti e 5 i test svolti il materiale di riferimento è sempre stato il piombo, attualmente utilizzato nell'OPT, in quanto è un materiale considerato ormai noto, visto il suo largo impiego nel macchinario e in ambito radiologico per la schermatura dei raggi X.

Per l'acquisizione dei dati, i parametri utilizzati in ogni singolo test sono riportati in tabella 4.1, dove viene indicata la potenza uscente dal tubo radiogeno (e che quindi investe i materiali oggetto di test), espressa in kV, e l'intensità del fascio, espressa in mA. La durata dell'emissione utilizzata nei test è di 10 secondi, con tipologia di emissione pulsata, periodo di 100 ms e duty cycle 50 %, mantenuti invariati durante tutte le prove.

Potenza (kV)	da 60 a 90, con intervalli di 5 kV per un totale di 7 acquisizioni
Intensità (mA)	10
Periodo (ms)	100
Duty Cycle	50%
Durata Emissione (s)	10

Tabella 4.1 – Parametri di acquisizione

Come si può notare dalla tabella 4.1, l'intensità di corrente viene mantenuta costante in tutti i test effettuati. Questo perché essa non influisce sul livello di radiopacità dei materiali, in quanto in sostanza i milliampere indicano la densità del fascio emesso dal tubo radiogeno, non il suo potere penetrante

nei confronti dei materiali radiopachi, che invece dipende fortemente dalla potenza.

Per estrapolare i dati che ci interessavano, quali i livelli di grigio di ogni singolo materiale (in parole povere l'attenuazione che subiscono i raggi X quando passano attraverso il materiale durante l'esposizione), i provini sono stati posizionati nel pannello ricevitore dell'OPT, come mostrato nella figura 4.6 riportata di seguito.

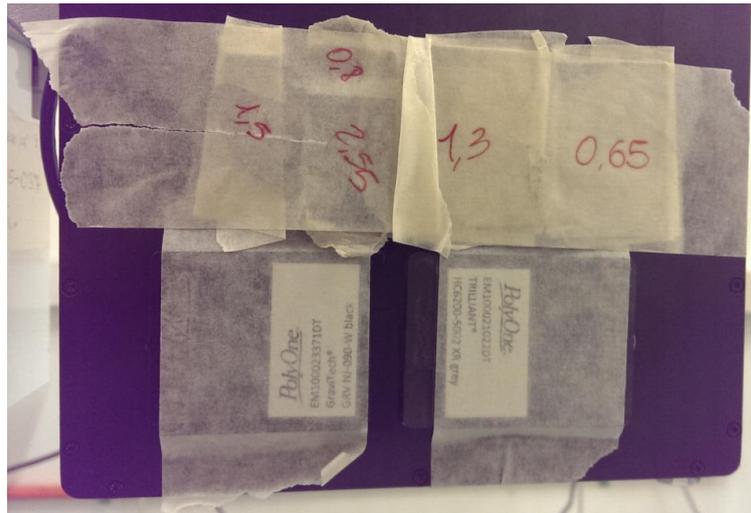


Figura 4.6 – Esempio di disposizione dei materiali per la valutazione dei livelli di radiopacità

Una volta effettuata questa operazione, tramite l'utilizzo di un software di gestione dell'OPT direttamente messo a punto dall'azienda Cefla, è stato possibile impostare la potenza (kV), l'intensità del fascio (mA) e il metodo di acquisizione di ogni singolo test (mantenuto invariato durante tutti i test, in modo tale da avere dati comparabili fra di loro e di conseguenza renderlo il più realistico possibile). In figura 4.7 viene riportata un'immagine del pannello di controllo del software.

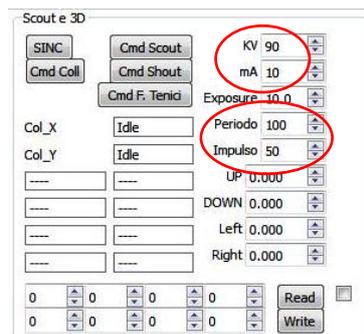


Figura 4.7 – Pannello di controllo dell'OPT

Una volta settato il software di gestione, si sono iniziati ad effettuare quelli che in gergo vengono chiamati “spari” (cioè viene praticamente attivato il tubo radiogeno, il quale inizia ad emettere raggi X). Per far sì che queste immagini venissero acquisite (registrate), è stato utilizzato un altro software chiamato VIVA (dove in figura 4.8 viene riportata un’immagine del pannello di setting del software), produttrice anche del pannello ricevitore dell’OPT, nel quale è stata settata la grandezza dell’immagine, pari a 512x320 pixel, e attivato lo User Sync su una frequenza di 10 Hz, in modo tale che esso acquisisse 10 frame per ogni singola emissione, della durata di 10 secondi (quindi un frame al secondo). Le altre impostazioni vengono mantenute invariate. Questo setting è stato mantenuto inalterato per ogni potenza del fascio, quindi da 60 a 90 kV con step di 5 kV.

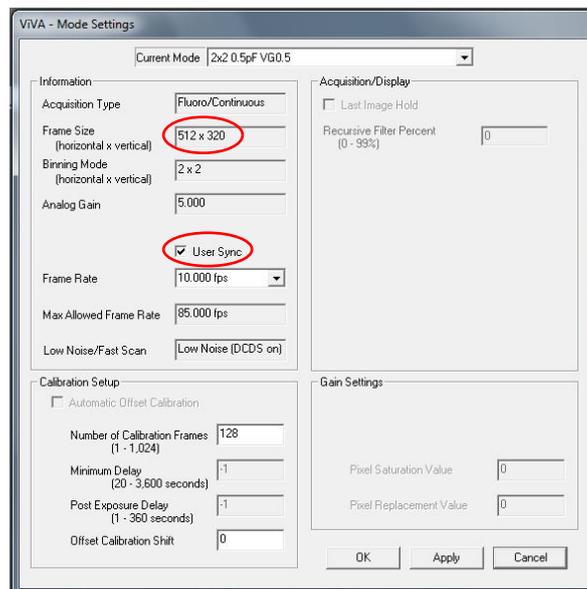


Figura 4.8 – Pannello di setting del software VIVA

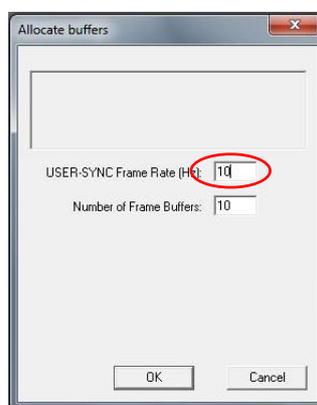


Figura 4.9 – Setting del numero di frame da acquisire, sempre del software VIVA

Una volta estrapolate tutte le immagini attraverso l'utilizzo del software appena descritto, oltre ovviamente all'utilizzo dell'OPT, sono state elaborate utilizzando un ulteriore software chiamato ImageJ, specificatamente realizzato per valutare i livelli di grigio (e non solo) di ogni singola immagine. Questa procedura è così strutturata:

- 1) come scritto in precedenza, ogni singolo sparo (a diversi kV) è formato da 10 sotto immagini. Nell'immagine sottostante è riportato un esempio, dove viene rappresentata la prima immagine catturata (in questo caso a 75 kV di potenza, relativa al test 1).

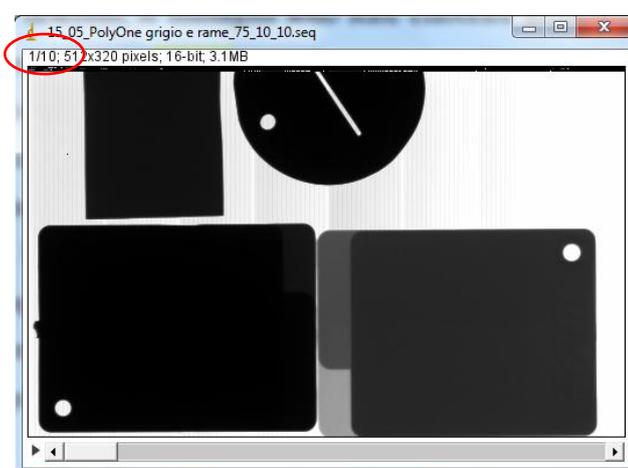


Figura 4.9 – Esempio di immagine acquisita attraverso l'utilizzo dell'OPT a 75 kV ed elaborata utilizzando il software ImageJ

Come prima operazione, quindi, si effettua, sempre attraverso il software ImageJ, la media di queste 10 immagini, in modo tale da avere dei valori medi di ogni singolo parametro acquisito (nel nostro caso i livelli di grigio).

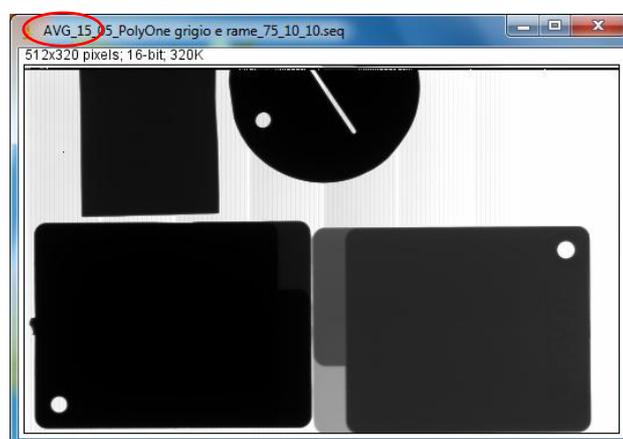


Figura 4.10 – Esempio di media (AVG) delle immagini acquisite a 75 kV

2) successivamente, per acquisire i dati necessari al nostro scopo (cioè il livelli di grigio), è stata presa un'area di controllo (come quella riportata in figura 4.11), espressa in numero di pixel, su ogni singola porzione di materiale a spessori differenti. Bisogna precisare che l'area di acquisizione non va ad inficiare la qualità dei dati, quindi veniva presa in maniera abbastanza casuale, anche se mantenuta costante al variare dei kV di potenza (su ogni singolo test).

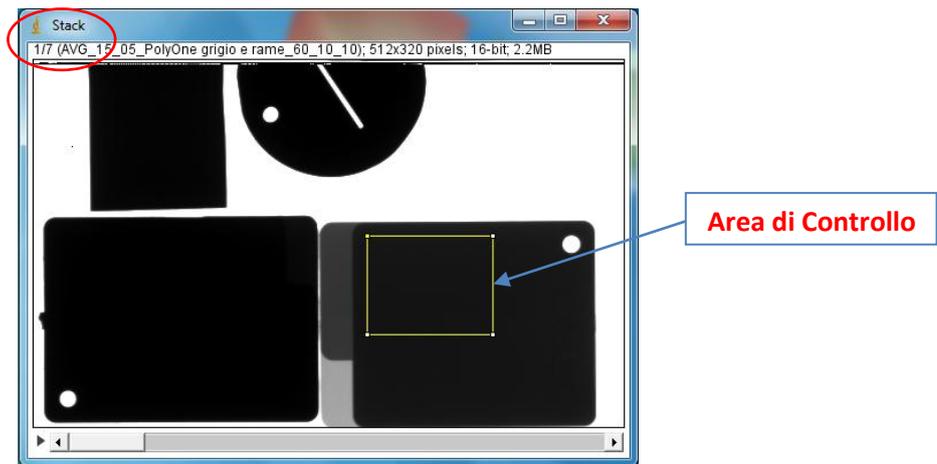


Figura 4.11 – Esempio di area di controllo acquisita a 60 kV

I dati acquisiti per ogni singola immagine sono stati il valore minimo (Min), massimo (Max) e medio (Mean) dei valori di grigio e la deviazione standard (StdDev), oltre all'area espressa in numero di pixel, come riportato nell'immagine sottostante (figura 4.12).

	Area	Mean	StdDev	Min	Max
1	9374	1317.139	84.515	1184	1629
2	9374	2986.044	115.892	2754	3423
3	9374	5724.419	156.067	5383	6361
4	9374	9836.870	205.640	9359	10655
5	9374	15363.965	251.760	14721	16383
6	9374	22318.609	289.238	21474	23506
7	9374	30451.039	316.608	29386	31780

Figura 4.12 – Esempio di dati acquisiti attraverso in software ImageJ, dove da 1 a 7 vengono indicati i dati da 60 kV a 90 kV, rispettivamente

4.1.2.1 – Test Effettuati

La procedura appena descritta è stata eseguita per ogni singolo test effettuato, per un totale di 5 prove. Nella tabella seguente (4.2) vengono brevemente illustrate le varie prove eseguite, dove si identificano i vari materiali utilizzati con i relativi millimetri di spessore.

Test	Materiali	mm Materiale
1	Piombo	0,65 - 1,5
	PolyOne Trilliant HC6200-5002 XR Grey	1 - 2 - 3
	PolyOne GraviTech GRV-NY-045-CU Copper	1 - 2 - 3
2	Piombo	0,65 - 1,3
	PolyOne GraviTech GRV-NY-045-CU Copper	1 - 2 - 3
	Lati LatiGray 52/11-01 CX/70	2 - 5
3	Piombo	0,65 - 1,5
	PolyOne GraviTech GRV-NJ-090-W Black	1 - 2 - 3
	PolyOne GraviTech GRV-NY-060-Copper	1 - 2 - 3
4	Piombo	0,65
	Lati LatiGray 52/11-01 CX/70	2 - 3 - 5
	PolyOne GraviTech-TP-050-CU Copper	1 - 2 - 3
5	Piombo	0,65 - 1,3
	PolyOne GraviTech GRV-NJ-090-W Black	1 - 2 - 3
	PolyOne Trilliant HC6200-5002 XR Grey	1 - 2 - 3
	Lati LatiGray 82-03 CW/95	0,8 - 1,5 - 2,55

Tabella 4.2 – Denominazione test, materiali utilizzati e millimetri di spessore

Di seguito verranno illustrati in maniera più approfondita i vari test, con tabelle, foto e dati raccolti.

TEST 1

Come brevemente descritto in tabella 4.2, in questa prova sono stati analizzati i seguenti materiali:

- **Piombo** → spessori di 0,65 e 1,5 mm, dove di seguito viene riportata la tabella con i dati relativi ai livelli di grigio, deviazione standard e area di controllo.

Piombo									
0,65 mm					1,5 mm				
Valori di Grigio					Valori di Grigio				
Area	Mean	StdDev	Min	Max	Area	Mean	StdDev	Min	Max
1978	323.029	94.657	208	616	2270	61.659	74.08	0	343
1978	921.436	124.996	760	1320	2270	118.778	112.363	0	525
1978	2227.021	163.212	1992	2761	2270	332.331	164.824	86	873
1978	4282.156	211.184	3953	4990	2270	588.565	218.403	279	1283
1978	7241.439	254.79	6816	8072	2270	902.766	280.251	502	1773
1978	11170.774	306.837	10590	12176	2270	1318.203	349.855	831	2407
1978	15989.369	359.757	15239	17211	2270	1860.726	424.2	1275	3183

Tabella 4.3 – Dati relativi al piombo, sia con spessore di 0,65 che di 1,5 mm

- *PolyOne Trilliant HC6200-5002 XR Grey* → spessori relativi a questo materiale sono 1, 2 e 3 mm. Di seguito si riporta la tabella relativa ai dati acquisiti.

PolyOne Trilliant HC6200-5002 XR Grey														
1 mm					2 mm					3 mm				
Valori di Grigio					Valori di Grigio					Valori di Grigio				
Area	Mean	StdDev	Min	Max	Area	Mean	StdDev	Min	Max	Area	Mean	StdDev	Min	Max
810	595.757	116.074	417	984	1116	22.162	28.937	0	123	1984	32.139	60.179	0	282
810	1402.311	163.668	1097	1922	1116	134.335	66.887	35	317	1984	66.975	99.423	0	428
810	2806.763	221.487	2308	3511	1116	376.059	106.583	213	672	1984	136.884	147.106	0	657
810	4709.084	294.912	4052	5584	1116	747.409	160.614	500	1185	1984	260.849	195.465	40	944
810	6683.335	378.957	5751	7779	1116	1166.992	229.541	811	1802	1984	406.892	248.991	124	1302
810	8771.056	483.373	7586	10181	1116	1625.345	314.538	1129	2530	1984	560.24	312.937	199	1670
810	10936.268	587.607	9470	12590	1116	2128.385	410.24	1500	3320	1984	731.49	382.433	287	2096

Tabella 4.4 – Dati relativi al PolyOne Trilliant HC6200-5002 XR Grey, sia con spessore di 1, 2 e 3 mm

- *PolyOne GraviTech GRV-NY-045-CU Copper* → spessori relativi a questo materiale sono 1, 2 e 3 mm. Di seguito viene riportata la tabella relativa ai dati acquisiti.

PolyOne GraviTech GRV-NY-045-CU Copper														
1 mm					2 mm					3 mm				
Valori di Grigio					Valori di Grigio					Valori di Grigio				
Area	Mean	StdDev	Min	Max	Area	Mean	StdDev	Min	Max	Area	Mean	StdDev	Min	Max
836	10591.406	121.008	10248	10950	1121	3336.555	52.45	3202	3505	2059	1350.023	119.718	1199	1782
836	17834.041	178.015	17324	18350	1121	6571.269	92.645	6325	6792	2059	3010.346	160.426	2789	3574
836	27414.606	247.449	26639	28188	1121	11363.131	141.872	10953	11746	2059	5720.885	202.182	5383	6424
836	39804.897	325.454	38806	40799	1121	18081.921	209.057	17499	18650	2059	9792.932	243.728	9359	10697
836	54620.862	407.813	53373	55946	1121	26705.911	288.894	25879	27465	2059	15283.643	282.199	14749	16290
836	62739.221	1706.348	58684	65000	1121	37268.684	385.805	36232	38471	2059	22217.349	318.274	21497	23391
836	62739.644	1706.019	58687	65000	1121	49217.954	489.859	47813	50508	2059	30342.538	355.242	29569	31773

Tabella 4.5 – Dati relativi al PolyOne GraviTech GRV-NY-045-CU Copper, sia con spessore di 1, 2 e 3 mm

In figura 4.13 vengono rappresentati i materiali analizzati in questo test posizionati nel pannello ricevitore dell'OPT, pronti per l'acquisizione dei dati a noi necessari.

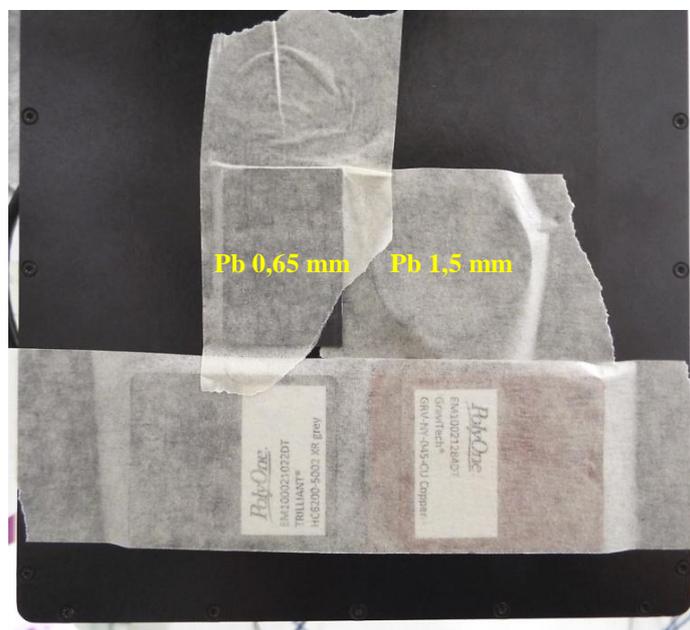


Figura 4.13 – Pannello ricevitore dell'OPT con tecnopolimeri utilizzati nel test 1

Oltre all'immagine riportata appena sopra, di seguito viene inserita anche l'immagine estrapolata da ImageJ, dove si possono notare i vari tecnopolimeri utilizzati con relativi contrasti a livelli di grigio. Fra le varie immagini disponibili si riporta quella relativa al valore intermedio di potenza irradiante, pari a 75 kV.

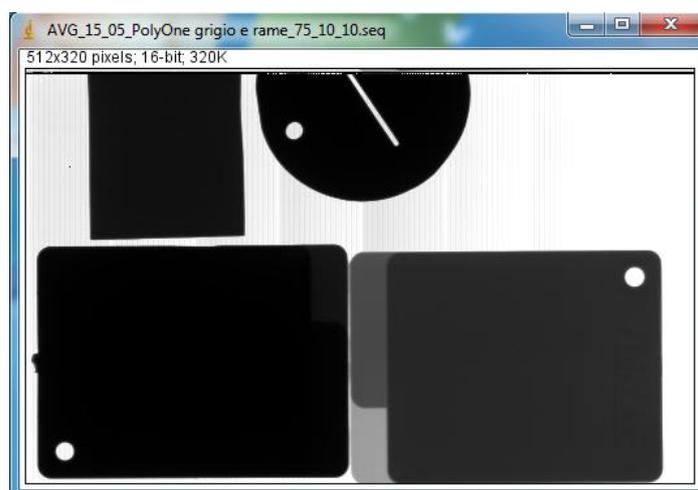


Figura 4.14 – Immagine estrapolata da ImageJ relativa al test 1

TEST 2

Sempre come brevemente esposto in tabella 4.2, in questa prova sono stati analizzati i seguenti materiali:

- **Piombo** → spessori utilizzati in questo test sono stati 0,65 e 1,3 mm di piombo. Nella figura sottostante vengono riportati i dati raccolti relativi a questo materiale.

Piombo									
0,65 mm					1,3 mm				
Valori di Grigio					Valori di Grigio				
Area	Mean	StdDev	Min	Max	Area	Mean	StdDev	Min	Max
2060	550.404	140.627	341	1015	2060	10.845	24.087	0	160
2060	1271.969	201.598	977	1895	2060	49.816	57.153	0	292
2060	2655.305	277.012	2225	3519	2060	302.779	86.588	174	647
2060	4827.101	361.932	4237	5942	2060	714.952	117.533	534	1181
2060	7947.162	449.062	7211	9367	2060	1353.098	154.212	1111	1989
2060	12024.92	536.791	11090	13720	2060	2291.23	196.901	1979	3207
2060	17050.17	630.424	15917	18986	2060	3579.261	245.861	3204	4858

Tabella 4.6 – Dati relativi al piombo, sia con spessore di 0,65 che di 1,3 mm

- **PolyOne GraviTech GRV-NY-045-CU Copper** → spessori utilizzati per questa prova sono stati 1, 2 e 3 mm. Nella figura seguente vengono riportati i dati estrapolati.

PolyOne GraviTech GRV-NY-045-CU Copper														
1 mm					2 mm					3 mm				
Valori di Grigio					Valori di Grigio					Valori di Grigio				
Area	Mean	StdDev	Min	Max	Area	Mean	StdDev	Min	Max	Area	Mean	StdDev	Min	Max
735	10838.18	142.314	10531	11359	975	3556.724	63.903	3403	3799	2130	1355.887	119.159	1214	1731
735	18232.05	183.689	17780	18881	975	6996.503	106.704	6748	7357	2130	3047.961	153.702	2844	3557
735	28026.59	223.229	27505	28940	975	12122.66	170.864	11751	12752	2130	5826.333	181.88	5574	6457
735	40522.27	277.174	39781	41618	975	19183.03	243.831	18622	20018	2130	9982.784	209.956	9619	10725
735	55689.91	330.982	54807	56969	975	28200.51	313.899	27460	29199	2130	15611.22	245.389	15185	16502
735	62281.79	1678.196	58280	65000	975	38846.15	366.986	37862	40092	2130	22598.89	281.687	21963	23679
735	62284.54	1677.592	58282	65000	975	50991.39	407.061	49845	52247	2130	30862.79	327.332	30078	32141

Tabella 4.7 – Dati relativi al PolyOne GraviTech GRV-NY-045-CU Copper, sia con spessore di 1, 2 e 3 mm

- **Lati LatiGray 52/11-01 CX/70** → spessori utilizzati sono stati 2 e 5 mm. Di seguito vengono riportati i dati acquisiti.

Lati LatiGray 52/11-01 CX/70									
2 mm					5 mm				
Valori di Grigio					Valori di Grigio				
Area	Mean	StdDev	Min	Max	Area	Mean	StdDev	Min	Max
1521	8814.748	149.138	8178	9081	2878	1259.705	100.969	1090	1557
1521	12882.44	217.009	12007	13264	2878	1868.897	145.671	1647	2295
1521	18380.49	294.295	17218	18918	2878	2835.828	200.504	2499	3412
1521	25646.84	382.721	24100	26307	2878	4343.38	266.557	3910	5134
1521	34814.25	472.749	32910	35615	2878	6511.872	341.912	5954	7505
1521	45624.94	578.639	43190	46737	2878	9392.479	421.761	8696	10690
1521	57981.57	659.148	55206	59146	2878	13035.53	509.106	12187	14596

Tabella 4.8 – Dati relativi al Lati LatiGray 52/11-01 CX/70, sia con spessore di 2 che di 5 mm

Di seguito viene riportata l'immagine relativa ai materiali analizzati in questo test posizionati nel pannello ricevitore dell'OPT, pronti per l'acquisizione dei dati a noi necessari.

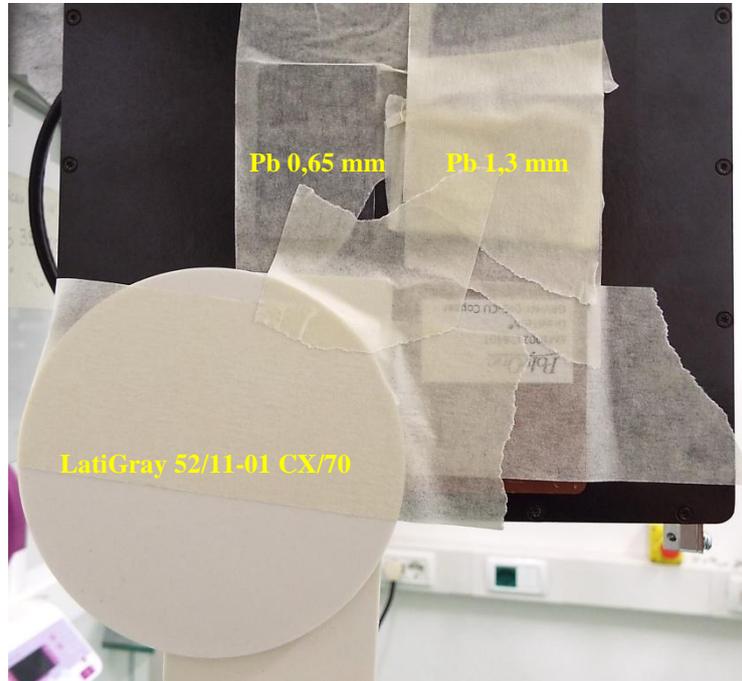


Figura 4.15 – Pannello ricevitore dell'OPT con tecnopolimeri utilizzati nel test 2

Oltre alla figura riportata appena sopra, di seguito viene inserita anche l'immagine estrapolata da ImageJ, dove si possono notare i vari tecnopolimeri utilizzati con relativi contrasti a livelli di grigio. Fra le varie immagini disponibili si riporta sempre quella relativa al valore intermedio di potenza irradiante, pari a 75 kV.

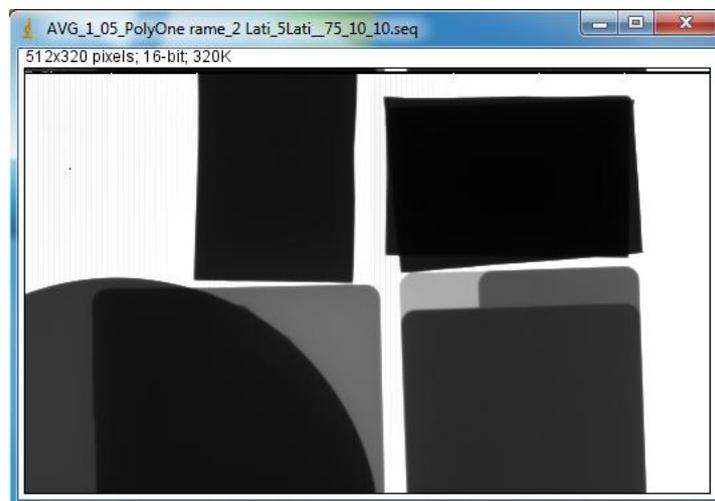


Figura 4.16 – Immagine estrapolata da ImageJ relativa al test 2

TEST 3

Per quanto riguarda il test 3, facendo sempre riferimento alla tabella 4.2, sono stati valutati i seguenti materiali:

- **Piombo** → gli spessori di piombo utilizzati in questa prova sono stati 0,65 e 1,5 mm. In tabella 4.9 vengono riportati i dati ottenuti.

Piombo										
0,65 mm						1,5 mm				
Valori di Grigio						Valori di Grigio				
Area	Mean	StdDev	Min	Max		Area	Mean	StdDev	Min	Max
2365	357.825	71.301	261	642		2571	21.353	38.415	0	174
2365	984.605	98.978	835	1369		2571	46.617	67.56	0	291
2365	2280.873	139.579	2061	2844		2571	220.922	118.556	86	600
2365	4330.905	183.19	4013	5032		2571	448.186	161.465	261	946
2365	7309.991	233.814	6910	8253		2571	737.26	211.695	499	1395
2365	11224.487	285.058	10680	12310		2571	1122.762	267.134	812	1936
2365	16042.624	341.623	15378	17239		2571	1636.208	326.118	1244	2625

Tabella 4.9 – Dati relativi al piombo, sia con spessore di 0,65 che di 1,3 mm

- **PolyOne GraviTech GRV-NJ-090-W Black** → per quanto riguarda questo materiale sono stati utilizzati spessori pari a 1, 2 e 3 mm. I dati estrapolati dai test vengono riportati di seguito.

PolyOne GraviTech GRV-NJ-090-W Black																
1 mm						2 mm						3 mm				
Valori di Grigio						Valori di Grigio						Valori di Grigio				
Area	Mean	StdDev	Min	Max		Area	Mean	StdDev	Min	Max		Area	Mean	StdDev	Min	Max
731	331.178	58.419	225	524		944	15.809	21.586	0	91		3430	6.135	15.178	0	85
731	904.402	90.521	733	1181		944	89.836	53.075	3	241		3430	19.843	35.275	0	165
731	1983.498	134.977	1704	2380		944	271.291	81.267	140	485		3430	56.126	67.862	0	280
731	3451.309	194.628	3010	3947		944	541.181	121.174	343	840		3430	125.648	96.984	4	441
731	4983.037	263.095	4371	5636		944	850.104	172.81	593	1275		3430	210.615	123.569	51	614
731	6565.666	345.713	5756	7404		944	1195.503	233.139	834	1755		3430	301.595	152.635	106	816
731	8216.23	439.38	7216	9291		944	1579.486	305.936	1111	2311		3430	398.61	185.103	165	1031

Tabella 4.10 – Dati relativi al PolyOne GraviTech GRV-NJ-090-W Black, sia con spessore di 1, 2 e 3 mm

- **PolyOne GraviTech GRV-NY-060-Copper** → per quanto riguarda questo materiale sono stati utilizzati spessori pari a 1, 2 e 3 mm. I dati estrapolati dalle prove vengono riportati di seguito.

PolyOne GraviTech GRV-NY-060-Copper																
1 mm						2 mm						3 mm				
Valori di Grigio						Valori di Grigio						Valori di Grigio				
Area	Mean	StdDev	Min	Max		Area	Mean	StdDev	Min	Max		Area	Mean	StdDev	Min	Max
799	6005.108	129.804	5759	6411		1134	1268.034	41.538	1169	1396		3591	310.732	48.774	243	503
799	10904.77	178.104	10567	11523		1134	2903.866	67.085	2759	3087		3591	922.622	69.253	822	1216
799	17787.16	227.645	17378	18527		1134	5607.325	95.298	5391	5834		3591	2097.616	94.648	1952	2485
799	26902.1	294.543	26286	27842		1134	9654.976	128.56	9375	9996		3591	4051.677	125.274	3834	4542
799	38473.64	345.793	37686	39480		1134	15235.24	164.674	14844	15667		3591	6964.603	158.788	6682	7556
799	52036.39	393.644	51049	53161		1134	22211.83	207.18	21719	22677		3591	10847.36	192.391	10496	11538
799	63550.09	1601.677	59829	65000		1134	30488.36	256.082	29807	31068		3591	15699.14	228.766	15264	16497

Tabella 4.11 – Dati relativi al PolyOne GraviTech GRV-NY-060-Copper, sia con spessore di 1, 2 e 3 mm

In figura 4.17 viene riportata l'immagine relativa ai materiali analizzati in questo test posizionati nel pannello ricevitore dell'OPT, pronti per l'acquisizione dei dati a noi essenziali.

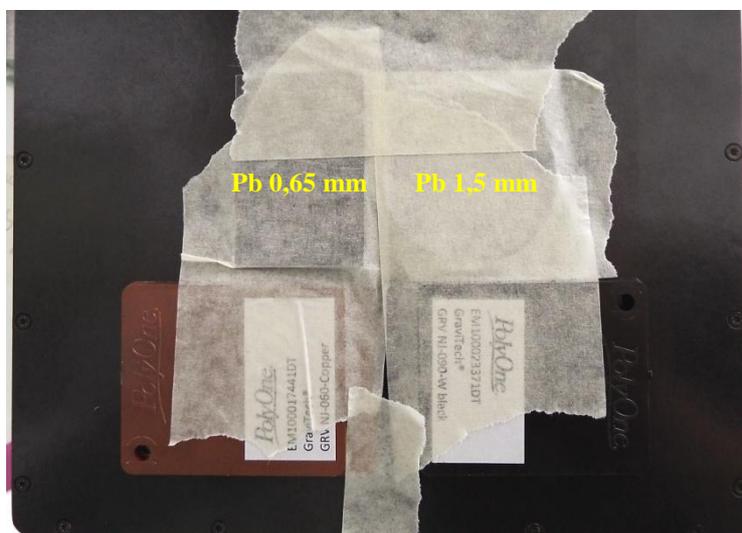


Figura 4.17 – Pannello ricevitore dell'OPT con tecnopolimeri utilizzati nel test 3

Oltre all'illustrazione riportata appena sopra, di seguito viene inserita anche l'immagine estrapolata da ImageJ, dove si possono notare i vari tecnopolimeri utilizzati con relativi contrasti a livelli di grigio. Fra le varie immagini disponibili si riporta quella relativa al valore intermedio di potenza irradiante, pari a 75 kV.

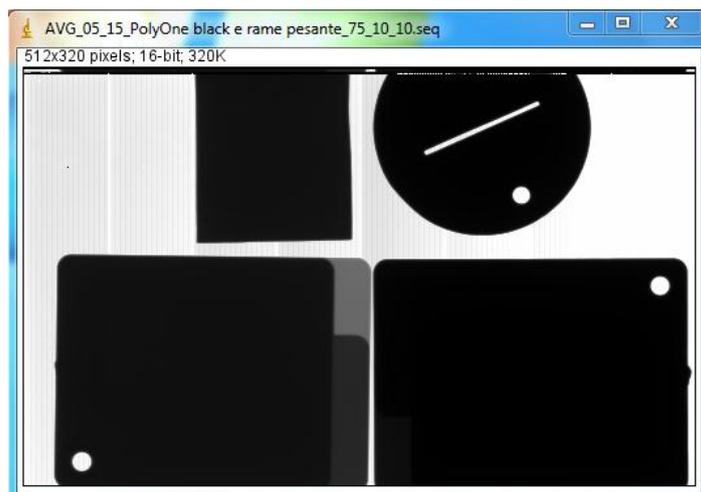


Figura 4.18 – Immagine estrapolata da ImageJ relativa al test 3

TEST 4

I materiali oggetto di questo test vengono riportati di seguito:

- **Piombo** → lo spessore di piombo utilizzate in questa prova è pari a 0,65. Nella tabella sottostante sono illustrati i dati ottenuti.

Piombo				
0,65 mm				
Valori di Grigio				
Area	Mean	StdDev	Min	Max
1888	369.824	65.641	282	605
1888	1021.239	94.321	891	1364
1888	2262.324	136.998	2049	2778
1888	4264.698	187.46	3964	4961
1888	7210.25	240.873	6787	8116
1888	11101.027	303.708	10567	12222
1888	15944.668	374.952	15281	17318

Tabella 4.12 – Dati relativi al piombo con spessore di 0,65

- **Lati LatiGray 52/11-01 CX/70** → a differenza di quanto effettuato nel test 2, in questo caso gli spessori utilizzati per le prove sono stati 2, 3 e 5 mm. In tabella 4.13 vengono esposti i risultati ottenuti.

Lati LatiGray 52/11-01 CX/70														
2 mm					3 mm					5 mm				
Valori di Grigio					Valori di Grigio					Valori di Grigio				
Area	Mean	StdDev	Min	Max	Area	Mean	StdDev	Min	Max	Area	Mean	StdDev	Min	Max
2046	9297.653	224.587	8690	9735	3826	4526.312	123.758	4114	4885	5005	1217.591	97.811	1059	1529
2046	13613.848	328.375	12667	14245	3826	6639.959	179.695	6020	7117	5005	1824.218	139.835	1608	2247
2046	19539.165	458.282	18241	20353	3826	9710.122	256.032	8838	10407	5005	2819.337	192.19	2530	3418
2046	27235.061	613.673	25485	28362	3826	13953.934	350.489	12741	14927	5005	4330.274	251.204	3950	5104
2046	36684.77	766.71	34533	38097	3826	19548.248	465.401	17896	20802	5005	6486.875	319.15	5974	7488
2046	47592.584	904.13	45066	49718	3826	26403.89	593.766	24257	28050	5005	9323.944	394.826	8661	10526
2046	59807.791	1035.394	57038	62833	3826	34488.821	731.039	31889	36526	5005	12904.615	478.76	12137	14390

Tabella 4.13 – Dati relativi al Lati LatiGray 52/11-01 CX/70, sia con spessore di 2, 3 e 5 mm

- **PolyOne GraviTech-TP-050-CU Copper** → questo materiale è una gomma caricata con particelle metalliche di rame. L'unico spessore fornitoci dall'azienda PolyOne è pari a 2 mm. Di seguito vengono riportati i dati ottenuti dal test.

PolyOne GraviTech-TP-050-CU Copper				
2 mm				
Valori di Grigio				
Area	Mean	StdDev	Min	Max
6808	2246.399	134.714	2001	2654
6808	4684.719	198.818	4297	5279
6808	8501.056	272.724	7929	9363
6808	13957.29	356.151	13126	15072
6808	21193.73	438.963	20065	22614
6808	30010.05	520.848	28732	31767
6808	40294.16	594.555	38818	42424

Tabella 4.14 – Dati relativi al PolyOne GraviTech-TP-050-CU Copper con spessore di 2 mm

Di seguito viene riportata l'immagine relativa ai materiali analizzati in questo test posizionati nel pannello ricevitore dell'OPT, pronti per l'acquisizione dei dati a noi necessari.

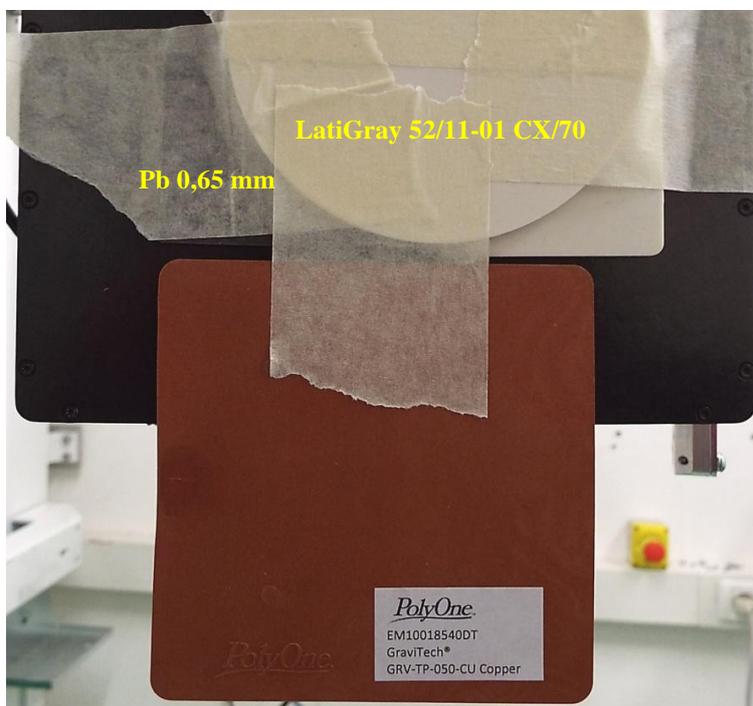


Figura 4.19 – Pannello ricevitore dell'OPT con tecnopolimeri utilizzati nel test 4

Oltre alla rappresentazione riportata appena sopra, di seguito viene inserita anche l'immagine estrapolata da ImageJ, dove si possono notare i vari tecnopolimeri utilizzati con relativi contrasti a livelli di grigio. Fra le varie figure disponibili si riporta quella relativa al valore intermedio di potenza irradiante, pari a 75 kV.

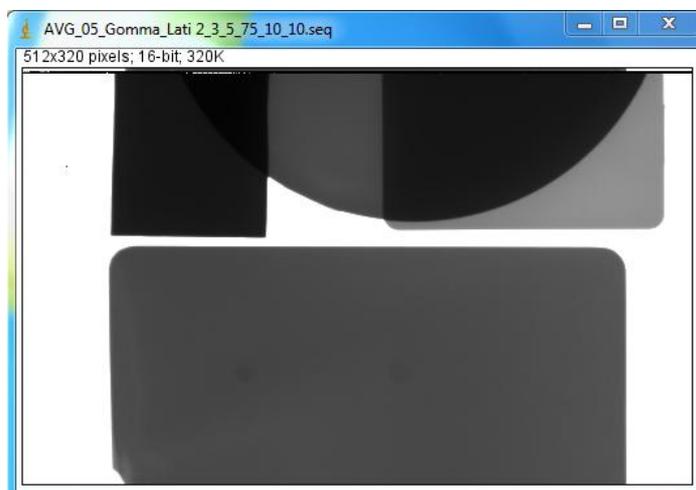


Figura 4.20 – Immagine estrapolata da ImageJ relativa al test 4

TEST 5

Infine, viene riportato l'ultimo test effettuato su questa tipologia di tecnopolimeri radiopachi. In questo test i materiali oggetto di studio sono stati i seguenti:

- **Piombo** → con spessori di 0,65 mm e 1,3 mm. I dati estrapolati sono riportati nella tabella sottostante.

Piombo									
0,65 mm					1,3 mm				
Valori di Grigio					Valori di Grigio				
Area	Mean	StdDev	Min	Max	Area	Mean	StdDev	Min	Max
3600	329.527	68.61	58	799	3600	7.102	19.54	0	148
3600	1041.204	87.425	778	1610	3600	39.834	57.694	0	293
3600	2446.168	122.933	2214	3113	3600	242.036	98.333	87	599
3600	4667.173	169.259	4318	5440	3600	602.299	126.588	407	1071
3600	7788.532	223.633	7319	8856	3600	1189.669	161.43	949	1729
3600	11797.902	277.166	11205	13228	3600	2071.794	201.365	1772	2765
3600	16633.312	327.095	15962	18550	3600	3293.215	243.555	2936	4114

Tabella 4.15 – Dati relativi al piombo, sia con spessore di 0,65 che di 1,3 mm

- **PolyOne GraviTech GRV-NJ-090-W Black** → per quanto riguarda questo materiale sono stati utilizzati spessori pari a 1, 2 e 3 mm. I dati analizzati nei test vengono riportati di seguito.

PolyOne GraviTech GRV-NJ-090-W Black														
1 mm					2 mm					3 mm				
Valori di Grigio					Valori di Grigio					Valori di Grigio				
Area	Mean	StdDev	Min	Max	Area	Mean	StdDev	Min	Max	Area	Mean	StdDev	Min	Max
782	395.861	105.185	220	738	1530	16.559	24.258	0	113	5698	16.741	41.453	0	262
782	973.715	149.774	723	1456	1530	76.135	56.36	0	236	5698	36.223	73.106	0	389
782	2019.885	205.243	1640	2672	1530	215.508	82.488	70	463	5698	70.272	115.424	0	570
782	3468.243	273.655	2928	4354	1530	450.505	112.845	249	795	5698	138.128	169.084	0	789
782	4995.746	351.634	4294	6105	1530	718.063	150.519	454	1148	5698	234.214	222.391	1	1057
782	6589.809	441.47	5648	7919	1530	1014.558	194.838	666	1605	5698	343.782	281.108	45	1380
782	8255.905	534.017	7054	9815	1530	1334.968	246.389	904	2094	5698	462.473	346.867	93	1761

Tabella 4.16 – Dati relativi al PolyOne GraviTech GRV-NJ-090-W Black, sia con spessore di 1, 2 e 3 mm

- **PolyOne Trilliant HC6200-5002 XR Grey** → spessori relativi a questo materiale sono 1, 2 e 3 mm. Di seguito si riporta la tabella relativa ai dati acquisiti.

PolyOne Trilliant HC6200-5002 XR Grey														
1 mm					2 mm					3 mm				
Valori di Grigio					Valori di Grigio					Valori di Grigio				
Area	Mean	StdDev	Min	Max	Area	Mean	StdDev	Min	Max	Area	Mean	StdDev	Min	Max
630	573.944	74.754	443	842	1184	33.59	41.195	0	197	5106	11.691	32.949	0	191
630	1406.073	103.094	1208	1789	1184	135.288	70.476	0	372	5106	28.122	63.483	0	324
630	2865.683	136.739	2584	3335	1184	357.182	95.762	142	690	5106	61.651	108.098	0	491
630	4835.083	179.218	4457	5438	1184	705.308	126.561	471	1122	5106	141.264	161.038	0	720
630	6886.805	223.899	6339	7633	1184	1087.508	165.66	811	1634	5106	252.627	205.951	40	971
630	9037.949	285.877	8318	9984	1184	1498.767	212.916	1135	2163	5106	372.566	255.313	113	1260
630	11266.708	346.354	10428	12309	1184	1937.764	264.638	1490	2774	5106	499.402	310.603	196	1560

Tabella 4.17 – Dati relativi al PolyOne Trilliant HC6200-5002 XR Grey, sia con spessore di 1, 2 e 3 mm

- *Lati LatiGray 82-03 CW/95* → per questo materiale sono stati presi i seguenti spessori: 0,8, 1,5 e 2,55 mm. In tabella 11.18 vengono riportati i dati ottenuti.

Lati LatiGray 82-03 CW/95														
0,8 mm					1,5 mm					2,55 mm				
Valori di Grigio					Valori di Grigio					Valori di Grigio				
Area	Mean	StdDev	Min	Max	Area	Mean	StdDev	Min	Max	Area	Mean	StdDev	Min	Max
1798	1014.828	77.357	836	1207	2160	190.892	80.067	65	501	1798	24.002	36.345	0	165
1798	2254.285	127.812	1983	2609	2160	403.269	104.284	237	800	1798	77.477	64.99	0	319
1798	4378.773	210.245	3941	5017	2160	851.843	131.313	637	1364	1798	246.855	91.055	101	560
1798	7155.091	313.068	6475	8058	2160	1451.777	164.4	1191	2085	1798	453.639	124.655	262	911
1798	10108.318	423.418	9230	11277	2160	2099.356	203	1784	2875	1798	691.97	167.319	425	1281
1798	13252.111	542.788	12046	14656	2160	2792.592	248.576	2417	3732	1798	960.509	219.739	610	1742
1798	16570.484	661.686	15222	18238	2160	3521.42	300.129	3061	4611	1798	1255.154	280.436	818	2270

Tabella 4.18 – Dati relativi al Lati LatiGray 82-03 CW/95, con spessori di 0,8, 1,5 e 2,55 mm

In figura 4.21 viene riportata l'illustrazione relativa ai materiali analizzati in questo test posizionati nel pannello ricevitore dell'OPT, pronti per l'acquisizione dei dati a noi necessari.



Figura 4.21 – Pannello ricevitore dell'OPT con tecnopolimeri utilizzati nel test 5

Oltre alla figura riportata appena sopra di seguito viene inserita anche l'immagine estrapolata da ImageJ, dove si possono notare i vari tecnopolimeri utilizzati con relativi contrasti a livelli di grigio. Fra le varie illustrazioni disponibili si riporta quella relativa al valore intermedio di potenza irradiante, pari a 75 kV.

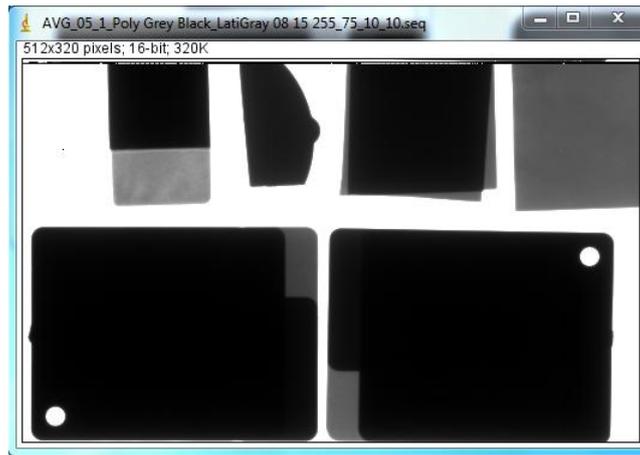


Figura 4.22 – Immagine estrapolata da ImageJ relativa al test 5

4.1.3 – Elaborazione dei Dati Acquisiti

Dopo la fase di acquisizione descritta nel paragrafo 4.1.2, i dati sono stati elaborati attraverso l'utilizzo del software Microsoft Excel.

Per ogni singolo test si è stilato un grafico dove nelle ascisse vengono rappresentati i kV di potenza emessi dal tubo radiogeno (da 60 a 90 kV, con step di 5 kV) e nelle ordinate i livelli di grigio ottenuti su ogni singolo materiale analizzato. Nella legenda vengono indicati i materiali oggetto di studio. Si ricorda che tutti i test sono stati effettuati con una intensità del fascio costante e pari a 10 mA. Lo scopo di questi grafici, e di conseguenza dei test, è quello di andare a valutare i livelli di grigio di ogni materiale e per poi confrontarli con il materiale per noi ritenuto noto, cioè il piombo con spessori di 0,65, 1,3 e 1,5 mm. Se questi tecnopolimeri non rispettano i requisiti di radiopacità espressi almeno dal piombo 0,65 mm, essi sono stati esclusi a priori, in quanto non ritenuti idonei al nostro scopo.

Oltre a ciò, si ritengono attendibili i livelli di grigio compresi fra gli 800 e i 55.000. Al di fuori di questo range i dati raccolti sono da prendere con le dovute cautele, come si potrà notare nei paragrafi successivi. Valori bassi di livelli di grigio sta a significare che la quantità di radiazioni che ha attraversato il materiale durante l'esposizione ai raggi X è bassa. Al contrario, alti livelli di grigio significano che il materiale lascia trapelare troppo le radiazioni, quindi in gergo si dice che si è "bruciato". Questo dipende sia dalla potenza del fascio, sia dal livello di radiopacità del materiale.

TEST 1

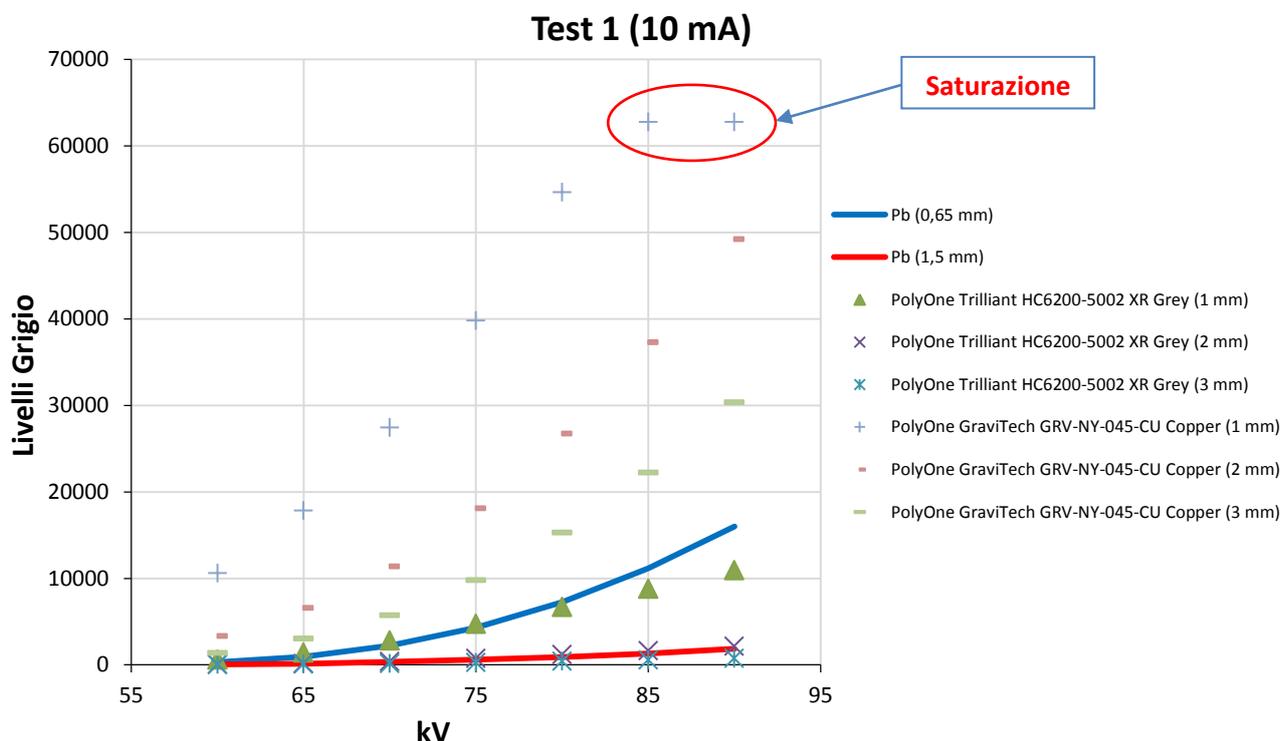


Grafico 4.1 – Grafico relativo al test 1, dove vengono riportati i livelli di grigio di ogni materiale in funzione dei kV

Dal grafico 4.1 è possibile notare come il PolyOne GraviTech GRV-NY-045-CU Copper non soddisfa i nostri requisiti di radiopacità, in quanto tutte e 3 le curve rappresentate (dove varia lo spessore del materiale) si trovano al di sopra della curva rappresentante il piombo con un spessore di 0,65 mm. Andando a valutare la curva relativa allo spessore di 1 mm, essa arriva addirittura a saturazione, cioè quando si raggiunge un valore di livelli di grigio pari a 55.000, per valori di potenza di 85 e 90 kV (la curva si appiattisce). Questo sta a significare che i livelli di grigio sono troppo elevati, cioè il materiale è troppo radiotrasparente (o poco radiopaco, che dir si voglia) per i nostri requisiti.

Per quanto riguarda il PolyOne Trilliant HC6200-5002 XR Grey, invece, tutte e 3 le curve si trovano al di sotto della curva relativa al piombo con 0,65 mm di spessore; addirittura la curva relativa allo spessore di 3 mm si trova al di sotto della curva del piombo con spessore da 1,5 mm. I livelli di grigio, e quindi la radiopacità, sono soddisfacenti per il nostro scopo.

TEST 2

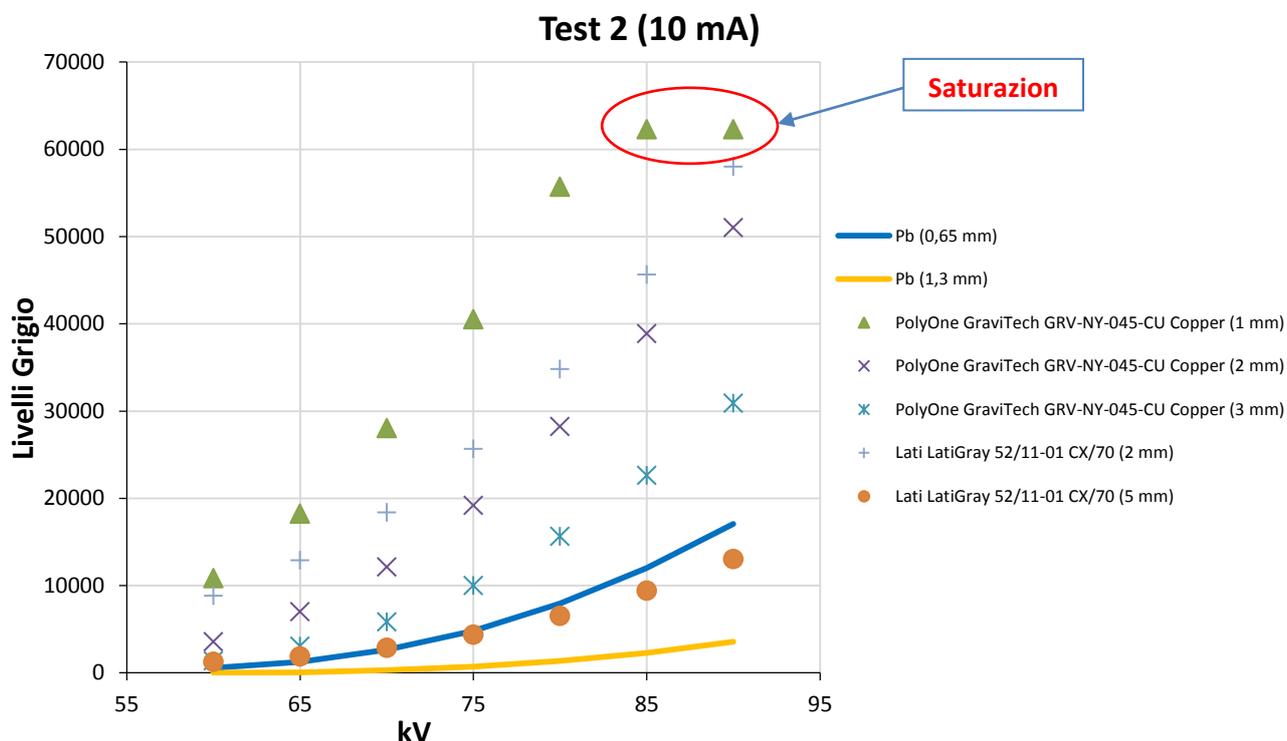


Grafico 4.2 – Grafico relativo al test 2, dove vengono riportati i livelli di grigio di ogni materiale in funzione dei kV

In questo test sono stati messi a confronto i due materiali con densità più bassa a nostra disposizione. Come già scritto nel test 1, ovviamente anche in questo caso il PolyOne GraviTech GRV-NY-045-CU Copper non risulta idoneo al nostro scopo, in quanto la sua radiopacità risulta essere troppo bassa se confrontata con quella del piombo con uno spessore di 0,65 mm.

Per quanto riguarda, invece, il Lati LatiGray 52/11-01 CX/70, esso rispetta i nostri requisiti, anche se solo con lo spessore di 5 mm. Questo materiale, quindi, non verrà direttamente scartato, ma sarà ancora preso in considerazione per i successivi confronti, pur sapendo che la sua radiopacità non risulta essere molto elevata. Considerando, comunque, la sua densità è un risultato che ci aspettavamo di ottenere.

TEST 3

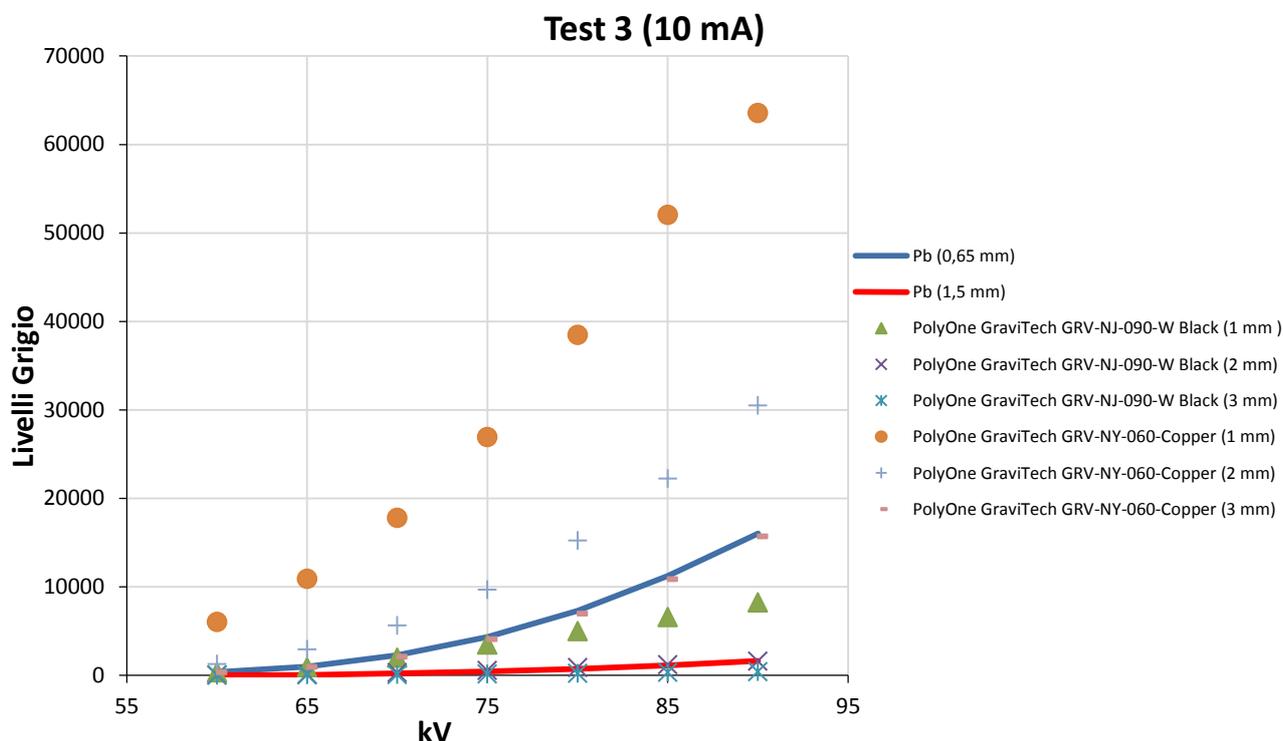


Grafico 4.3 – Grafico relativo al test 3, dove vengono riportati i livelli di grigio di ogni materiale in funzione dei kV

Come è possibile notare dal grafico 4.3, i due materiali utilizzati per questo test sono molto validi dal punto di vista della radiopacità, soprattutto il PolyOne GraviTech GRV-NJ-090-W Black, il materiale con più alta densità a nostra disposizione. Prendendo in considerazione tutti e 3 gli spessori disponibili, essi hanno dei livelli di grigio più bassi rispetto al piombo con spessore da 0,65 mm; se si prendono in considerazione gli spessori di 2 e 3 mm, i livelli di grigio risultano essere inferiori a quello del piombo con spessore di 1,5 mm. Risultato veramente molto soddisfacente.

Per quanto riguarda, invece, il PolyOne GraviTech GRV-NY-060-Copper, solo lo spessore di 3 mm risulta avere gli stessi livelli di grigio del piombo con spessore da 0,65 mm. Anche questo materiale, quindi, non verrà scartato a priori, ma sarà ancora preso in considerazione per i successivi confronti, in quanto presenta comunque un grado di radiopacità soddisfacente. Il suo impiego sarà limitato alla schermatura dei raggi secondari.

TEST 4

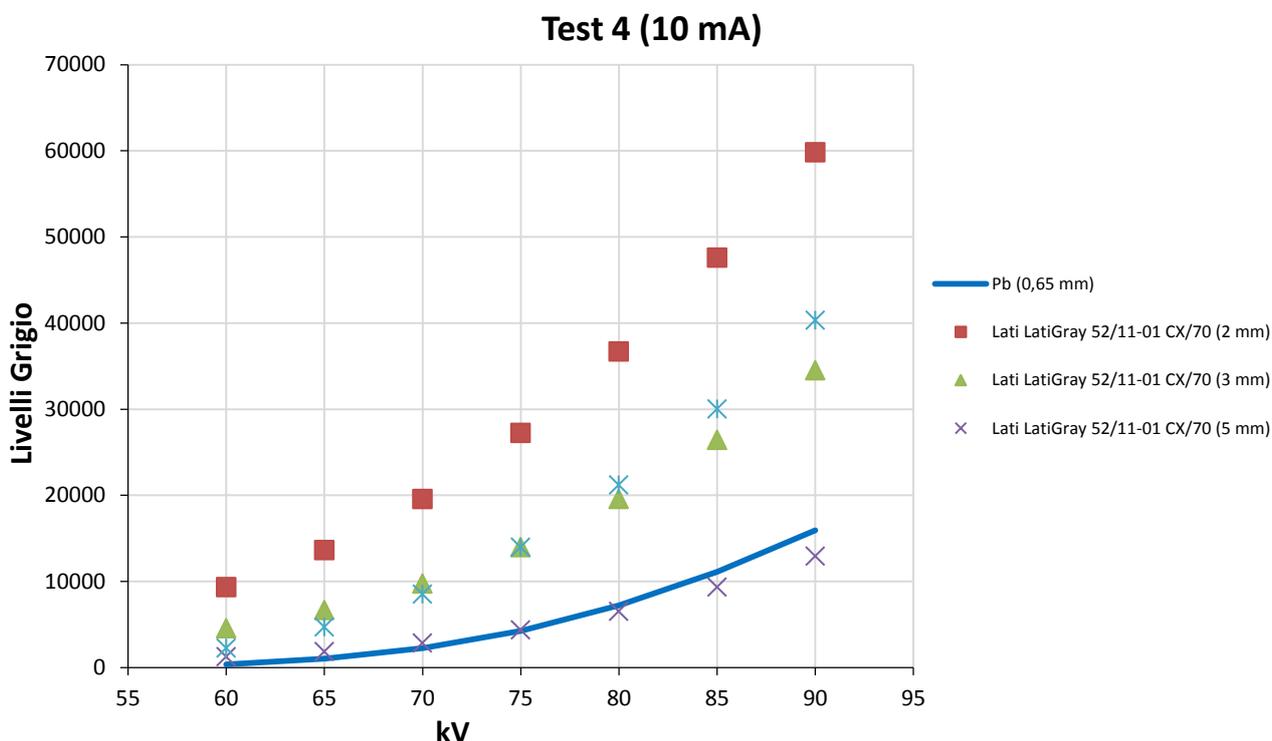


Grafico 4.4 – Grafico relativo al test 4, dove vengono riportati i livelli di grigio di ogni materiale in funzione dei kV

In questo test sono stati messi a confronto il LatiGray caricato con particelle ceramiche (il 52/11-01 CX/70) e il GraviTech realizzato attraverso una matrice di TPE-S (il PolyOne GraviTech-TP-050-CU Copper). Considerando la loro bassa densità e, di conseguenza bassa radiopacità, sono stati confrontati con il piombo avente spessore di 0,65 mm. Il PolyOne GraviTech-TP-050-CU Copper, purtroppo, ci è stato consegnato dall'azienda solo con spessore da 2 mm. Infatti i valori di grigio riscontrati sono molto alti, risultando più del doppio rispetto al piombo con spessore da 0,65 mm, con conseguente grado di radiopacità molto bassa.

Per quanto riguarda il Lati LatiGray 52/11-01 CX/70, abbiamo riscontrato gli stessi valori di grigio del test 2, come è logico attendersi essendo lo stesso materiale.

TEST 5

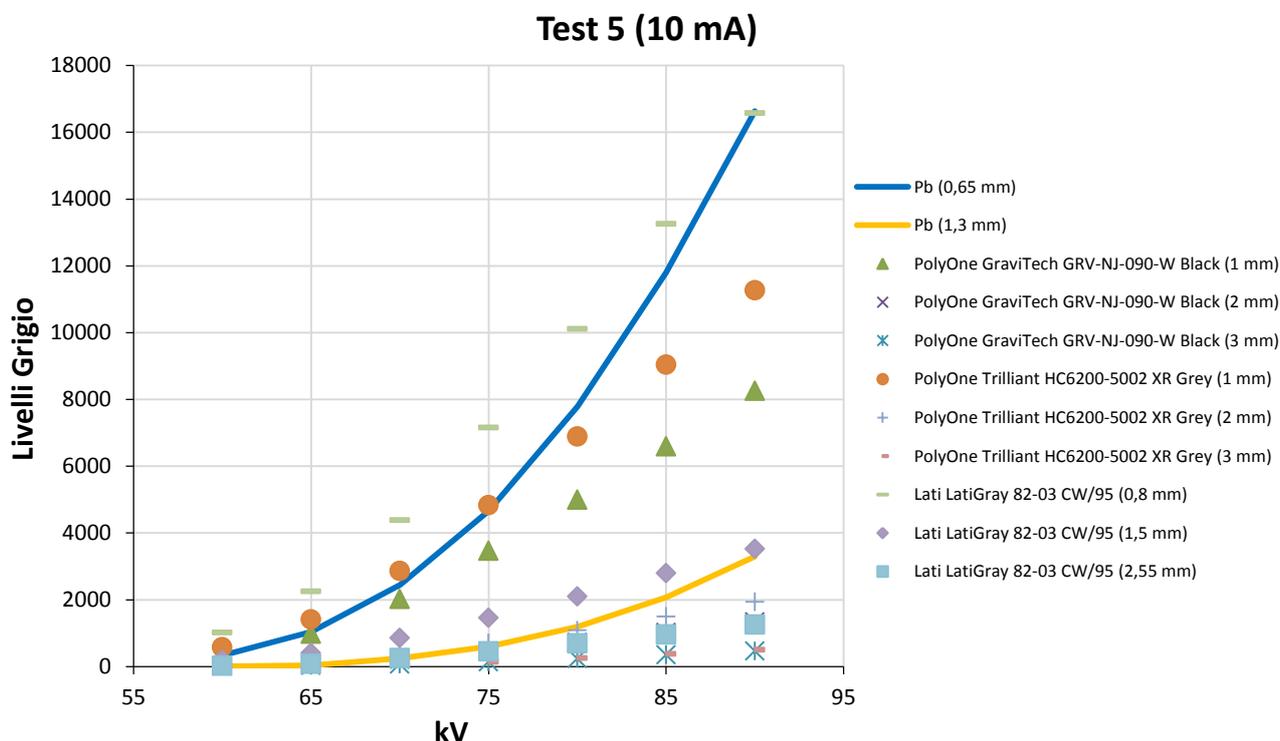


Grafico 4.5 – Grafico relativo al test 5, dove vengono riportati i livelli di grigio di ogni materiale in funzione dei kV

In quest'ultimo test si sono voluti valutare tutti i materiali a più alta densità a nostra disposizione, inseriti all'interno di un unico test, quali il PolyOne GraviTech GRV-NJ-090-W Black, il PolyOne Trilliant HC6200-5002 XR Grey e il Lati LatiGray 82-03 CW/95. Questi tecnopolimeri sono stati confrontati con il piombo aventi spessore di 0,65 e 1,3 mm. Come si può notare dal grafico 4.5, l'unico materiale che presenta un livello di grigio più alto del piombo con spessore 0,65 mm è il Lati LatiGray 82-03 CW/95, ma solo con spessore di 0,8 mm. Bisogna tenere in considerazione che lo spessore è molto basso, quindi il suo grado di radiopacità non poteva risultare molto elevato. Tutti gli altri materiali soddisfano i nostri requisiti obiettivo ed alcuni presentano un livello di radiopacità molto elevato, come si potrà notare anche più avanti nel capitolo, in alcuni casi superiore a quello del piombo stesso, vedi PolyOne GraviTech GRV-NJ-090-W Black.

4.1.4 – Cernita dei Materiali Analizzati

Successivamente alla fase di elaborazione dei dati, descritta nel paragrafo 4.1.3, i materiali oggetto di studio sono stati introdotti all'interno di un unico grafico, dove nelle ascisse è sempre presente la potenza del fascio, espressa in kV, e nelle ordinate i livelli di grigio di ogni materiale.

Questo è stato fatto per effettuare una prima selezione riguardante tutti i materiali testati, in modo tale da andare ad elaborare una mole di dati inferiore ed eliminare i materiali che presentano un livello di radiopacità non consono ai nostri standard. Di seguito viene riportato il grafico con tutti i materiali esaminati, denominato totale.

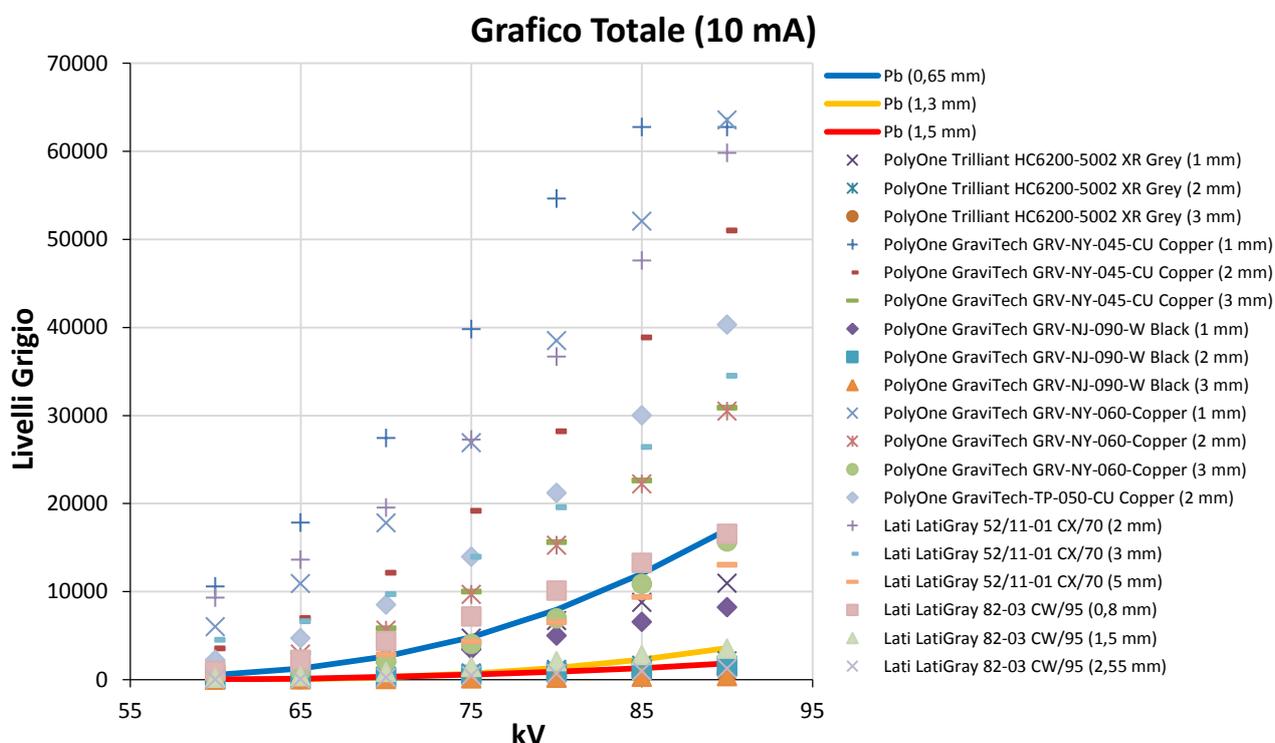


Grafico 4.6 – Grafico relativo a tutti i tecnopolimeri radiopachi analizzati, dove vengono riportati i livelli di grigio di ogni materiale in funzione dei kV

Facendo riferimento al grafico 4.6, è stata effettuata una prima selezione di cui sopra scritto. Tutte le curve, e di conseguenza i materiali, che presentano livelli di grigio superiori al piombo avente spessore di 0,65 mm con tutti gli spessori valutati venivano scartati a priori, in quanto non rispettano i requisiti di radiopacità richiesti. Il risultato ottenuto viene raffigurato nel grafico 4.7, riportato di seguito.

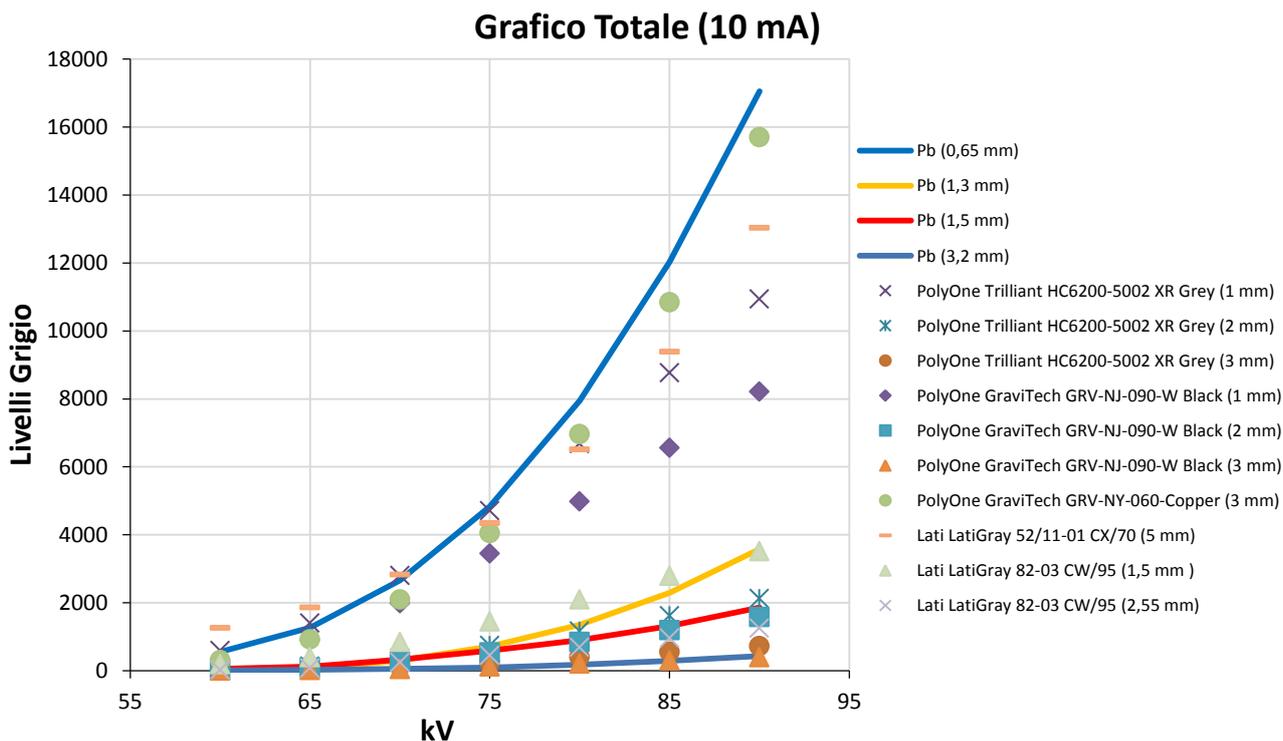


Grafico 11.7 – Grafico relativo alla cernita dei materiali testati, dove vengono riportati i livelli di grigio di ogni materiale in funzione dei kV

Prendendo in esame il grafico 4.7 (dove è stato aggiunto il piombo avente spessore di 3,2 mm), i materiali selezionati per la continuazione dei test vengono elencati di seguito, partendo dal materiale con densità più bassa:

- *Lati LatiGray 52/11-01 CX/70*
- *PolyOne GraviTech GRV-NY-060-Copper*
- *PolyOne Trilliant HC6200-5002 XR Grey*
- *Lati LatiGray 82-03 CW/95*
- *PolyOne GraviTech GRV-NJ-090-W Black*

L'unico materiale scartato, per il momento, è risultato essere il PolyOne GraviTech GRV-NY-045-CU Copper, materiale che non rispetta i nostri requisiti con nessuno degli spessori testati, in quanto il suo livello di radiopacità risulta essere troppo basso. Per quanto riguarda il PolyOne GraviTech-TP-050-CU Copper, esso è stato per il momento accantonato, in quanto il suo scopo sarebbe sostituire una gomma la quale si trova per tutta la sua vita a contatto con l'olio dielettrico, quindi subentrano altri problemi di compatibilità fra l'olio e il materiale termoplastico.

4.1.5 – Curve Caratteristiche Piombo

Dopo aver effettuato una prima selezione dei materiali oggetto di studio, la fase successiva riguarda l'individuazione delle curve caratteristiche del piombo, in funzione dei livelli di grigio e dei millimetri, al variare della potenza emessa dal tubo radiogeno (cioè dei kV), sempre a 10 mA.

Questa operazione viene effettuata per trovare le equazioni, relative ad ogni curva, che ci permetteranno di avere una equivalenza fra i millimetri di un determinato tecnopolimero (fra quelli testati) e il piombo stesso, cioè quelli che in gergo vengono chiamati millimetri di piombo equivalente (mm_Pb_eq), in modo tale da poter effettuare una comparazione fra tutti i materiali testati.

Per ottenere ciò, si è partiti dai livelli di grigio del piombo al variare dei millimetri di spessore e della potenza emessa dal tubo radiogeno (da 60 a 90 kV, sempre con step di 5 kV). Di seguito viene riportata la tabella con i dati relativi ai livelli di grigio.

kV	60		65		70		75		80		85		90	
	mm Pb	lvlGrey	mm Pb	lvlGrey	mm Pb	lvlGrey	mm Pb	lvlGrey	mm Pb	lvlGrey	mm Pb	lvlGrey	mm Pb	lvlGrey
0.65	550.404	0.65	1271.969	0.65	2655.31	0.65	4827.1	0.65	7947.16	0.65	12024.9	0.65	17050.2	
1.3	10.845	1.3	49.816	1.3	302.779	1.3	714.952	1.3	1353.1	1.3	2291.23	1.3	3579.26	
1.5	61.659	1.5	118.778	1.5	332.331	1.5	588.565	1.5	902.766	1.5	1318.2	1.5	1860.73	
3.2	9.74	3.2	25.916	3.2	52.469	3.2	93.913	3.2	179.719	3.2	295.625	3.2	435.789	

Tabella 4.19 – Dati relativi ai livelli di grigio in funzione dello spessore e della potenza (kV)

Inserendo questi dati all'interno di un grafico a dispersione, è stato possibile estrapolare le equazioni che ci servivano per l'ottenimento dei millimetri di piombo equivalente. Il risultato ottenuto è riportato nel grafico seguente (4.8), in cui nelle ascisse vengono espressi i millimetri di piombo, nelle ordinate i livelli di grigio riferiti ad ogni spessore di piombo analizzato e nella legenda la potenza emessa dal tubo radiogeno, sempre da 60 a 90 kV con step di 5 kV. Sulla parte sinistra del grafico vengono riportate le equazioni caratteristiche di ogni curva.

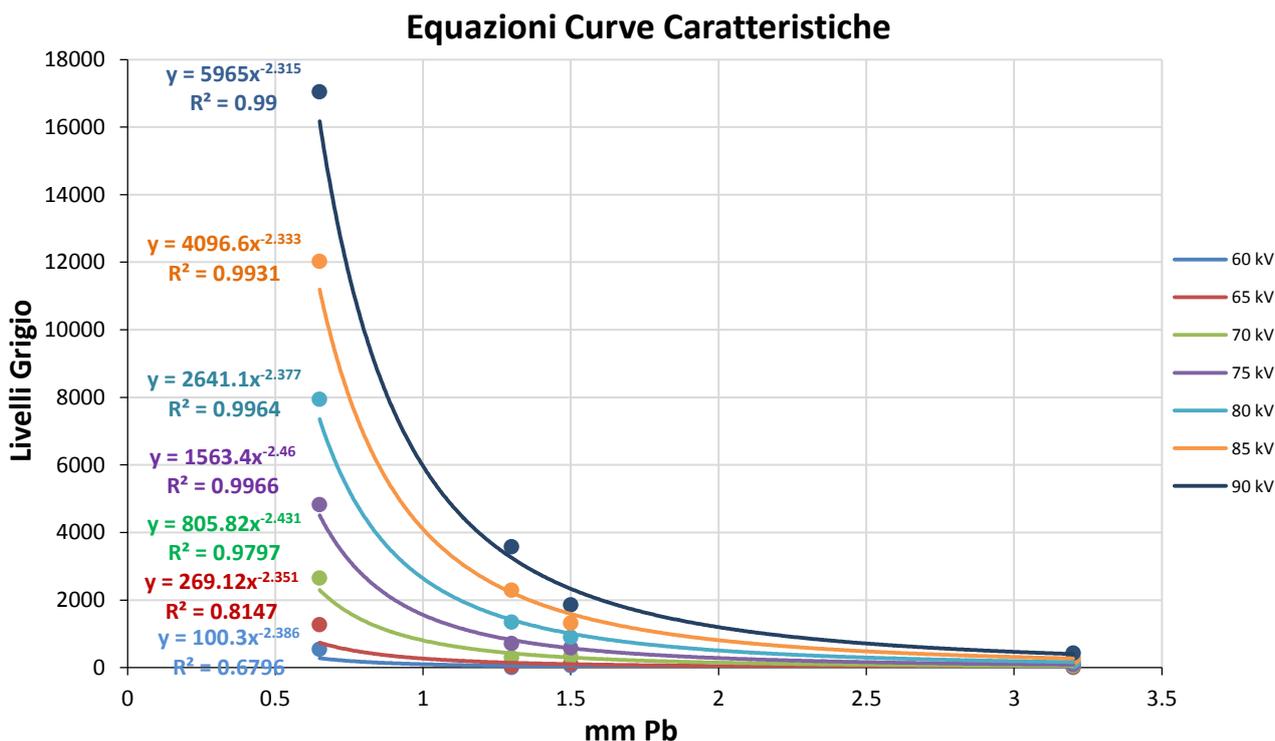


Grafico 4.8 – Grafico in cui vengono rappresentate le curve caratteristiche del piombo

Facendo riferimento al grafico 4.8, le varie curve sono rappresentate attraverso delle potenze, dove per ciascuna di esse viene espressa l'equazione caratteristica con il relativo indice di accuratezza (R^2). Riferendosi a quest'ultimo dato, è possibile notare come la curva a 65 kV, ma soprattutto quella a 60 kV, presentano un indice di accuratezza abbastanza basso, pari a 81,47% e a 67,96% rispettivamente. Questo è dovuto principalmente ai livelli di grigio rilevati, i quali sono estremamente bassi e tutti al di sotto della soglia considerata valida, cioè circa 800 livelli di grigio. Essendo la potenza che va ad irradiare il piombo molto bassa (60 e 65 kV), essa riesce solo in parte ad oltrepassare un materiale molto denso come il piombo, soprattutto se gli spessori sono molto rilevanti (vedi 1,5 e 3,2 mm). Di conseguenza queste curve vanno considerate con le dovute precauzioni.

Prendendo in considerazione le equazioni che identificano le curve rappresentate nel grafico 4.8, con la X si indicano i mm di piombo equivalente, mentre con la Y i livelli di grigio di ogni tecnopolimero analizzato, a diversi spessori di materiale.

4.1.6 – Equivalenza Piombo-Tecnopolimero

Una volta estrapolate le equazioni di tutte le curve caratteristiche del piombo, rappresentate nel grafico 4.8, è stato possibile trovare i millimetri di piombo equivalente riferito ad ogni tecnopolimero, in funzione dei livelli di grigio, al variare dello spessore del materiale. A titolo semplificativo, di seguito viene riportato un esempio.

Si prende l'equazione relativa alla curva riferita ai 90 kV (sempre del grafico 4.8), riportata di seguito:

$$y = 5965x^{-2.315}$$

Considerando che vogliamo trovare i millimetri di piombo equivalente, espressi dalla X, dalla formula appena scritta si ricava la formula inversa:

$$x = \sqrt[2.315]{\left(\frac{5965}{y}\right)}$$

Considerando, sempre a titolo di esempio, il PolyOne GraviTech GRV-NJ-090-W Black con i relativi livelli di grigio (Y), è possibile estrapolare i millimetri di piombo equivalente al variare dei kV e dei millimetri di tecnopolimero, come rappresentato nella tabella seguente (evidenziato in giallo).

PolyOne GraviTech GRV-NJ-090-W Black							
mm->		1	2	3			
kV	R ²	Mean IvlGrey (y)	mm Pb_eq (x)	Mean IvlGrey (y)	mm Pb_eq (x)	Mean IvlGrey (y)	mm Pb_eq (x)
60	0.6796	331.178	0.606151938	15.809	2.169170061	6.135	3.22541849
65	0.8147	904.402	0.597157194	89.836	1.594695708	19.843	3.031386253
70	0.9797	1983.498	0.69036879	271.291	1.564908529	56.126	2.9920321
75	0.9966	3451.309	0.724765761	541.181	1.539173682	125.648	2.786680678
80	0.9964	4983.037	0.765613467	850.104	1.611072858	210.615	2.897684746
85	0.9931	6565.666	0.816944135	1195.503	1.695368036	301.595	3.059430266
90	0.99	8216.23	0.87082314	1579.486	1.775353961	398.61	3.218001844

Tabella 4.20 – Millimetri di piombo equivalente al variare dei kV e dei livelli di grigio del PolyOne GraviTech GRV-NJ-090-W Black

L'operazione appena illustrata viene applicata a tutti i materiali analizzati. Di seguito vengono riportati le tabelle relative ai diversi materiali, dove, appunto, vengono rappresentati i millimetri di piombo equivalente, in ordine di densità.

		Lati LatiGray 82-03 CW/95					
mm->		0.8		1.5		2.55	
kV	R ²	Mean IvlGrey (y)	mm Pb_eq (x)	Mean IvlGrey (y)	mm Pb_eq (x)	Mean IvlGrey (y)	mm Pb_eq (x)
60	0.6796	1014.828	0.379100718	190.892	0.763596404	24.002	1.820919113
65	0.8147	2254.285	0.404924798	403.269	0.841952508	77.477	1.698315471
70	0.9797	4378.773	0.498434656	851.843	0.9774117	246.855	1.626865892
75	0.9966	7155.091	0.538872164	1451.777	1.030569572	453.639	1.653632168
80	0.9964	10108.318	0.568561475	2099.356	1.101395005	691.97	1.756787437
85	0.9931	13252.111	0.604584079	2792.592	1.178504821	960.509	1.862109415
90	0.99	16570.484	0.643170688	3521.42	1.25566475	1255.154	1.960664164

Tabella 4.21 – Millimetri di piombo equivalente al variare dei kV e dei livelli di grigio del Lati LatiGray 82-03 CW/95

		PolyOne Trilliant HC6200-5002 XR Grey					
mm->		1		2		3	
kV	R ²	Mean IvlGrey (y)	mm Pb_eq (x)	Mean IvlGrey (y)	mm Pb_eq (x)	Mean IvlGrey (y)	mm Pb_eq (x)
60	0.6796	595.757	0.473919799	22.162	1.882816691	32.139	1.611215515
65	0.8147	1402.311	0.495526203	134.335	1.343855362	66.975	1.806866625
70	0.9797	2806.763	0.598493957	376.059	1.368203125	136.884	2.073456467
75	0.9966	4709.084	0.638761733	747.409	1.349861912	260.849	2.070763303
80	0.9964	6683.335	0.676660607	1166.992	1.4100316	406.892	2.196522583
85	0.9931	8771.056	0.721575704	1625.345	1.486231919	560.24	2.346171822
90	0.99	10936.268	0.769628853	2128.385	1.560740015	731.49	2.475678198

Tabella 4.22 – Millimetri di piombo equivalente al variare dei kV e dei livelli di grigio del PolyOne Trilliant HC6200-5002 XR Grey

		PolyOne GraviTech GRV-NY-060-Copper					
mm->		1		2		3	
kV	R ²	Mean IvlGrey (y)	mm Pb_eq (x)	Mean IvlGrey (y)	mm Pb_eq (x)	Mean IvlGrey (y)	mm Pb_eq (x)
60	0.6796	6005.108	0.17994788	1268.034	0.345310996	310.732	0.622559145
65	0.8147	10904.772	0.207097966	2903.866	0.363579586	922.622	0.592112398
70	0.9797	17787.164	0.280023912	5607.325	0.450222842	2097.616	0.674664162
75	0.9966	26902.104	0.31454035	9654.976	0.477073092	4051.677	0.679022656
80	0.9964	38473.637	0.324017612	15235.239	0.478433349	6964.603	0.665026688
85	0.9931	52036.388	0.336387184	22211.83	0.484523349	10847.363	0.658765709
90	0.99	63550.094	0.359876116	30488.36	0.494244998	15699.142	0.658354548

Tabella 4.23 – Millimetri di piombo equivalente al variare dei kV e dei livelli di grigio del PolyOne GraviTech GRV-NY-060-Copper

		Lati LatiGray 52/11-01 CX/70					
mm->		2		3		5	
kV	R ²	Mean IvlGrey (y)	mm Pb_eq (x)	Mean IvlGrey (y)	mm Pb_eq (x)	Mean IvlGrey (y)	mm Pb_eq (x)
60	0.6796	9297.653	0.149822613	4526.312	0.202583331	1259.705	0.346266059
65	0.8147	13613.848	0.188446114	6639.959	0.255751503	1868.897	0.43853869
70	0.9797	19539.165	0.269409058	9710.122	0.35919685	2835.828	0.595963024
75	0.9966	27235.061	0.312971491	13953.934	0.410739472	4343.38	0.660101444
80	0.9964	36684.77	0.330573155	19548.248	0.430801535	6511.872	0.684099817
85	0.9931	47592.584	0.34950759	26403.89	0.449916001	9392.479	0.700711686
90	0.99	59807.791	0.369435782	34488.821	0.468611565	13035.529	0.713411105

Tabella 4.24 – Millimetri di piombo equivalente al variare dei kV e dei livelli di grigio del Lati LatiGray 52/11-01 CX/70

Una volta estrapolati tutti i dati relativi ai millimetri di piombo equivalente (riportati nelle tabelle sovrastanti), è stato possibile realizzare dei grafici in cui nelle ascisse vengono rappresentati i millimetri di piombo equivalente mentre nelle ordinate i millimetri di tecnopolimero, questo per ogni kV di

potenza emessa. In questo modo si ottiene una curva (polinomiale del secondo ordine) per ogni materiale analizzato. Di seguito si riportano i vari grafici, in questo caso con step di potenza di 10 kV.

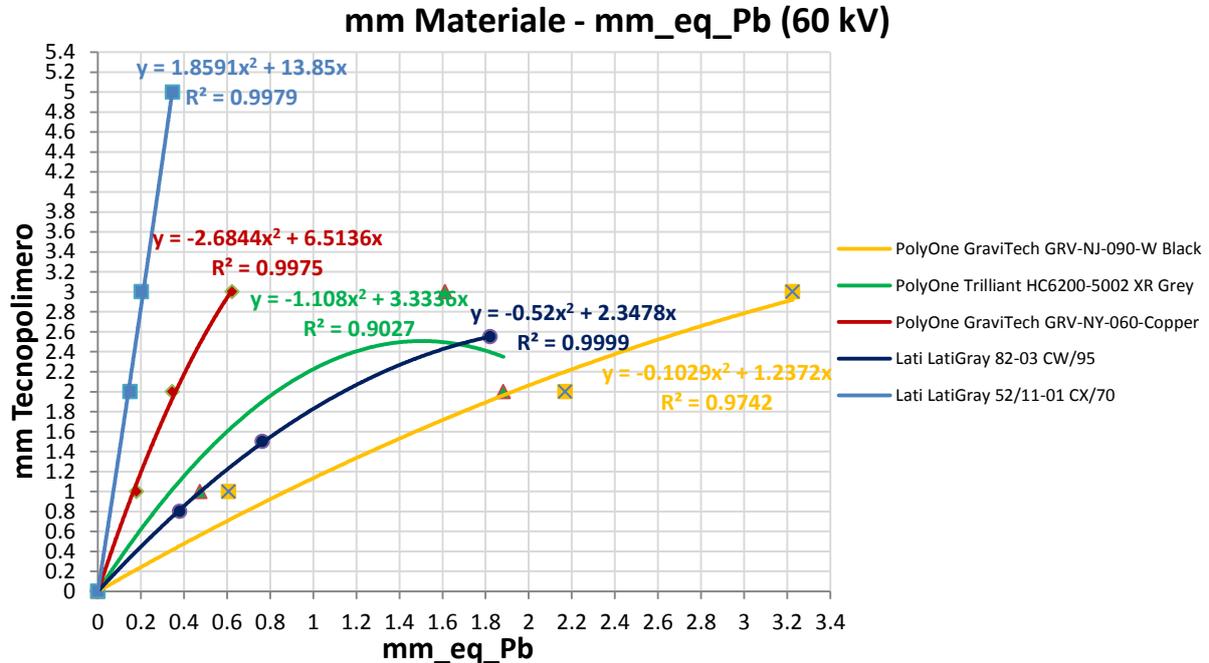


Grafico 4.9 – Curve caratteristiche relative ai mm di piombo/mm tecnopolimero a 60 kV

Come già scritto in precedenza, i risultati ottenuti con una potenza pari a 60 kV non sono troppo attendibili, in quanto i livelli di grigio rilevati sono molto bassi (inferiori agli 800 livelli di grigio), soprattutto con i materiali altamente radiopachi. Infatti, facendo riferimento alla curva relativa PolyOne Trilliant HC6200-5002 XR Grey, è possibile notare come essa abbia un andamento molto particolare, dove i millimetri di piombo equivalenti sono maggiori con 2 mm di spessore di materiale rispetto a 3 mm. Di conseguenza le curve riferite a questa potenza sono sempre da prendere con le dovute precauzioni, in quanto i livelli di grigio riscontrati sono fuori soglia.

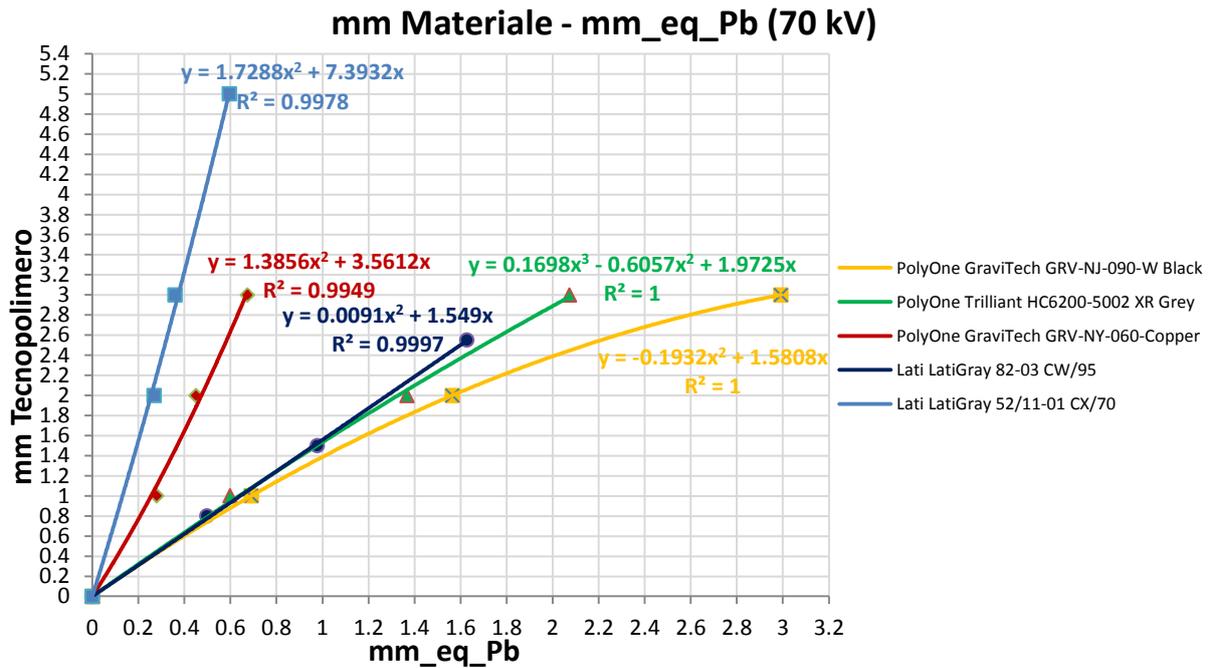


Grafico 4.10 – Curve caratteristiche relative ai mm di piombo/mm tecnopolimero a 70 kV

A differenza di ciò che accadeva a 60 kV, a 70 kV i risultati ottenuti riguardo i livelli di grigio sono sempre risultati attendibili, come d'altronde si può notare anche dal grafico 4.10, in quanto essi sono sempre stati entro il range considerato valido per i test. Il grafico, quindi, può essere considerato a tutti gli effetti valido per il calcolo dei millimetri di tecnopolimero in funzione dei millimetri di piombo equivalente.

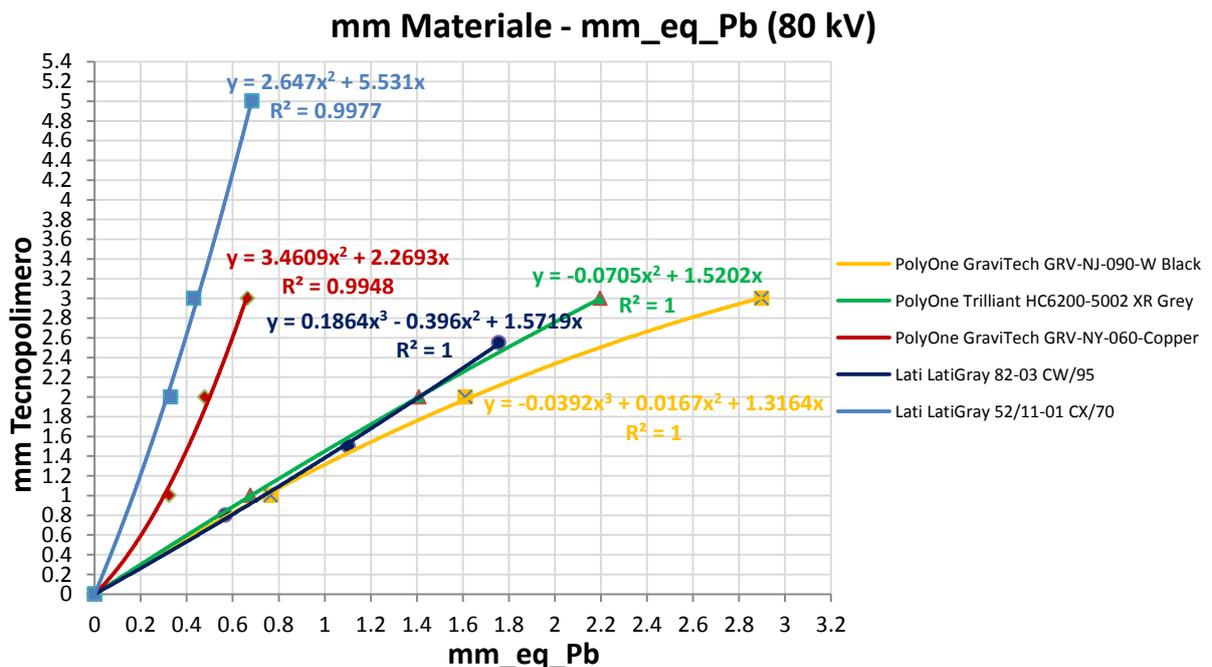


Grafico 4.11 – Curve caratteristiche relative ai mm di piombo/mm tecnopolimero a 80 kV

Un discorso analogo a quanto scritto riguardo la potenza di 70 kV è possibile farlo anche nel caso degli 80 kV, dove il grafico ottenuto risulta essere molto attendibile, in quanto i dati raccolti riguardo i livelli di grigio risultavano tutti all'interno del range considerato valido. È anche possibile notare come le varie curve abbiano un andamento del tutto simile a quelle riferite a 70 kV.

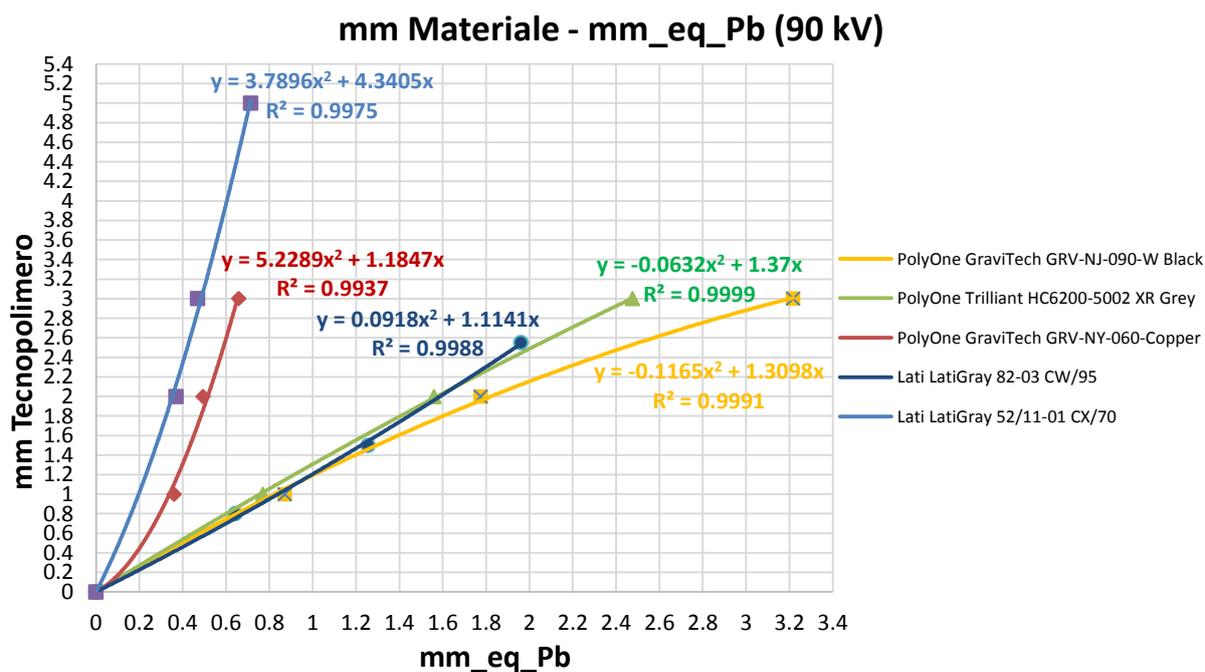


Grafico 4.12 – Curve caratteristiche relative ai mm di piombo/mm tecnopolimero a 90 kV

Come già scritto riguardo il grafico relativo ai 70 e 80 kV, anche nel caso riferito ai 90 kV il grafico ottenuto risulta essere molto attendibile, in quanto i livelli di grigio registrati sono risultati essere tutti entro il range di confidenza (800-55.000). Anche le curve hanno un andamento del tutto simile a quelle riferite ai 70 e 80 kV.

Attraverso l'utilizzo dei grafici sopra esposti (dal 4.9 all'4.12), è stato possibile ottenere i millimetri di materiale necessari affinché siano radiopachi quanto il piombo attualmente utilizzato all'interno dell'OPT. È possibile giungere allo stesso risultato utilizzando le espressioni matematiche estrapolate per ogni singola curva. Entrando nella formula con il valore dei millimetri di piombo (X) è possibile ottenere i millimetri di tecnopolimero equivalenti (Y).

Sempre a titolo di esempio, prendendo il grafico relativo ai 90 kV del PolyOne GraviTech GRV-NJ-090-W Black, è possibile calcolare con esattezza lo spessore che esso dovrà avere affinché sia radiopaco quanto il piombo, attraverso la seguente formula:

$$y = -0.1165x^2 + 1.3098x$$

Prendendo uno spessore di piombo pari a 2 mm (X), lo spessore equivalente (Y) di PolyOne GraviTech GRV-NJ-090-W Black sarà pari a:

$$y = -0.1165 * 2^2 + 1.3098 * 2 = 2.1536 \text{ mm}$$

4.1.6.1 – Discussione dei Risultati Ottenuti

Alla luce di quanto scritto nei precedenti paragrafi, è possibile effettuare una discussione sui risultati ottenuti riguardo la radiopacità di questi tecnopolimeri esaminati.

Prendendo in considerazione i grafici 4.10-4.12 appena illustrati, tralasciando il grafico relativo ai 60 kV, è possibile realizzare una distinzione dei materiali in funzione delle loro radiopacità in due gruppi:

- **Materiali a Bassa Radiopacità** → questi materiali sono il Lati LatiGray 52/11-01 CX/70 e il PolyOne GraviTech GRV-NY-060-Copper, i quali necessitano di spessori elevati (circa 5/6 volte superiore rispetto al piombo) per far sì che essi siano radiopachi quanto il piombo, come è possibile notare dal grafico 4.13 riportato di seguito; presentano densità relativamente basse, nell'intorno dei $2/6 \text{ kg/dm}^3$. Prendendo i grafici 4.10-4.12 essi si trovano a sinistra, con pendenze delle curve molto elevate. Questi materiali, considerando il loro livello di radiopacità, verranno utilizzati per la schermatura dei raggi secondari, definiti nel paragrafo 4.1.1. A titolo di esempio, di seguito viene riportato il grafico relativo alla potenza di 90 kV.

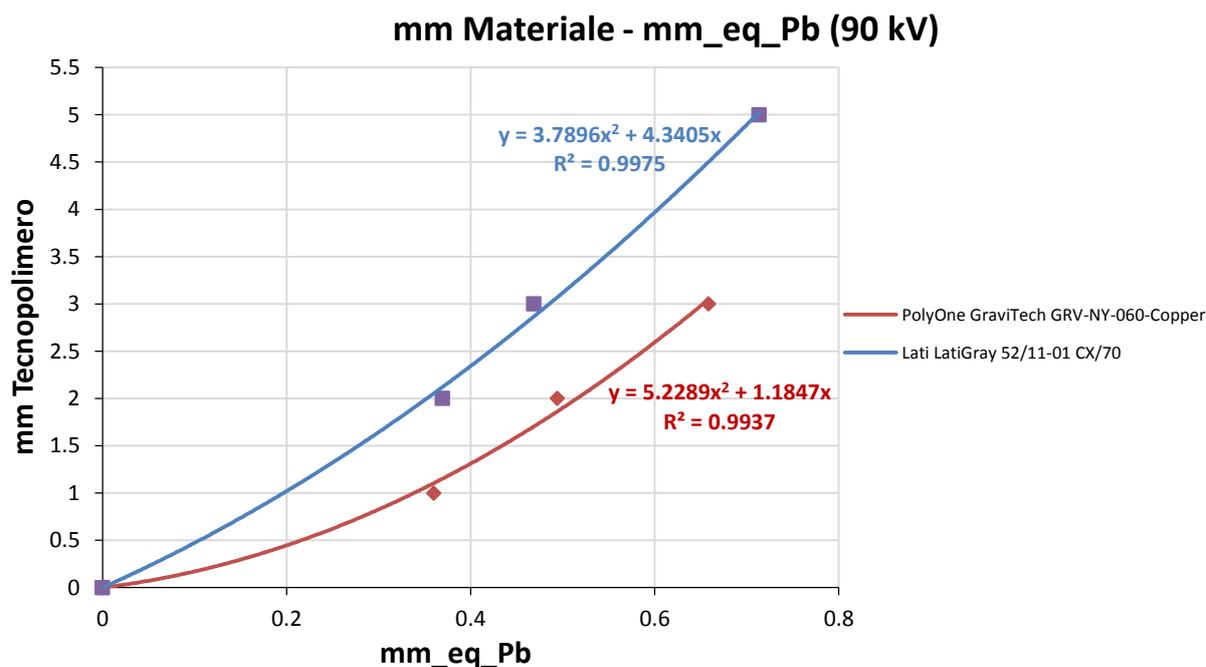


Grafico 4.13 – Curve caratteristiche dei materiali a bassa radiopacità

- Materiali ad Alta Radiopacità** → sempre facendo riferimento ai grafici 4.10-4.12, appartengono a questa famiglia il PolyOne GraviTech GRV-NJ-090-W Black , il PolyOne Trilliant HC6200-5002 XR Grey e il Lati LatiGray 82-03 CW/95, i quali presentano le curve spostate verso destra, con andamento molto meno pendente rispetto ai materiali a bassa radiopacità. Questi materiali presentano densità molto elevate, nell'intorno degli 8 kg/dm³, con valori di radiopacità del tutto paragonabili a quelli del piombo attualmente utilizzato per la schermatura dei raggi X, in alcuni casi addirittura superiore. Questi materiali, considerando il loro livello di radiopacità, verranno utilizzati per la schermatura dei raggi primari, definiti sempre nel paragrafo 4.1.1. Anche in questo caso si riporta il grafico relativo ai 90 kV.

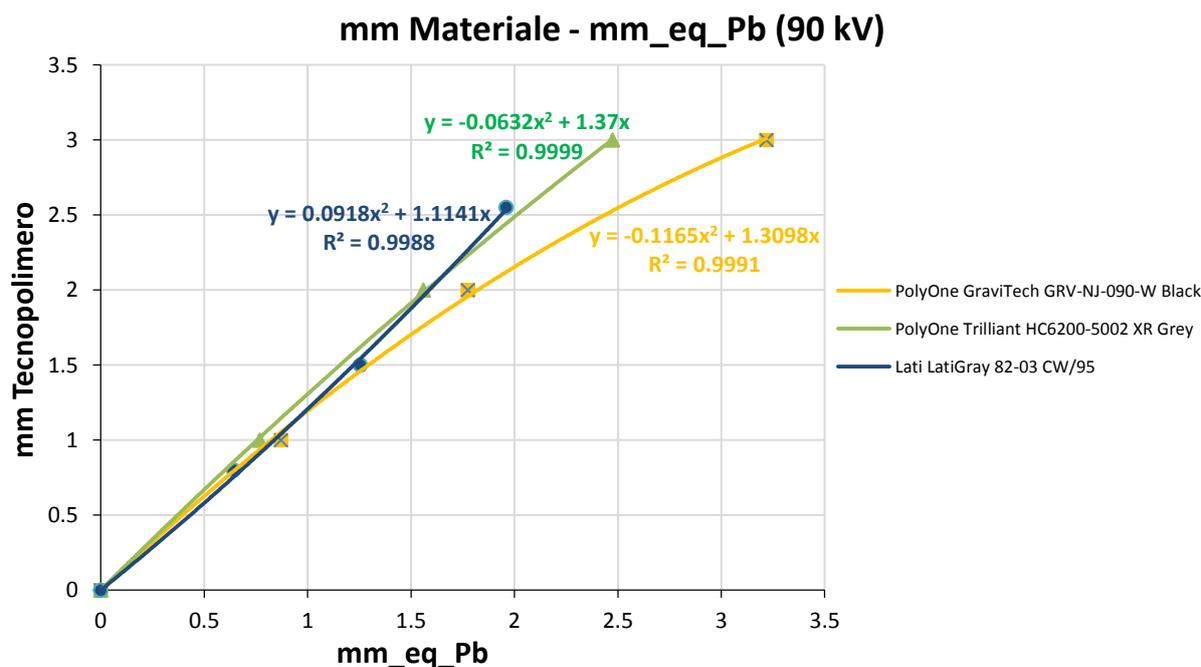


Grafico 4.14 – Curve caratteristiche dei materiali ad alta radiopacità

4.1.7 – Omogeneità dei Materiali

Oltre a trovare l'equivalenza fra i millimetri di piombo e i millimetri di tecnopolimero, è stato possibile valutare l'omogeneità dei materiali analizzati, attraverso l'utilizzo della deviazione standard (StdDev) trovata sempre attraverso l'utilizzo del software ImageJ.

Quello che si è effettuato è stato andare a calcolare il coefficiente di variazione (COV) di ogni materiali, al variare dello spessore di tecnopolimero analizzato e del livello di potenza (kV) prodotto dal tubo radiogeno. Sempre a titolo di esempio, si riporta il calcolo del COV riferito al PolyOne GraviTech GRV-NJ-090-W Black, con spessore di 1 mm e potenza irradiante pari a 90 kV:

kV	Mean IvlGrey (y)	StdDev	COV (dev_std/mean)
90	8216.23	439.38	5.3%

Tabella 4.25 – Dati relativi al PolyOne GraviTech GRV-NJ-090-W Black

Per calcolare il COV, si è divisa la deviazione standard per la media dei valori di grigio; il COV è stato successivamente espresso in percentuale, per risultare più pratico.

$$COV = \frac{StdDev}{mean} = \frac{439.38}{8216.23} = 5.3\%$$

Di seguito vengono riportati i dati relativi ai valori di grigio e il COV di ogni tecnopolimero sottoposto a test, oltre alla deviazione standard, al variare dello spessore e dei kV di potenza.

PolyOne GraviTech GRV-NJ-090-W Black									
mm->	1			2			3		
kV	Mean lviGrey (y)	StdDev	COV (dev_std/mean)	Mean lviGrey (y)	StdDev	COV (dev_std/mean)	Mean lviGrey (y)	StdDev	COV (dev_std/mean)
60	331.178	58.419	17.6%	15.809	21.586	136.5%	6.135	15.178	247.4%
65	904.402	90.521	10.0%	89.836	53.075	59.1%	19.843	35.275	177.8%
70	1983.498	134.977	6.8%	271.291	81.267	30.0%	56.126	67.862	120.9%
75	3451.309	194.628	5.6%	541.181	121.174	22.4%	125.648	96.984	77.2%
80	4983.037	263.095	5.3%	850.104	172.81	20.3%	210.615	123.569	58.7%
85	6565.666	345.713	5.3%	1195.503	233.139	19.5%	301.595	152.635	50.6%
90	8216.23	439.38	5.3%	1579.486	305.936	19.4%	398.61	185.103	46.4%

Tabella 4.26 – Dati relativi al COV del PolyOne GraviTech GRV-NJ-090-W Black

PolyOne Trilliant HC6200-5002 XR Grey									
mm->	1			2			3		
kV	Mean lviGrey (y)	StdDev	COV (dev_std/mean)	Mean lviGrey (y)	StdDev	COV (dev_std/mean)	Mean lviGrey (y)	StdDev	COV (dev_std/mean)
60	595.757	116.074	19.5%	22.162	28.937	130.6%	32.139	60.179	187.2%
65	1402.311	163.668	11.7%	134.335	66.887	49.8%	66.975	99.423	148.4%
70	2806.763	221.487	7.9%	376.059	106.583	28.3%	136.884	147.106	107.5%
75	4709.084	294.912	6.3%	747.409	160.614	21.5%	260.849	195.465	74.9%
80	6683.335	378.957	5.7%	1166.992	229.541	19.7%	406.892	248.991	61.2%
85	8771.056	483.373	5.5%	1625.345	314.538	19.4%	560.24	312.937	55.9%
90	10936.268	587.607	5.4%	2128.385	410.24	19.3%	731.49	382.433	52.3%

Tabella 4.27 – Dati relativi al COV del PolyOne Trilliant HC6200-5002 XR Grey

Lati LatiGray 82-03 CW/95									
mm->	0.8			1.5			2.55		
kV	Mean lviGrey (y)	StdDev	COV (dev_std/mean)	Mean lviGrey (y)	StdDev	COV (dev_std/mean)	Mean lviGrey (y)	StdDev	COV (dev_std/mean)
60	1014.828	116.074	11.4%	190.892	28.937	15.2%	24.002	60.179	250.7%
65	2254.285	163.668	7.3%	403.269	66.887	16.6%	77.477	99.423	128.3%
70	4378.773	221.487	5.1%	851.843	106.583	12.5%	246.855	147.106	59.6%
75	7155.091	294.912	4.1%	1451.777	160.614	11.1%	453.639	195.465	43.1%
80	10108.318	378.957	3.7%	2099.356	229.541	10.9%	691.97	248.991	36.0%
85	13252.111	483.373	3.6%	2792.592	314.538	11.3%	960.509	312.937	32.6%
90	16570.484	587.607	3.5%	3521.42	410.24	11.6%	1255.154	382.433	30.5%

Tabella 4.28 – Dati relativi al COV del Lati LatiGray 82-03 CW/95

PolyOne GraviTech GRV-NY-060-Copper									
mm->	1			2			3		
kV	Mean lviGrey (y)	StdDev	COV (dev_std/mean)	Mean lviGrey (y)	StdDev	COV (dev_std/mean)	Mean lviGrey (y)	StdDev	COV (dev_std/mean)
60	6005.108	129.804	2.2%	1268.034	41.538	3.3%	310.732	48.774	15.7%
65	10904.772	178.104	1.6%	2903.866	67.085	2.3%	922.622	69.253	7.5%
70	17787.164	227.645	1.3%	5607.325	95.298	1.7%	2097.616	94.648	4.5%
75	26902.104	294.543	1.1%	9654.976	128.56	1.3%	4051.677	125.274	3.1%
80	38473.637	345.793	0.9%	15235.239	164.674	1.1%	6964.603	158.788	2.3%
85	52036.388	393.644	0.8%	22211.83	207.18	0.9%	10847.363	192.391	1.8%
90	63550.094	461.677	0.7%	30488.36	256.082	0.8%	15699.142	228.766	1.5%

Tabella 4.29 – Dati relativi al COV del PolyOne GraviTech GRV-NY-060-Copper

Lati LatiGray 52/11-01 CX/70									
mm->	2			3			5		
kV	Mean IvlGrey (y)	StdDev	COV (dev_std/mean)	Mean IvlGrey (y)	StdDev	COV (dev_std/mean)	Mean IvlGrey (y)	StdDev	COV (dev_std/mean)
60	9297.653	224.587	2.4%	4526.312	123.758	2.7%	1259.705	100.969	8.0%
65	13613.848	328.375	2.4%	6639.959	179.695	2.7%	1868.897	145.671	7.8%
70	19539.165	458.282	2.3%	9710.122	256.032	2.6%	2835.828	200.504	7.1%
75	27235.061	613.673	2.3%	13953.934	350.489	2.5%	4343.38	266.557	6.1%
80	36684.77	766.71	2.1%	19548.248	465.401	2.4%	6511.872	341.912	5.3%
85	47592.584	904.13	1.9%	26403.89	593.766	2.2%	9392.479	421.761	4.5%
90	59807.791	1035.394	1.7%	34488.821	731.039	2.1%	13035.529	509.106	3.9%

Tabella 4.30 – Dati relativi al COV del Lati LatiGray 52/11-01 CX/70

Una volta calcolati i coefficienti di variazione (COV) di ogni materiale, i valori sono stati introdotti all'interno di un grafico, riportato di seguito.

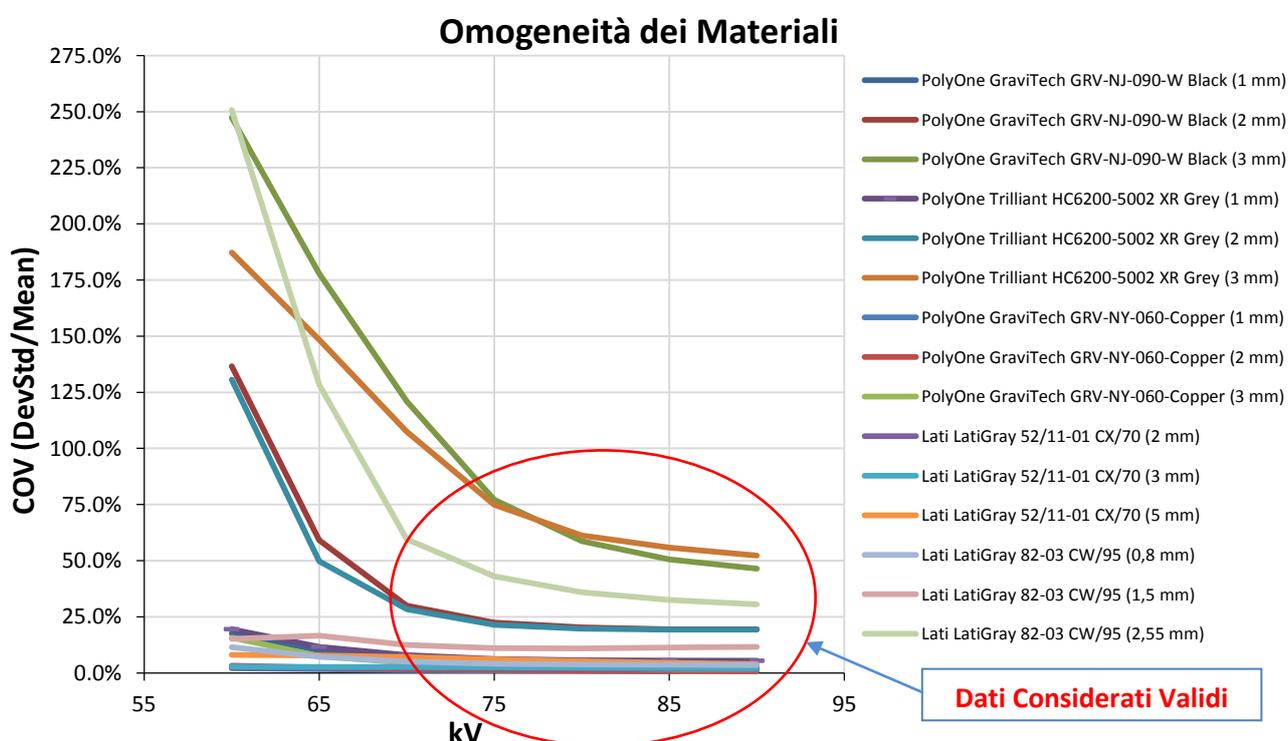


Grafico 4.15 – Curve caratteristiche riguardanti il COV dei materiali esaminati, dalle quali è possibile dedurre l'omogeneità dei materiali

Analizzando i dati riportati nel grafico 4.15, è possibile notare come i materiali altamente radiopachi, quali il PolyOne GraviTech GRV-NJ-090-W Black, il PolyOne Trilliant HC6200-5002 XR Grey e il Lati LatiGray 82-03 CW/95 presentino dei coefficienti di variazione molto elevati, con picchi pari al 250% (circa), con potenze di emissione del tubo radiogeno basse (60 kV). Questo è dovuto al fatto che con potenze molto basse, essendo i materiali molto radiopachi, le radiazioni non riescono ad oltrepassare il materiale, quindi i livelli di grigio rilevati sono molto bassi, inferiori al

limite minimo considerato valido (800). Infatti, prendendo in considerazione la formula utilizzata per il calcolo del COV

$$COV = \frac{StdDev}{mean}$$

si può notare come in questi materiali molto radiopachi, a basse potenze, il denominatore è minore rispetto al numeratore, quindi se espressi in percentuale i valori ottenuti schizzano a valori molto molto elevati. Di conseguenza, si è deciso di considerare validi solo i risultati ottenuti al di sopra dei 75 kV, dove tutti i COV calcolati risultano inferiori al 100%.

Per ovviare a questo problema, una soluzione sarebbe effettuare rilevazioni con potenze (kV) in gioco maggiori, circa 110/120 kV, ma purtroppo i macchinari disponibili nella sala raggi dell'azienda, al momento delle rilevazioni, non possedevano potenze di emissione così elevate (massimo 90 kV). Altro aspetto da considerare è il fatto che i macchinari, come quello descritto nel capitolo 1, utilizzati durante le indagini radiografiche hanno tutti un range di potenza da 60 a 90 kV. Non avrebbe avuto senso, quindi, andare oltre la soglia dei 90 kV.

Se però, come appena scritto, si prendono in considerazione i valori riferiti a potenze superiori ai 75 kV, è possibile notare come i materiali forniti dall'azienda PolyOne risultano essere meno omogenei rispetto a quelli prodotti dall'azienda Lati. Se addirittura si prende in considerazione il Lati LatiGray 82-03 CW/95, materiale altamente radiopaco, con spessore di 2,55 mm esso presenta valori accettabili già a 70 kV, a differenza del PolyOne GraviTech GRV-NJ-090-W Black e del PolyOne Trilliant HC6200-5002 XR Grey che fino a 75 kV presentano valori superiori al 100%.

Il grado di omogeneità di questi materiali è un aspetto molto fondamentale in quanto più il materiale è omogeneo, più lascerà passare attraverso di esso le radiazioni (raggi X) in maniera più uniforme, aspetto da non sottovalutare considerando l'impiego di questi materiali.

4.1.8 – Conclusioni Test Radiopacità

Alla luce di quanto scritto nei precedenti paragrafi è possibile trarre delle conclusioni, anche se non definitive, riguardo questi tecnopolimeri radiopachi, per lo meno per ciò che concerne la loro radiopacità, analizzata in questo capitolo.

Dopo questi test comparativi di radiopacità, i polimeri risultati essere più idonei sotto questo punto di vista sono i seguenti, di cui 2 prodotti dall'azienda Lati e 3 prodotti dall'azienda PolyOne:

- ***Lati LatiGray 52/11-01 CX/70***
- ***Lati LatiGray 82-03 CW/95***
- ***PolyOne GraviTech GRV-NY-060-Copper***
- ***PolyOne Trilliant HC6200-5002 XR Grey***
- ***PolyOne GraviTech GRV-NJ-090-W Black***

Per quanto riguarda il PolyOne GraviTech GRV-NY-060-Copper, il quale presenta al suo interno particelle di rame, si è deciso di evitare l'utilizzo di questo compound, in quanto essendo il rame altamente conduttivo non vorremmo che innescasse fenomeni indesiderati legati a scariche elettriche o a corto circuitazioni, in quanto il tecnopolimero verrebbe utilizzato vicino a sorgenti elettriche come il tubo radiogeno e relativi sistemi di controllo, pur essendo questi componenti immersi in olio dielettrico.

Detto ciò, i materiali rimanenti sono risultati essere molto simili tra loro per quanto riguarda il grado di radiopacità, ovviamente facendo sempre una distinzione fra materiali più e meno radiopachi.

Facendo, però, riferimento al paragrafo 4.1.7 appena illustrato, riguardante l'omogeneità di questi tecnopolimeri, è stato possibile notare come i materiali che ci sono stati forniti dall'azienda PolyOne sono risultati essere tendenzialmente meno omogenei rispetto a quelli realizzati dall'azienda Lati, come illustrato nel grafico 4.15, aspetto molto importante per ciò che concerne l'utilizzo di questi materiali, cioè la schermatura delle radiazioni ionizzanti.

In conclusione si è deciso di continuare i test su questi tecnopolimeri, riguardanti le prove di invecchiamento accelerato illustrate nel paragrafo

successivo, solo con i materiali che ci sono stati forniti dall'azienda Lati, quali il LatiGray 52/11-01 CX/70 e il LatiGray 82-03 CW/95, in quanto sono risultati essere più soddisfacenti nei confronti dei nostri requisiti riguardanti la radiopacità.

4.2 - Test Invecchiamento Accelerato

Alla luce di quanto scritto nel paragrafo 4.1, nella parte conclusiva, si è deciso di scegliere i tecnopolimeri radiopachi realizzati dall'azienda Lati per gli sviluppi successivi dell'elaborato, in quanto sono risultati essere più soddisfacenti dal punto di vista dell'omogeneità. I compound analizzati saranno quindi il LatiGray 82-03 CW/95, il quale sarà utilizzato per la schermatura dei raggi primari, e il LatiGray 52/11-01 CX/70, utilizzato per la schermatura dei raggi secondari. Ovviamente, prima di procedere all'utilizzo di questi tecnopolimeri all'interno dell'OPT come sostitutivi del piombo, bisogna valutare la loro affidabilità nel lungo periodo, attraverso i test che saranno brevemente illustrati nel seguente capitolo e che verranno realizzati in futuro dall'azienda. Questi test verranno effettuati per determinare il comportamento dei compound radiopachi per periodi di tempo molto lunghi (circa 10 anni) attraverso prove accelerate di invecchiamento, sia a contatto con l'aria, sia in olio che al continuo irraggiamento da parte dei raggi X. Per quanto riguarda il piombo attualmente utilizzato, sotto questi tre punti di vista, non genera alcun tipo di problematica, risultando molto affidabile per periodi di tempo molto lunghi. Essendo il LatiGray un materiale composito realizzato attraverso l'utilizzo di un tecnopolimero termoplastico quale la poliammide 12 (o Nylon 12) o il polipropilene, caricato con particelle di tungsteno/materiale ceramico, la nostra più grande preoccupazione è il comportamento di questi materiali nel tempo a contatto con l'olio, in aria e, ovviamente, al continuo irraggiamento da parte dei raggi X, in quanto non vorremmo che essi si degradassero e compromettessero questo materiale dal punto di vista della schermatura, con conseguente arresto dell'OPT. Un'eventuale degradamento del materiale, con contaminazione dell'olio dielettrico da parte del LatiGray, comprometterebbe in maniera irreversibile la testata radiogena.

Per effettuare queste tipologie di prove è stato messo a punto un protocollo di test con l'aiuto dell'azienda Lati, fornitrice del materiale oggetto di studio, attraverso un incontro, in cui sono state valutate assieme le prove da effettuare sui tecnopolimeri, sia tramite la loro esperienza dal punto di vista dei materiali termoplastici, sia tramite l'esperienza acquisita dalla Cefla in questi anni, per ciò che concerne le radiazioni ionizzanti.

4.2.1 - Olio Dielettrico

Per quanto riguarda l'olio dielettrico, utilizzato all'interno della testata radiogena come isolante elettrico, viene utilizzato lo Shell Diala S3 ZX-I Dried, formulato con oli minerali specialmente raffinati con un contenuto in zolfo estremamente basso. Offre una stabilità ossidativa molto elevata ed eccellenti proprietà dielettriche anche a bassa temperatura.

In tabella 4.31 vengono riportate le principali caratteristiche fisiche dello Shell Diala S3 ZX-I Dried.

Proprietà	Unità	Metodo	IEC 60296	Shell Diala S3 ZX-I Dried
Aspetto		IEC 60296	Chiaro, libero da sedimenti e particelle in sospensione	Soddisfatta
Densità a 20°C	kg/m ³	ISO 3675	Max: 895	878
Viscosità cinematica (40°C)	mm ² /s	ISO 3104	Max: 12	8
Viscosità cinematica (-30°C)	mm ² /s	ISO 3104	Max: 1800	720
Punto infiammabilità	°C	ISO 2719	Min: 135	138
Punto scorrimento	°C	ISO 3016	Max: -40	-60
Zolfo corrosivo		DIN 51353	Non corrosivo	Non corrosivo
Rigidità dielettrica	kV	IEC 60156	Min: 30	>60
Fattore dissipazione (DDF) (90°C)		IEC 60247	Max: 0,005	0,001

Tabella 4.31 – Principali proprietà Shell Diala S3 ZX-I Dried

4.2.2 – Dati Iniziali

In questo paragrafo si andranno a illustrare i dati iniziali, raccolti dagli OPT attualmente operativi in vari studi dentistici e non solo, utilizzati per i test sul LatiGray, dove principalmente vengono elencate le temperature di utilizzo e i tempi di permanenza di questo materiale sia in aria che in olio.

I dati da cui si è partiti sono quelli riportati in tabella 4.32 (a, b, c), riguardanti i monoblocchi radiogeni in condizioni di trasporto/stoccaggio, in condizioni di lavoro e in condizioni di trattamento/riempimento.

Condizioni di Trasporto e di Stoccaggio	
Temperatura (°C)	Condizioni Ambientali
da -10 a +70	Componenti in Olio e Aria

Tabella 4.32 (a) – Condizioni di trasporto e di stoccaggio

Condizioni di Lavoro	
Temperatura (°C)	Condizioni Ambientali
da +10 a +60	Componenti in Olio
da +10 a +40	Componenti in Aria

Tabella 4.32 (b) – Condizioni di lavoro

Condizioni di Trattamento e Riempimento	
Temperatura (°C)	Condizioni Ambientali
90 per 72 ore (sotto vuoto)	Componenti in Olio

Tabella 4.32 (c) – Condizioni di trattamento e riempimento

Oltre a questi, sono stati presi in considerazione anche i seguenti dati, riportati in tabella 4.33.

Numero di Cicli Termici in 10 anni	2.200
Ore RX in 10 anni	600
Ore di Esposizione all'Aria in 10 anni	87.600

Tabella 4.33 – Dati di partenza relativi all'utilizzo dell'OPT

4.2.3 – Modello di Arrhenius

Per effettuare i test accelerati sui tecnopolimeri oggetto di studio è stato utilizzato il modello di Arrhenius, largamente accettato per la previsione del comportamento all'invecchiamento su tutta la vita di un prodotto quando i dati reali non sono disponibili.

Le prove sono condotte sottoponendo il materiale a livelli di stress inusuali, previsti per simulare gli effetti di un uso normale nell'arco di un lungo periodo di tempo. I materiali sono mantenuti a temperatura elevata per simulare il degrado chimico. Inoltre, il materiale può essere sottoposto a

rapidi (ma controllati) cambi di temperatura, umidità, pressione, tensione, etc., per simulare le più svariate condizioni ambientali.

È noto che le materie plastiche esposte al calore possono essere soggette a diversi tipi di cambiamento, sia fisici che chimici. La severità del trattamento, intesa sia come tempo sia come temperatura di esposizione, è causa del tipo e del livello della degradazione che ha luogo; come conseguenza si ha che lunghi periodi di esposizione sono generalmente causa di degradi, con progressiva variazione delle proprietà fisico-meccaniche, anche se non necessariamente un materiale plastico si deteriora se esposto alle alte temperature.

Il modello di Arrhenius descrive il fenomeno dell'invecchiamento accelerato, che consiste nell'accelerare i cambiamenti chimico-fisici del materiale esponendolo a temperature più alte di quelle di esercizio in modo da simulare, in tempi brevi, il degrado che lo stesso materiale manifesterebbe se esposto per tempi lunghi alle reali condizioni di utilizzo. Le temperature scelte per i test non devono innescare meccanismi di invecchiamento diversi da quelli originati dalle condizioni di servizio o, comunque, non ne devono modificare il decorso perché ciò potrebbe provocare un danno diverso da quello che si avrebbe nel pezzo in esercizio. Le diverse normative esistenti sull'argomento definiscono la temperatura limite (estrapolata) in funzione del tempo, intesa come la più alta temperatura alla quale la materia plastica può sottostare, per un determinato periodo di tempo, prima che venga raggiunto un prefissato valore critico di una proprietà opportunamente scelta. Queste normative si basano sull'assunzione che esista una relazione lineare tra il logaritmo del tempo previsto per produrre la variazione voluta e il reciproco della temperatura assoluta (come nell'esempio riportato nel grafico 4.17). Per estrapolare un tempo di vita utile, è necessario conoscere l'andamento delle curve per le proprietà del materiale in funzione del tempo in diverse condizioni sperimentali, come invece mostrato a titolo di esempio nel grafico 4.16.

Di seguito viene riportata la legge di Arrhenius:

$$K = A * e^{-\frac{E}{RT}}$$

dove con:

- K → viene indicata la velocità specifica di reazione
- E → l'energia di attivazione
- R → costante dei gas
- T → temperatura assoluta
- A → fattore di frequenza, la quale è una costante

Dalla formula di Arrhenius è possibile ottenere la seguente relazione, estrapolando la formula inversa:

$$\ln K = \ln A - \left(\frac{E}{RT}\right)$$

La relazione appena scritta è riconducibile all'equazione di una retta, del tipo:

$$y = mx + q$$

dove con:

- y → $\ln K$
- m → $-\left(\frac{E}{R}\right)$
- x → $\frac{1}{T}$
- q → $\ln A$

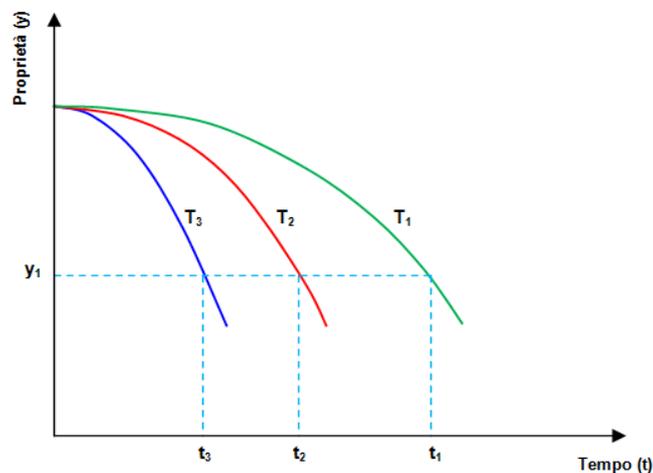


Grafico 4.16 – Proprietà da valutare in funzione del tempo

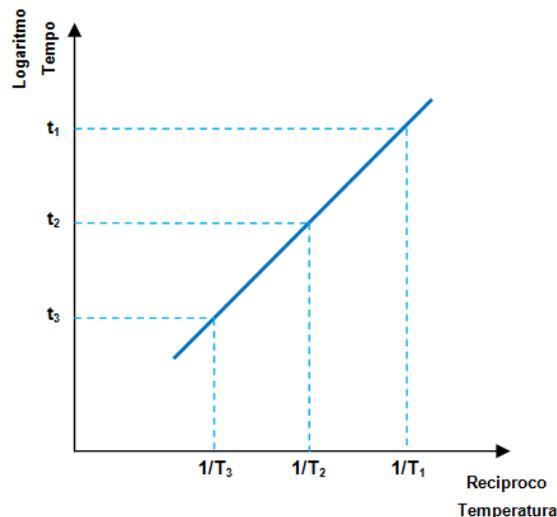


Grafico 4.17 - Andamento del tempo di cedimento in funzione della temperatura

Le variazioni del valore numerico della proprietà prescelta vengono determinate in funzione del tempo a una determinata temperatura, come mostrato nel grafico 4.16. Il raggiungimento del valore di soglia dà il tempo di cedimento a quella specifica temperatura.

A questo punto si riportano i tempi di cedimento in un grafico in funzione degli inversi delle temperature di esposizione e si interpolano i punti con una retta, come rappresentato nel grafico 4.17. Dall'equazione di questa retta ottenuta, si trovano i valori di c e d dell'equazione di Arrhenius ricavata in precedenza.

Con il modello di Arrhenius, quindi, grazie ad un'estrapolazione, si può, da un lato, predire il cambiamento di una data proprietà (y) dopo un dato tempo alla temperatura di esercizio e, dall'altro, trovare una temperatura più alta alla quale si può ottenere lo stesso grado di cambiamento in un tempo più corto e sperimentalmente più accessibile. L'estrapolazione è tanto più valida quanto più i test accelerati sono condotti per periodi lunghi e quanto più vasto è l'intervallo di temperature in cui si conosce l'andamento della proprietà oggetto di studio, che nel nostro caso è la y .

4.2.4 – Protocollo di Test

Considerando quanto scritto nel paragrafo 4.2.3, riguardo il metodo di invecchiamento accelerato descritto dal metodo di Arrhenius, si è cercato di stilare un protocollo di test in modo tale da accelerare il tempo di invecchiamento dei tecnopolimeri LatiGray 82-03 CW/95 e LatiGray 52/11-01 CX/70. Questi test non sono stati eseguiti dal sottoscritto e quindi verranno realizzati in futuro dall'azienda. Di seguito viene riportata la tabella 4.34, dove vengono descritte brevemente le varie prove da effettuare.

Codice Test	Provini	Olio	Temperatura T	Tempo t a Temperatura T	RX	Tempo t sotto RX	Tensionamento	Tempo Totale	Obiettivo di Simulazione
(nome)	(n°)	(si/no)	(°C)	(settimane)	(si/no)	(settimane)	(si/no)	(settimane)	/
A	3	sì	90	2	no	0	no	2	riempimento monoblocco
B	3	sì	90	2	sì	12	no	14	dose RX di 10 anni
C	3	sì	90	6	sì	12	no	18	10 anni a T lavoro e dose RX
D	3	no	circa 20 (ambiente)	0	sì	12	sì	12	dose RX di 10 anni in aria
E	3	sì	crescente	crescente	no	0	no	?	intercettazione danno

Tabella 4.34 – Protocollo di test, stilato attraverso l'utilizzo del metodo di Arrhenius, dove vengono descritte le prove da effettuare sui tecnopolimeri radiopachi

Come si può notare dalla tabella 4.34, i test da effettuare sono principalmente 5, dove in ogni test si cerca di andare a simulare le diverse condizioni che si possono trovare all'interno della testata radiogena e in aria e che quindi interessano anche il LatiGray stesso durante la sua vita. Per ogni test verranno utilizzati 3 provini di LatiGray, in modo tale da avere un riscontro il più realistico possibile, per un totale di 15 provini. Quello che si è cercato di simulare sono, facendo riferimento ai codici test riportati in tabella 4.34:

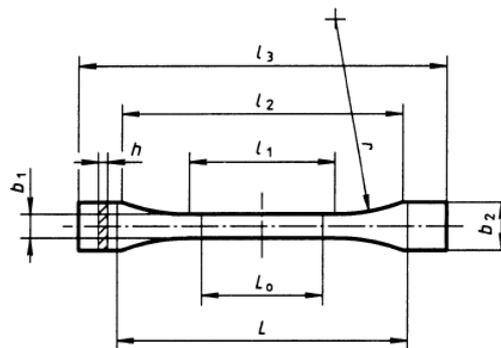
A) *Ciclo di riempimento della testata radiogena (o monoblocco)* → in condizioni reali, la procedura di riempimento di olio della testata radiogena viene effettuata a 90°C in un periodo di tempo di 72 ore. Il corrispondente test accelerato viene effettuato sempre alla temperatura di 90°C, ma per un periodo di tempo di 2 settimane; questo viene fatto

per tutelarci da eventuali riempimenti multipli effettuati sulla testata e avere un minimo di margine di sicurezza.

- B) **Ciclo di riempimento della testata radiogena (o monoblocco) + Dose di raggi X** → anche in questo caso viene effettuato lo stesso ciclo di riempimento del punto A. Passate queste 2 settimane, il tecnopolimero verrà irradiato dai raggi X per un periodo di tempo di 12 settimane (continue) per simulare l'irradiamento di 10 anni previsto.
- C) **Temperatura + Dose di raggi X** → in questa simulazione, per un primo periodo di tempo, il materiale viene mantenuto in olio alla temperatura di 90°C per 6 settimane. Quello che si vuole replicare durante questo test è il periodo di tempo che il LatiGray dovrà permanere all'interno della testata radiogena, cioè la sua vita effettiva di 10 anni.
- Passata questa prima fase, il LatiGray verrà irradiato per un periodo di tempo di 12 settimane, come già effettuato nel punto B. Queste 12 settimane di irradiazione continuo simulano i 10 anni di irradiazione discontinuo, cioè appunto la sua vita reale. Questo viene fatto considerando un numero di cicli medio, in un anno, di irradiazione.
- D) **Dose di raggi X in aria** → in questo quarto test, lo scopo principale è quello di andare a valutare le caratteristiche del materiale, dal punto di vista meccanico, mentre esso viene irradiato dai raggi X per un periodo di tempo di 12 settimane in aria a temperatura ambiente (circa 20°C). Per effettuare ciò, il materiale verrà irradiato mentre viene tensionato da appositi afferraggi. Il materiale verrà testato in aria in quanto, oltre ad essere utilizzato all'interno della testata radiogena immerso in olio, viene utilizzato anche in questa condizione per la realizzazione del collimatore.
- E) **Intercettazione danno** → lo scopo di quest'ultimo test è andare a valutare il danno al sistema dovuto a una qualsiasi causa, come possono essere una contaminazione chimica oppure un degrado meccanico sul tecnopolimero.

Al termine di ogni singolo test, il materiale verrà sottoposto ai seguenti controlli:

- **Verifica del peso e delle dimensioni**, in quanto un aumento significherebbe che il tecnopolimero ha assorbito olio, mentre una diminuzione significherebbe che il materiale si è degradato, andando a contaminare l'olio. Per quanto riguarda le dimensioni, si andrà a misurare lunghezza, larghezza e lo spessore.
- **Prova di trazione**, con ottenimento della curva tensione-deformazione; quello che si vuole valutare è la rigidità del materiale e la sua resistenza. A tale scopo i provini di LatiGray, saranno conformati in modo tale che essi possano essere sottoposti alla prova di trazione, attraverso apposito macchinario. Per quanto riguarda questa tipologie di test sui materiali polimerici, bisogna fare riferimento alla normativa ISO 527 (parte 2), dove vengono indicate le dimensioni caratteristiche che dovranno avere i provini nel caso in cui essi vengano realizzati tramite estrusione oppure stampaggio, come accade nel nostro caso (estrusione). Fra le varie possibili forme rappresentate nella normativa ISO 527, parte 2, quella che interessa a noi è la 1BA e 1BB, descritta nella pagina 6 del documento riguardante la normativa. In figura 4.23, vengono riportate le dimensioni dei provini 1BA and 1BB.



Type of specimen	Dimensions in millimetres	
	1BA	1BB
l_3 Overall length	≥ 75	≥ 30
l_1 Length of narrow parallel-sided portion	$30 \pm 0,5$	$12 \pm 0,5$
r Radius	≥ 30	≥ 12
l_2 Distance between broad parallel-sided portions	58 ± 2	23 ± 2
b_2 Width at ends	$10 \pm 0,5$	$4 \pm 0,2$
b_1 Width of narrow portion	$5 \pm 0,5$	$2 \pm 0,2$
h Thickness	≥ 2	≥ 2
L_0 Gauge length	$25 \pm 0,5$	$10 \pm 0,2$
L Initial distance between grips	$l_2 \begin{smallmatrix} +2 \\ 0 \end{smallmatrix}$	$l_2 \begin{smallmatrix} +1 \\ 0 \end{smallmatrix}$

NOTE The specimen types 1BA and 1BB are proportionally scaled to type 1B with a reduction factor of 1 : 2 and 1 : 5 respectively with the exception of thickness.

Figure A.1 — Test specimen types 1BA and 1BB

Figura 4.23 – Dimensioni caratteristiche del provino secondo normativa ISO 527, parte 2, tipologia 1BA and 1BB

- *Analisi del residuo nell'olio*, mediante filtrazioni successive; questo viene fatto per valutare un eventuale degrado del materiale, con conseguente inquinamento dell'olio. Ovviamente, quello che si desidera ottenere è un residuo pari a 0, in quanto eventuali particelle di materiale in sospensione causerebbero un malfunzionamento della testata radiogena.

CONCLUSIONI

Lo scopo di questa trattazione è stato valutare la possibilità di realizzare una macchina radiologica (nel caso in questione un ortopantomografo, OPT) senza l'ausilio del piombo per la schermatura dai raggi X, cioè realizzare quindi un macchinario così detto lead-free.

Per fare ciò si sono cercati materiali di nuova generazione, che non contenessero piombo al loro interno, i quali dovevano presentare le stesse caratteristiche di radiopacità del piombo.

La scelta è ricaduta su dei materiali polimerici termoplastici caricati con particelle di materiali ad alta densità, che nel caso in questione sono risultati essere composti ceramici, rame e tungsteno.

Dopo questa prima fase sono state contattate due aziende produttrici di questi tecnopolimeri radiopachi, rispettivamente la Lati e la PolyOne, in modo tale da organizzare un incontro e valutare assieme questa possibilità, attraverso la loro esperienza in questo campo.

Successivamente questa presa di contatto, le due aziende ci hanno fornito diversi tecnopolimeri da testare, in modo tale da andare a valutare quale fosse il più idoneo al nostro scopo.

I test si sono principalmente focalizzati sulle prove di radiopacità, in quanto risultava essere l'aspetto principale da valutare e quello di nostro maggiore interesse, mettendoli a confronto con il piombo attualmente utilizzato all'interno dell'OPT, di cui conoscevamo ogni singolo aspetto.

Una volta effettuati questi test, la scelta per la fornitura di questi materiali è ricaduta sull'azienda Lati, in quanto i tecnopolimeri che ci hanno fornito sono risultati essere più soddisfacenti, principalmente sotto il punto di vista dell'omogeneità.

Effettuata questa scelta, abbiamo nuovamente preso contatto con l'azienda in modo tale da riorganizzare un incontro e valutare assieme i successivi test da svolgere. La nostra preoccupazione riguardava il comportamento di questi materiali nel lungo periodo, in quanto attualmente il piombo viene garantito per un periodo di tempo di 10 anni, senza riscontare problematiche di alcun tipo. Considerando che questi tecnopolimeri durante la loro vita

dovranno rimanere a contatto con olio e aria, oltre ad essere irradiati da radiazioni ionizzanti, non vorremmo insorgessero fenomeni di degrado, andando a compromettere la funzionalità del macchinario.

A questo scopo è stato messo a punto un protocollo di test di invecchiamento accelerato, assieme all'azienda Lati, in modo tale da valutare questi tecnopolimeri in un periodo di tempo molto più breve rispetto ai 10 anni di vita che devono garantire, in quanto sarebbe stato inaccettabile, sottoponendoli a diversi cicli di invecchiamento a contatto con olio, aria e irraggiamento da parte dei raggi X.

Detto ciò, è possibile trarre delle conclusioni riguardo la possibilità di sostituire il piombo con questi tecnopolimeri radiopachi. Infatti essi sono risultati essere molto validi dal punto di vista della radiopacità, soprattutto prendendo in considerazione i materiali più radiopachi a nostra disposizione, i quali presentano un livello di schermatura praticamente equiparabile a quello del piombo se non addirittura superiore. Risultato veramente molto soddisfacente.

Altro aspetto da non sottovalutare è il processo produttivo con cui vengono realizzati questi compound, cioè l'injection molding (o stampaggio ad iniezione). Se prendiamo ad esempio il collimatore, il quale deve presentare bordi molto precisi e privi di irregolarità in modo tale che il fascio di raggi X uscente da esso sia ben delineato, attualmente viene realizzato attraverso il processo di tranciatura, risultando essere molto impreciso e molto poco ripetitivo (molti collimatori vengono scartati in quanto non rispettano i requisiti richiesti). Attraverso il processo di stampaggio ad iniezione, invece, questo inconveniente non si manifesta praticamente più, in quanto risulta essere molto più preciso e soprattutto ripetitivo.

Per quanto visto in questa trattazione, quindi, è possibile concludere dicendo che la realizzazione dei componenti schermanti all'interno dell'OPT è un'operazione fattibile, pur considerando che i test di invecchiamento accelerato non sono stati eseguiti dal sottoscritto e verranno effettuati in futuro, per lo meno per ciò che riguarda la schermatura dalle radiazioni ionizzanti.

BIBLIOGRAFIA

- [1]. Le Radiazioni Ionizzanti - G. Moschini, G. Pavarin, M. Pelliccioni, E. Righi; Università di Trento.
- [2]. La Diagnostica per Immagini in Odontoiatria - Cavezian Robert, Pasquet Gerard (2012).
- [3]. Lead and its Alloys - D. R. Blaskett and D. Boxall Ellis Horwood series in metals and associated materials.
- [4]. Engineering Properties and Applications of Lead Alloys, di Sivaraman Guruswamy.
- [5]. <http://www.ing.unitn.it/>.
- [6]. Tungsten; Properties, Chemistry, Technology of the Element, Alloys, and Chemical Compounds - Erik Lassner, Wolf-Dieter Schubert.
- [7]. Fonte: <http://www.tungsten.com/>.
- [8]. Tungsten - W. Fitch, School of Engineering, Morgan State University.
- [9]. Scienza e Ingegneria dei Materiali – William D. Callister Jr.
- [10]. Scienza e Tecnologia dei Materiali – William F. Smith.
- [11]. Tecnologie e Materiali Aerospaziali – G. Sala, L. Di Landro, A. Airoldi, P. Bettini.
- [12]. Manuale delle Materie Plastiche - Hansjürgen Saechtling.
- [13]. Fondamenti di Struttura, Proprietà e Tecnologia dei Polimeri - Pedemonte E.
- [14]. Fonte: <http://www.lati.com/>.
- [15]. Fonte: <http://www.polyone.com/en-us/Pages/default.aspx>.
- [16]. Fonte: <http://www.shell.it/>.
- [17]. Normativa ASTM-D543-95 Chemical Resistance Test.
- [18]. Normativa ISO 527
- [19]. Gennaro, Angelo, Materie Plastiche: testing fisico-meccanici, Milano, Biblioteca Tecnica; Hoepli, 2008.
- [20]. <http://www.ingegneria.unipd.it/>.
- [21]. Materiale gentilmente concessomi dall'azienda Cefla s.c.

*Si ringrazia l'intero reparto R&D divisione MyRay
dell'azienda Cefla Dentale per l'opportunità
offertami e per il supporto umano e professionale,
che mi ha accompagnato durante tutta la durata del progetto.
Ringrazio il Prof. Lorenzo Donati per la revisione
dell'elaborato, la Famiglia e gli Amici per
l'immensa pazienza dimostratami durante tutto il
percorso di Studi.*