



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PALERMO

Facoltà di Scienze MM.FF.NN.

DOTTORATO di RICERCA in SCIENZE CHIMICHE

CICLO XXII

Tomografia Neutronica su oggetti di interesse archeologico

Tesi di Dottorato della
Dott.ssa Graziella Giambona

Tutor
Dr. Fabrizio Lo Celso

Co-Tutor
Prof. Roberto Triolo

Coordinatore
Prof. Michelangelo Gruttadauria

Anni Accademici 2008-2010

Prefazione

Durante i tre anni di dottorato si è cercato di sfruttare le potenzialità delle tecniche tomografiche combinate con i requisiti della sonda neutronica per studiare sia materiali di interesse archeologico, in particolare i legni e marmi, sia reperti provenienti da fondali marini. Tale interesse è nato principalmente per due motivi: il primo motivo è legato all'interesse per la tutela del patrimonio culturale in particolare di quello proveniente dal mondo subacqueo basti pensare alla "convenzione UNESCO 2001 sulla protezione dei beni culturali sommersi" e alla conferenza di Londra del 2004 " Dalla ricerca alla politica per il sostenimento dei beni culturali dell'Europa";

il secondo motivo è che chi si occupa della salvaguardia e conservazione dei beni culturali richiede sempre più, tecniche non distruttive e non invasive che permettano di comprendere l'entità di degrado, capire come intervenire nel restauro e se l'opera di restauro è andata a buon fine.

Per quanto riguarda i legni, oltre alla Tomografia Neutronica è stata applicata la Tomografia a raggi X in quanto in questo modo è stato possibile avere una visione più completa del sistema ed inoltre è stato possibile mettere in risalto i pregi e le differenze delle due sonde e quindi la loro complementarietà.

Al fine di far comprendere la ricerca effettuata in questi tre anni di dottorato in Scienze Chimiche la tesi è stata strutturata nel seguente modo:

- un primo capitolo che parla in generale dei principi su cui si basa la tomografia, in particolare viene approfondita la tomografia neutronica;
- un secondo capitolo in cui si parla in generale delle materie prime utilizzate dell'uomo nel corso degli anni, soffermandoci maggiormente sui legni e sui marmi;
- Un terzo capitolo in cui vengono riportati i materiali utilizzati, la strumentazione e come si acquisiscono ed effettuano le ricostruzioni dei dati di tomografia;
- un quarto capitolo in cui vengono riportate le elaborazioni effettuate sui dati di Tomografia a raggi x, Tomografia Neutronica e Radiografia Neutronica su materiali lignei;
- un quinto capitolo in cui vengono riportate le elaborazioni effettuate sui dati di tomografia neutronica su marmi provenienti da Villa Adriana (Tivoli);
- un sesto capitolo in cui vengono riportate le elaborazioni effettuate sui dati di tomografia neutronica su reperti subacquei;

Chiude la presentazione una breve conclusione.

Indice

1. Tomografia

1.1	Introduzione.....	1
1.2	Interazione radiazione materia.....	3
1.3	Concetti matematici per la ricostruzione tomografica.....	9
2.3.1	Algoritmi di ricostruzione.....	14
1.4	Tomografia neutronica.....	18
1.4.1	Introduzione.....	18
1.4.2	Proprietà dei neutroni e interazione con la materia.....	18
1.4.3	Produzione dei neutroni.....	20
1.4.4	Dettagli sulla Tomografia Neutronica.....	23
1.4.4.1	Caratteristiche del fascio e della sorgente neutronica.....	23
1.4.4.2	Rivelatore.....	27
1.4.4.3	Camere CCD o Pannelli Piatti di a-Si.....	28
1.4.4.4	Porta campione.....	30
1.4.4.5	Protezioni.....	31
1.5	Tomografia a raggi X.....	31
	Bibliografia.....	36

2. Materie prime utilizzate dall'uomo nel corso degli anni

2.1	Introduzione.....	38
2.2	Legni.....	39
2.2.1	L'importanza del legno dal passato fino ai nostri giorni.....	39
2.2.2	Struttura del legno.....	40
2.2.3	Composizione chimica del legno.....	46
2.2.4	Legni archeologici e metodi di consolidamento.....	49
2.3	Roccia metamorfica – Marmo.....	52
2.3.1	Metamorfismo.....	53
	Bibliografia.....	57

3. Materiali, strumentazione e software utilizzati

3.1	Materiali.....	58
-----	----------------	----

3.2 CONRAD.....	60
3.3 Acquisizione dati e ricostruzioni.....	62
Bibliografia.....	64
4. Tomografia neutronica applicata allo studio di legni degradati	
4.1 Introduzione.....	65
4.2 Legni degradati.....	66
4.3 Radiografia e Tomografia Neutronica.....	74
4.4. Complementarietà XT e NT.....	79
5. Tomografia neutronica applicata allo studio di rocce metamorfiche – Marmi	
5.1 Introduzione.....	81
5.2 Elaborazione dei dati di NT sui campioni di Villa Adriana.....	82
5.3 Confronto NT e ND.....	87
5.4 Campione V18.....	89
Bibliografia.....	90
6. Tomografia neutronica applicata allo studio di reperti subacquei	
6.1 Introduzione.....	91
6.2 Lingotti di piombo di epoca romana.....	92
6.3 Reperti integralmente corrosi.....	94
6.4 Reperti contenenti funi.....	98
7. Conclusioni.....	100

Capitolo 1

Tomografia

1.1 Introduzione

La parola tomografia deriva dal greco "tomos" che significa tagliare e "graphein" che significa scrivere. Con il termine tomografia generalmente si intendono le tecniche non-distruttive che usano le semplici proiezioni. In questi metodi un campione è proiettato non-distruttivamente in più direzioni mediante il passaggio di un fascio di radiazione che lo attraversa e mediante la misura delle modificazioni che questo fascio subisce in conseguenza della sua interazione con la materia che costituisce il campione. Quindi, un fascio (raggi X , neutroni etc) viene fatto incidere sul campione e viene raccolto da un rivelatore. Il risultato di tale processo è la creazione di una immagine bidimensionale, detta proiezione, che tiene conto delle modifiche che il fascio ha subito nella sua interazione con il campione. Per ricostruire il campione in tre dimensioni occorrono più proiezioni ottenute secondo differenti direzioni e ciò è possibile mediante la rotazione del campione rispetto al sistema sorgente-rivelatore (Figura 1.1.1). In teoria per ricostruire esattamente la sezione del campione sarebbe necessario un numero infinito di proiezioni. Dal set di proiezioni prese a differenti angoli di rotazione (intervallo va da 0° a 180°), mediante opportuni algoritmi, si ottiene la ricostruzione del campione. Il segnale usato per la ricostruzione tomografica di un oggetto è una funzione monotonica di una proprietà fisica proiettata. Quindi il risultato di una ricostruzione tomografica è una mappa tri-dimensionale della suddetta proprietà fisica. L'immagine tomografica contiene due tipi di informazione: quella spaziale (forma e dimensione) e quella relativa alle intensità.

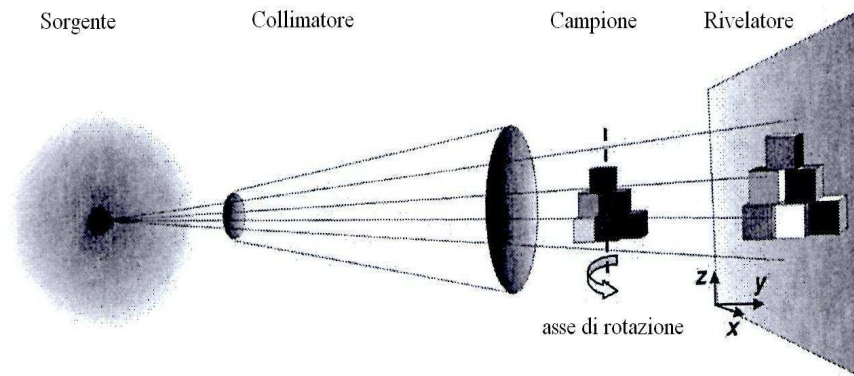


Figura 1.1.1 Schema rappresentativo di uno strumento di tomografia.

Tre sono le geometrie per effettuare un'indagine di tomografia, a seconda della forma del fascio incidente:

- geometria pencil-beam o parallel-beam,
- geometria fan-beam ,
- geometria cone-beam.

Nella geometria pencil-beam il fascio incidente è collimato in modo da ottenere un "fascio parallelo". Durante l'indagine tomografica, per ogni angolo di rotazione, vengono acquisite le proiezioni del campione "punto per punto".

Nella geometria fan-beam il fascio incidente è collimato in modo da ottenere un "fascio a ventaglio". Durante l'indagine tomografica, per ogni angolo di rotazione, vengono acquisite le proiezioni del campione "sezione per sezione".

Nella geometria cone-beam il fascio incidente ha la forma di un cono. In questo caso, per ogni angolo di rotazione, si acquisisce la radiografia dell'intero oggetto in esame.

Oltre ai metodi tomografici che usano le semplici proiezioni vi sono altri metodi tomografici che vengono classificati nel seguente modo:

1. tecniche non-distruttive che usano altre informazioni oltre ai dati delle semplici proiezioni;
2. tecniche distruttive.

Un esempio di metodo tomografico che genera immagini 3D usando un segnale più complesso della semplice proiezione è la diffrazione tri-dimensionale dei raggi-x (3DXRD). Questa tecnica ha lo scopo di caratterizzare velocemente e non-

Tomografia

distruttivamente gli elementi individuali presenti all'interno di campioni della dimensione di alcuni millimetri o centimetri. La 3DXRD si basa su due principi: l'uso di raggi-x duri altamente penetranti prodotti da sorgenti sincrotroniche e l'applicazione degli algoritmi di ricostruzione tomografica per l'analisi di dati di diffrazione. In casi favorevoli, è possibile determinare simultaneamente per un centinaio di elementi, la posizione, la morfologia, la fase e l'orientazione cristallografica.

Nelle tecniche tomografiche distruttive l'immagine del campione si ottiene rimuovendo step dopo step parti del campione.

Negli esperimenti presentati in questa sede sono state usate soltanto tecniche tomografiche che usano le semplici proiezioni. In particolare è stata usata la tomografia neutronica di assorbimento (NT) con geometria del fascio incidente "parallel-beam" e la tomografia a raggi X di assorbimento (XT) con geometria del fascio incidente "cone-beam".

1.2 Interazione radiazione-materia

Ogni tipo di radiazione presa in considerazione (raggi X, neutroni, elettroni, etc.) presenta due fondamentali aspetti: quello corpuscolare e quello ondulatorio. Il dualismo particella-onda della meccanica quantistica implica che non è possibile spiegare tutti i fenomeni adottando solo uno dei due punti di vista, ma che entrambi gli aspetti devono essere presi in considerazione.

Le particelle in movimento hanno una massa a riposo, un momento meccanico \vec{p} e una energia cinetica E. La relazione di De Broglie assegna una lunghezza d'onda λ a tali particelle:

$$\lambda = 2 \cdot \pi \cdot \hbar / \vec{p} ;$$

viceversa, ad un'onda elettromagnetica avente lunghezza d'onda λ corrisponde una particella avente energia e momento

$$E = 2 \cdot \pi \cdot \hbar \cdot c / \lambda, \quad |\vec{p}| = E / c .$$

Le onde e le particelle viaggiando possono cambiare la loro direzione quando interagiscono con la materia. Nel caso di onde si parla di diffrazione oppure rifrazione, mentre per le particelle si usa comunemente la parola "diffusione".

Questi fenomeni a loro volta sono ulteriormente caratterizzati dai termini come elastico/anelastico e coerente/incoerente, e altri attributi.

I termini elastico e anelastico sono riferiti all'energia delle particelle coinvolte nel processo di diffusione. Il termine elastico indica che l'energia cinetica totale delle particelle rimane costante durante il processo di diffusione; in caso contrario si usa il termine anelastico.

I termini coerenti e incoerenti si riferiscono all'aspetto ondulatorio delle particelle. Il fenomeno di diffusione avviene coerentemente se c'è una relazione fra l'onda prima e dopo la diffusione, oppure se un'onda coerente rimane tale anche dopo la diffusione; in caso contrario si parla di diffusione incoerente.

Quando la radiazione interagisce con la materia si verificano due fenomeni: l'assorbimento e la diffusione. Quest'ultima a sua volta può essere elastica-coerente, elastica-incoerente, anelastica-coerente e anelastica-incoerente.

Per descrivere le interazioni tra diversi tipi di radiazione e la materia è utile riprendere brevemente alcuni concetti sulla teoria della diffusione.

Consideriamo la diffusione a bersaglio singolo (figura 1.2.1); supponiamo di avere un fascio di particelle non interagenti, descritte da un'onda piana con vettore d'onda $\vec{k} = \vec{p}/\hbar$, che interagiscono con un singolo target (atomi, nuclei, etc.) caratterizzato da un potenziale di interazione $\vec{V}(\vec{r}) = V(r)$.

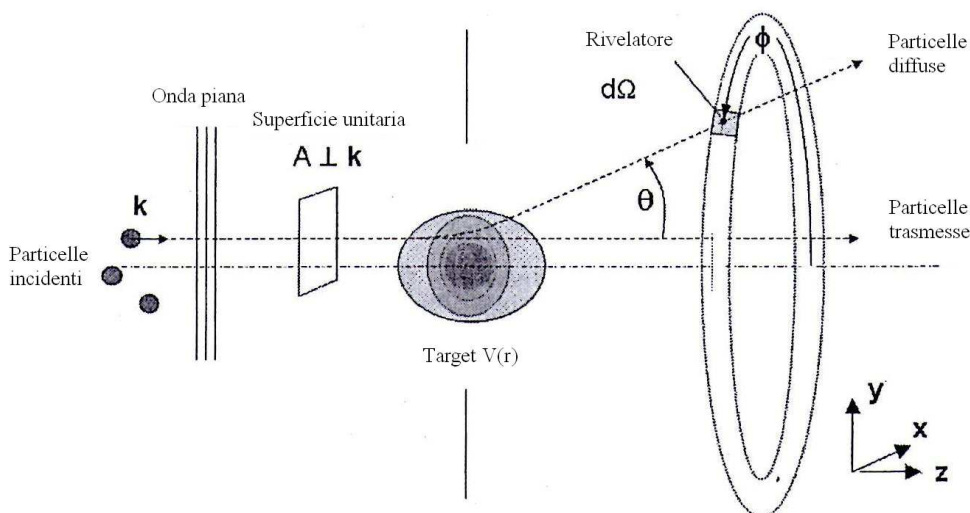


Figura 1.2.1 Diffusione ad un singolo target.

Prendiamo in considerazione soltanto la diffusione elastica ed usiamo il centro di massa come riferimento, in modo che il problema della diffusione possa essere espresso mediante le coordinate relative delle particelle.

Tomografia

Il flusso del fascio incidente J è dato dal numero di particelle N che attraversano l'unità di superficie A nell'unità di tempo t .

$$j = \frac{N}{At} \quad m^{-2}s^{-1}.$$

Il numero di particelle n che colpiscono il rivelatore nell'unità di tempo, in una posizione esterna al fascio incidente, cioè in un'area definita dall'angolo solido $d\Omega$ la cui direzione è definita mediante gli angoli (θ, ϕ) sarà allora:

$$n = j \sigma_{diff}(\theta, \phi) d\Omega,$$

dove la quantità $\sigma_{diff}(\theta, \phi)$ è la sezione d'urto differenziale di diffusione elastica (m^2). La sezione d'urto di diffusione elastica è la seguente:

$$\sigma_{diff} = \frac{d\sigma_s}{d\Omega},$$

dove:

$$\sigma_s = \int \sigma_{diff}(\theta, \phi) d\Omega.$$

Il potenziale di diffusione può essere descritto in termini di un'onda piana incidente ($\Psi_0 \propto \exp(ikz)$) in parte trasmessa senza nessuna interazione, ed in parte trasformata in onda sferica diffusa

$$\Psi_s \propto f_k(\theta, \phi) \frac{\exp(i\vec{k}\vec{r})}{r},$$

dove: $k = \frac{\sqrt{2\mu E}}{\hbar}$, f è l'ampiezza di diffusione; μ è la massa ridotta della particella diffusa ed E è l'energia riferita al centro di massa del sistema. Ne consegue che:

$$\sigma_{diff}(\theta, \phi) = |f(\theta, \phi)|^2.$$

In molti casi il potenziale ha una simmetria sferica, cioè $\vec{V}(\vec{r}) = V(r)$. In questi casi la diffusione è assialmente simmetrica e sia $f(\theta)$ che $\sigma_s(\theta)$ sono indipendenti dell'angolo azimutale ϕ . Inoltre, il momento angolare ℓ della particella incidente è una costante di moto e le onde entranti e uscenti si possono scomporre in onde

parziali ϕ_l ; è quindi possibile descrivere in modo completo l'azione del potenziale $V(r)$, mediante un set di valori di shift di fase δ_l reali e k -dipendenti. Ne consegue che la sezione d'urto di diffusione elastica totale, che dipende esplicitamente da k e quindi dall'energia, si può scrivere nel seguente modo:

$$\sigma_s = \frac{4\pi}{k^2} \sum_{l=0}^{\infty} (2l+1) \sin^2 \delta_l$$

Per potenziali a corto raggio e/o energie molto basse, f_k risulta indipendente da θ e la diffusione è isotropica. Nel caso dei neutroni ne consegue che la σ_s assume la forma $\sigma_s = 4 \cdot \pi \cdot b^2$ dove b è la lunghezza di scattering e misura la forza di interazione fra i neutroni e i centri di diffusione, cioè i nuclei, quindi

$$b = -\lim_{k \rightarrow 0} f_k.$$

Un altro fenomeno molto importante è l'assorbimento. In questo caso, ovviamente, le particelle incidenti non sono registrate dal rivelatore. L'onda assorbita può essere scritta come prodotto dell'onda diffusa per un fattore $(1 - |\exp 2i\delta_l|) < 1$; ciò comporta per lo shift di fase, una parte immaginaria. La sezione d'urto di diffusione è quindi formata da due contributi: la diffusione elastica σ_s e l'assorbimento σ_{abs} . La loro somma è la sezione d'urto totale σ_{tot} .

$$\sigma_s = \frac{\pi}{k^2} \sum_{l=0}^{\infty} (2l+1) |1 - e^{2i\delta_l}|^2 \quad (1.2.1)$$

$$\sigma_{abs} = \frac{\pi}{k^2} \sum_{l=0}^{\infty} (2l+1) (1 - |e^{2i\delta_l}|^2) \quad (1.2.2)$$

$$\sigma_{tot} = \sigma_s + \sigma_{abs}. \quad (1.2.3)$$

Il teorema ottico della teoria della diffusione definisce una importante relazione:

$$\sigma_{tot} = \frac{4\pi}{k} \text{Im } f_k(0).$$

Quindi, la parte immaginaria dell'ampiezza di diffusione elastica nella direzioni in avanti determina la sezione d'urto totale includendo tutti gli eventi.

Tomografia

La sezione d'urto di assorbimento data nell'equazione 1.2.2 dà le informazioni che occorrono per quantificare l'assorbimento di un fascio da parte di un campione poliatomico.

Se N_v è il numero di atomi per unità di volume, il coefficiente di attenuazione lineare μ_{abs} è definito come:

$$\mu_{abs} = N_v \sigma_{abs} \quad m^{-1}. \quad (1.2.4)$$

Generalmente chi usa come sonda i neutroni esprime il coefficiente di attenuazione lineare μ , in unità c.g.s.

$$\mu[cm^{-1}] = 0,6022 \times \frac{\rho[g/cm^3]}{A[g/mol]} \times \sigma[barn].$$

Quando un fascio ben collimato incide su un campione omogeneo di spessore d , l'intensità del fascio diminuisce e ciò è dovuto sia all'assorbimento che alla diffusione (figura 1.2.2); è quindi possibile scrivere il coefficiente di attenuazione μ come la somma di due contributi, e il rapporto tra l'intensità del fascio uscente (I) e quella del fascio incidente (I_0) in termini della legge di attenuazione di Beer-Lambert:

$$\mu = N_v (\sigma_{abs} + \sigma_s) = N_v \sigma_{tot} \quad (1.2.5)$$

$$\frac{I}{I_0} = \exp(-\mu \cdot d) \quad (1.2.6)$$

Sé il fascio non è collimato allora al rivelatore giungeranno fasci diffusi che provengono da altre zone rispetto alla traiettoria del fascio incidente e quindi si ha un incremento dell'intensità (figura 1.2.3).

Il coefficiente di attenuazione μ è funzione dell'elemento preso in considerazione, dell'energia del fascio incidente e dello stato di aggregazione. È possibile eliminare la dipendenza di μ dallo stato di aggregazione usando il coefficiente di attenuazione di massa μ_m definito come il rapporto tra μ e la densità del campione ρ ($\mu_m = \mu/\rho$).

È possibile quindi riscrivere l'equazione 1.2.6 nel seguente modo:

$$\frac{I}{I_0} = \exp(-\mu_m \cdot d_m)$$

dove con d_m intendiamo lo spessore di massa $d_m = \rho \cdot d$.

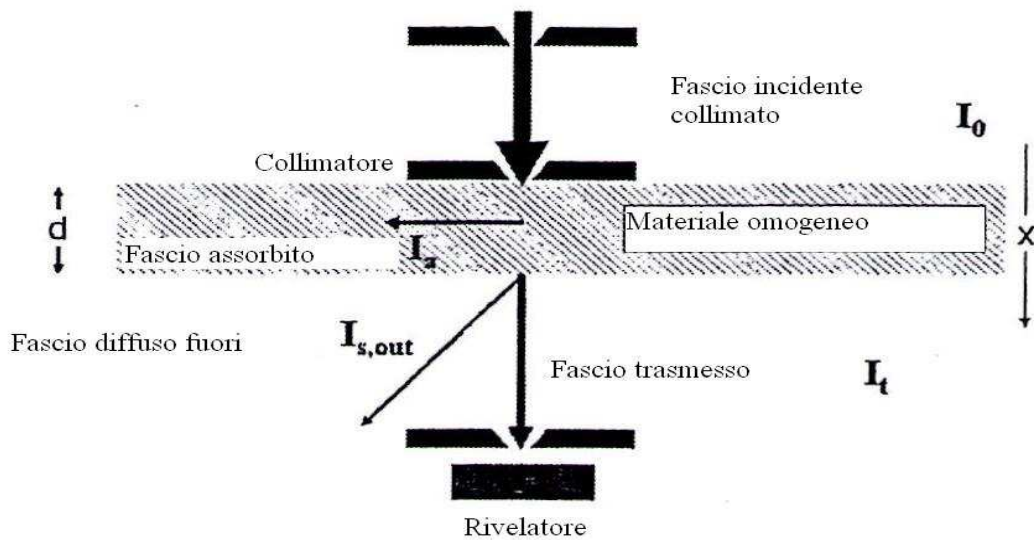


Figura 1.2.2 Attenuazione di un fascio ben collimato da parte di un materiale omogeneo.

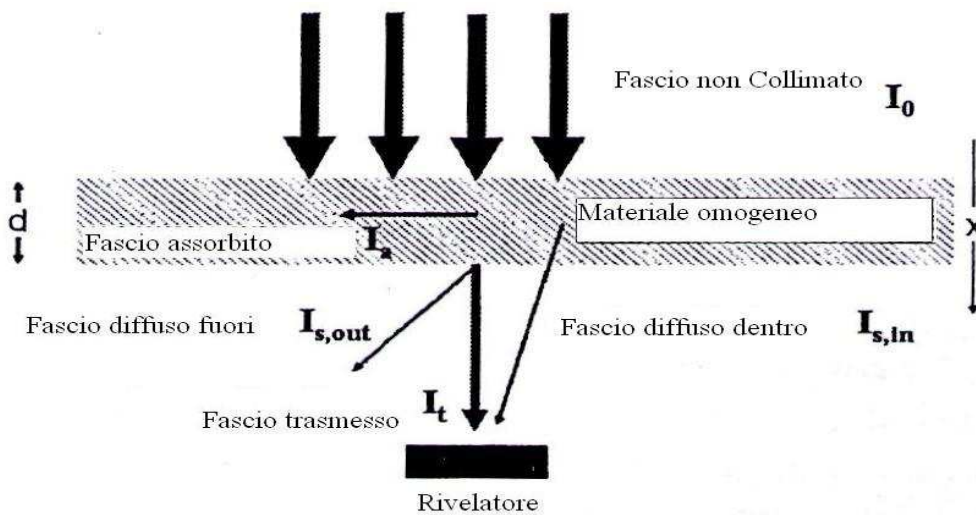


Figura 1.2.3 Attenuazione di un fascio non collimato da parte di un materiale omogeneo.

Quando un campione è costituito da differenti elementi con differenti coefficienti di

Tomografia

attenuazione μ_α , il coefficiente di attenuazione di massa effettivo della miscela sarà una funzione dei coefficienti di attenuazione di ogni singolo elemento, cioè approssimativamente:

$$\overline{\left(\frac{\mu}{\rho}\right)} = \sum_{\alpha} x_{\alpha} \left(\frac{\mu_{\alpha}}{\rho_{\alpha}}\right)$$

dove x_{α} è la percentuale in peso del componente α nella miscela.

1.3 Alcuni concetti matematici per la ricostruzione tomografica.

L'obiettivo delle tecniche di ricostruzione delle immagini è di ottenere la funzione di distribuzione spaziale $f(x,y)$, di una generica sezione del campione a partire dalle sue proiezioni $g(s,\theta)$.

Nel nostro caso la funzione $f(x,y)$ è la funzione di distribuzione spaziale dei coefficienti di attenuazione μ e $g(s,\theta)$ è il logaritmo naturale del rapporto tra l'intensità del fascio uscente I e quella del fascio entrante I_0 . La proiezione $g(s,\theta)$ è legata ai coefficienti di attenuazione μ mediante la seguente relazione:

$$g(s, \theta) = \ln\left(\frac{I}{I_0}\right) = d \sum_{i=1}^n \mu_i$$

dove d indica lo spessore del campione.

Le proiezioni $g(s,\theta)$ possono essere immaginate matematicamente come integrali di linea delle funzioni $f(x,y)$ rappresentanti la sezione. Quindi la proiezione di f lungo la linea verticale $x=x_0$ è definita come:

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x_0, y) dy$$

Più in generale, prendendo in considerazione le equazioni che collegano le coordinate rotazionali (s,u) a quelle cartesiane (x,y) (figura 1.3.1);

$$\begin{cases} s = x \cos \theta + y \sin \theta \\ u = -x \sin \theta + y \cos \theta \end{cases} \quad \begin{cases} x = s \cos \theta + u \sin \theta \\ y = s \sin \theta + u \cos \theta \end{cases}$$

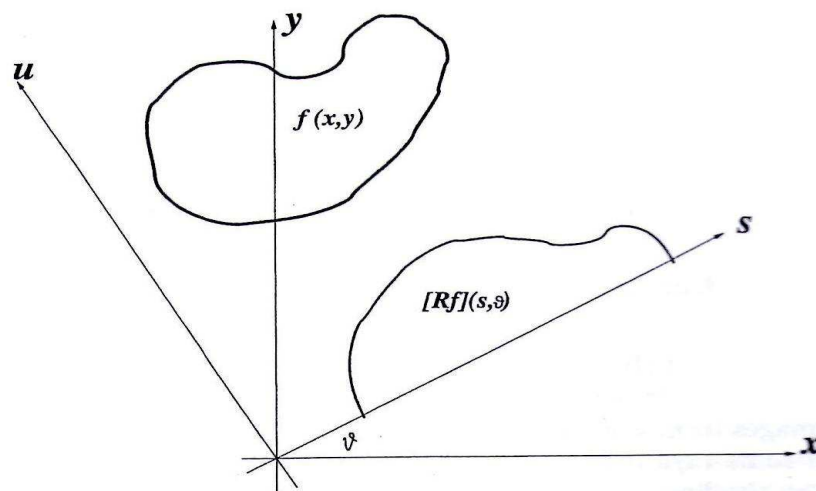


figura 1.3.1 Funzione f e la sua proiezione ad un angolo θ .

possiamo definire la proiezione di f lungo la direzione θ ($\theta \in [0, \pi)$) nel seguente modo:

$$[R_f](s, \theta) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x, y) du = \int_{-\infty}^{+\infty} f(s \cos \theta - u \sin \theta, s \sin \theta + u \cos \theta) du \quad (1.3.1)$$

La proiezione di f lungo la direzione θ è la trasformata di Radon della funzione f .

J. Radon è stato il primo a studiare questo tipo di trasformate. L'operatore R trasforma quindi una funzione dal dominio spaziale (x, y) in una funzione del dominio (s, θ) ed a ciascun punto in questo spazio corrisponde una retta nel primo (figura 1.3.1). Tale mappatura corrisponde ad una proiezione monodimensionale della f secondo la direzione θ . Fissato un punto nel dominio (x, y) il luogo dei punti che lo rappresentano nella spazio (s, θ) secondo l'operatore R è una senoide; la trasformata di Radon di una immagine avrà pertanto un caratteristico andamento sinusoidale; per tale motivo spesso ci si riferisce all'insieme delle proiezioni con l'appellativo di Sinogramma.

Supponiamo adesso di avere le proiezioni di f per tutte le direzioni, cioè che $[R_f](s, \theta)$ sia disponibile per tutti gli $-\infty < s < \infty$ e $\theta \in [0, \pi)$. Lo scopo della ricostruzione tomografica è determinare la funzione $f(x, y)$ dalle proiezioni R_f , cioè

Tomografia

trovare la trasformata inversa di Radon R^{-1} ; in termini matematici ciò può essere espresso nel seguente modo: data una funzione $g(s,\theta)$, trovare una funzione $f(x,y)$ tale che:

$$[R_f](s,\theta) = g(s,\theta) \quad \text{per tutti i valori di}$$
$$-\infty < s < \infty$$
$$\theta \in [0,\pi)$$

Se applichiamo la trasformata di retro-proiezione B alle proiezioni $g(s,\theta)$ non otteniamo la funzione $f(x,y)$, cioè la trasformata di retro-proiezione non è l'inverso della trasformata di Radon ($BR_f \neq f \neq R^{-1}g$). la trasformata di retro-proiezione è definita nel seguente modo:

$$[Bg](x,y) = \int_0^\pi g(x \cos \theta + y \sin \theta, \theta) d\theta = \hat{f}(x,y) \quad (1.3.2)$$

Quindi la retro-proiezione non produce una buona ricostruzione, poiché, l'intensità di una data proiezione è applicata a tutti i punti lungo il raggio che l'ha prodotta; quindi anche i punti esterni all'oggetto originario forniscono un contributo. Questa problematica rimane tanto più evidente quanto più sono presenti nell'oggetto zone con grandi differenze di coefficiente di attenuazione, o sono presenti oggetti altamente localizzati. Gli artefatti che si generano durante la retro-proiezione vengono detti a stella; aumentando il numero di proiezioni utilizzate nella ricostruzione, gli artefatti a stella tendono ad essere sempre più mascherati; rimane in ogni modo un annebbiamento di fondo nella ricostruzione. Tale annebbiamento è dovuto al fatto che la funzione $\hat{f}(x,y)$, che si ottiene applicando l'operatore di retro-proiezione alle proiezioni, è la convoluzione fra la funzione reale $f(x,y)$ e una funzione di risposta impulsiva del tipo $1/r$ cioè:

$$\hat{f}(x,y) = f(x,y) \otimes \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2}}$$

Quindi per eliminare il suddetto annebbiamento e ripristinare l'immagine originale occorre applicare un filtro bidimensionale che compensi esattamente l'offuscamento. È possibile realizzare un filtro bidimensionale tramite filtri monodimensionali in quanto, la trasformata di Radon della convoluzione

bidimensionale di due funzioni è uguale alla convoluzione monodimensionale delle loro trasformate di Radon. Tale affermazione è una conseguenza del teorema delle proiezioni che dice che la trasformata di Fourier mono-dimensionale rispetto ad s della proiezione $g(s,\theta)$ è uguale alla trasformata di Fourier bi-dimensionale di $F(x,y)$.

Di seguito introduciamo alcuni concetti matematici basilari che ci permettono di ricavare la trasformata inversa di Radon.

- La trasformata di Fourier mono-dimensionale F_s è:

$$[F_s g](S, \theta) = \int_{-\infty}^{+\infty} g(s, \theta) e^{-2i\pi s S} ds = \int_{-\infty}^{+\infty} [Rf](s, \theta) e^{-2i\pi s S} ds \quad (1.3.3)$$

- La trasformata inversa di Fourier mono-dimensionale F_s^{-1} è:

$$[F_s^{-1} g](S, \theta) = \int_{-\infty}^{+\infty} g(s, \theta) e^{2i\pi s S} dS = \int_{-\infty}^{+\infty} [Rf](s, \theta) e^{2i\pi(x \cos \theta + y \sin \theta) S} dS \quad (1.3.4)$$

- La trasformata di Fourier bi-dimensionale F_2 è:

$$[F_2 f](X, Y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x, y) e^{-2i\pi(xX + yY)} dx dy \quad (1.3.5)$$

- La trasformata inversa di Fourier bi-dimensionale F_2^{-1} è:

$$[F_2^{-1} f](x, y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(X, Y) e^{2i\pi(xX + yY)} dXdY \quad (1.3.6)$$

tale trasformata in coordinate polari viene espressa nel seguente modo:

$$[F_2^{-1} f](x, y) = \int_0^{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} f(S \cos \theta, S \sin \theta) e^{2i\pi(x \cos \theta + y \sin \theta) S} |S| dS d\theta$$

- La convoluzione (mono-dimensionale) di due funzioni $g_1(s,\theta)$ e $g_2(s,\theta)$ è definita come:

Tomografia

$$[g_1 \otimes g_2](s, \theta) = \int_{-\infty}^{+\infty} g_1(\sigma, \theta) g_2(s - \sigma, \theta) d\sigma$$

- Il teorema della convoluzione dice che:

$$[g_1 \otimes g_2] = F_s g_1 \bullet F_s g_2$$

$$F_s^{-1}[g_1 \bullet g_2] = F_s^{-1} g_1 \otimes F_s^{-1} g_2$$

- il teorema delle proiezioni (chiamato anche teorema delle sezioni di Fourier) collega la trasformata di Radon e quella di Fourier (figura 1.3.2):

$$[F_s R_f](S, \theta) = [F_2 f](S \cos \theta, S \sin \theta) \quad (1.3.7)$$

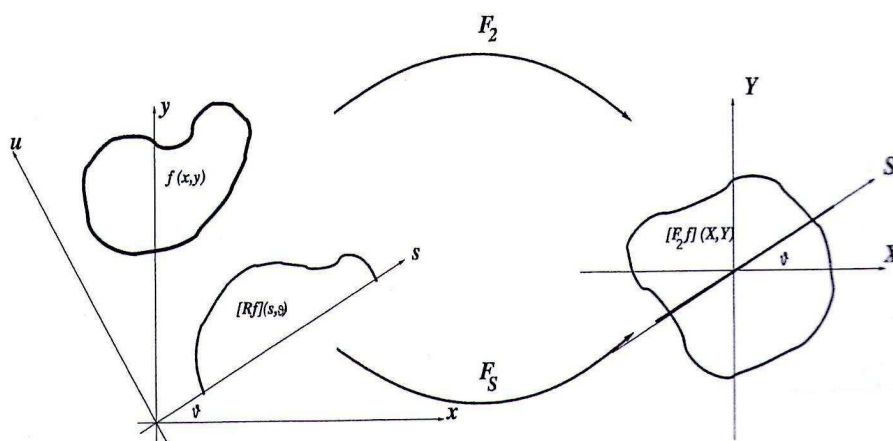


figura 1.3.2 Illustrazione del teorema delle proiezioni.

Questo può essere facilmente dimostrato nel seguente modo:

$$\begin{aligned} [F_s R_f](S, \theta) &= \int_{-\infty}^{+\infty} [Rf](s, \theta) e^{-2i\pi s S} ds \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(s \cos \theta - u \sin \theta, s \sin \theta + u \cos \theta) du e^{-2i\pi s S} ds \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x, y) e^{-2i\pi(x \cos \theta + y \sin \theta) S} dx dy = [F_2 f](S \cos \theta, S \sin \theta) \end{aligned}$$

La funzione f la possiamo ricavare nel seguente modo:

$$f(x, y) = [F_2^{-1} F_2 f](x, y) \quad (1.3.8)$$

In coordinate polari può essere scritta nel seguente modo:

$$\begin{aligned}
 f(x, y) &= \int_0^{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} [F_2 f](S \cos \theta, S \sin \theta) e^{2i\pi(x \cos \theta + y \sin \theta)S} |S| dS d\theta \\
 &= \int_0^{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} [F_s R_f](S, \theta) |S| e^{2i\pi(x \cos \theta + y \sin \theta)S} dS d\theta \\
 &= \int_0^{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} [F_s R_f](S, \theta) abs(S, \theta) e^{2i\pi(x \cos \theta + y \sin \theta)S} dS d\theta \\
 &= \int_0^{\pi} F_s^{-1} [[F_s R_f] \bullet abs](S, \theta) d\theta \\
 &= \int_0^{\pi} F_s^{-1} [[F_s R_f] \bullet abs](x \cos \theta + y \sin \theta, \theta) d\theta \\
 &= B[F_s^{-1} [F_s R_f \bullet abs]](x, y) \\
 &= B(F_s^{-1} abs \otimes F_s^{-1} F_s R_f) = B(F_s^{-1} abs \otimes R_f) = R^{-1} g \quad (1.3.9)
 \end{aligned}$$

A tale espressione $B(F_s^{-1} abs \otimes R_f)$ viene dato il nome di retroproiezione filtrata (FBP) ed è il metodo che più frequentemente viene usato per le ricostruzioni tomografiche (Ramachandran and Lakshminarayanan, 1971).

1.3.1 Algoritmi di ricostruzione

All'atto pratico dovendo implementare gli algoritmi in forma numerica, ed essendo l'insieme delle proiezioni finito, si deve introdurre una discretizzazione del problema che ponga in relazione l'insieme dei dati noti con un insieme finito di parametri incogniti che definiranno i valori della $f(x, y)$ per alcuni punti della sezione. Si otterrà, quindi, un'immagine della sezione ricostruita, in cui ad ogni singola unità di volume è assegnato un valore numerico dipendente dall'attenuazione della radiazione riscontrata in essa. La correlazione tra i dati di proiezione, determinati sperimentalmente, ed i valori incogniti dei coefficienti d'attenuazione per i voxel, produce un sistema d'equazioni, la cui soluzione rappresenta la risoluzione del problema ricostruttivo.

Tomografia

Gli algoritmi per la ricostruzione d'immagine possono essere classificati in due categorie principali: i metodi analitici e quelli algebrici. Nei primi si parte dalla formulazione del problema in termini continui e, raggiunta una formula di inversione che fornisce la $f(x,y)$, si passa alla discretizzazione per l'implementazione numerica. Nei secondi, invece, si tenta la risoluzione numerica, tramite approccio iterativo, del citato sistema d'equazioni.

I metodi analitici sono basati sull'utilizzo di formule esatte per la soluzione del problema ricostruttivo. Un algoritmo molto utilizzato che appartiene a questa classe, cioè ai metodi analitici, è l'algoritmo di retro-proiezione filtrata (FBP).

L'algoritmo di retro-proiezione filtrata può essere implementato in due step:

- nel primo step viene calcolata la convoluzione per tutti i valori $\theta \in [0, \pi)$ (cioè viene effettuato un filtraggio mono-dimensionale su ciascuna proiezione);

$$g'(s, \theta) = [F_s^{-1} abs \otimes R_f](s, \theta) \quad (1.3.10)$$

- nel secondo step viene effettuata la retro-proiezione di $g'(s, \theta)$

$$f(x, y) = [B g'](x, y) \quad (1.3.11)$$

Poiché nella realtà si può avere soltanto un numero limitato di proiezioni, occorre che l'algoritmo di retro-proiezione filtrata sia scritto in forma discreta; per fare ciò supponiamo che i dati di proiezione disponibili siano costituiti da N proiezioni lungo M linee, rispettivamente in posizioni $\theta = n\Delta\theta$ ed $S = m\Delta s$. Più precisamente, la proiezione $g = Rf$ di f è stata campionata come

$$g_n = g(s_m, \theta_n) = g(m\Delta s, n\Delta\theta) \quad \begin{array}{l} m = -(M-1)/2, \dots, (M-1)/2 \\ n = 0, 1, \dots, N-1 \end{array}$$

Dove $\Delta s > 0$ indica la distanza di campionamento di s e $\Delta\theta = \pi/N$. A questo punto le funzioni g' e f si approssimano usando la versione discreta delle operazioni descritte nelle equazioni 1.3.10 e in quella 1.3.11.

La convoluzione indicata nella equazione 1.3.10 può essere scritta mediante la convoluzione discreta di due vettori $h(m)$ e $g_n(m)$ dove h è una approssimazione discreta di $F_s^{-1} abs$, quindi:

$$g'_n(m\Delta s) = \sum_{i=(M-1)/2}^{(M-1)/2} h(m-i)g_n(i) \quad (1.3.12)$$

Per $m=-(M-1)/2, -(M-1)/2+1, \dots, (M-1)/2$ diversi filtri discreti h possono essere applicati. Per esempio Shepp e Logan (1974) propongono:

$$\left\{ \begin{array}{ll} \frac{1}{4\Delta s} & \text{Se } m=0 \\ 0 & \text{Se } m \text{ è pari e diverso da zero} \\ \frac{-1}{\pi^2 m^2 \Delta s} & \text{Negli altri casi} \end{array} \right.$$

L'operatore di retro-proiezione filtrata dato nell'equazione 1.3.11 può essere scritto in versione discetta nel seguente modo:

$$[Bg'](x, y) \approx \frac{\pi}{N} \sum_{n=0}^{N-1} g'_n(x \cos(n\frac{\pi}{N}) + y \sin(n\frac{\pi}{N})) \quad (1.3.13)$$

Occorre notare che l'equazione 1.3.12 fornisce i valori di g'_n solamente in punti discreti di $\{m\Delta s\}$, ma che per l'implementazione numerica dell'equazione 1.3.13 occorrono valori nei punti $\{x \cos(n\pi/N) + y \sin(n\pi/N)\}$; e quindi è necessaria un'interpolazione. Nella maggior parte dei casi, l'interpolazione lineare fornisce risultati soddisfacenti.

Un'altro metodo analitico è metodo di *Fourier*. Tale algoritmo deriva direttamente dal teorema della proiezione, e consiste nel riempire lo spazio della trasformata di Fourier bidimensionale con la trasformata monodimensionale delle proiezioni e quindi nell'applicare la trasformata inversa di Fourier bidimensionale (Herman 1980).

Tale algoritmo si può implementare in tre fasi; nella prima fase si calcolano le trasformate di Fourier monodimensionali delle proiezioni; successivamente si passano i dati dalle coordinate polari alle cartesiane interpolando i valori ottenuti ed infine si effettua l'antitrasformata di Fourier bidimensionale. Quindi nella implementazione del metodo di Fourier, la trasformata di Fourier monodimensionale veloce (FFT) si usa per stimare, dai dati di proiezione, la F_2f (cioè la trasformata di Fourier bidimensionale di f) in un numero di punti egualmente spazati su un numero finito di linee che attraversano l'origine; poi mediante

Tomografia

interpolazione, i valori di F_2f sono stimati su una griglia quadrata regolare, dopo di che è possibile applicare la trasformata inversa bidimensionale di Fourier. Un problema di questo metodo è che se si usa una semplice interpolazione, allora la qualità di ricostruzione è molto inferiore rispetto alla retroproiezione filtrata FBP.

I *metodi numerici* sono tecniche iterative che utilizzano sistemi di equazioni in forma matriciale; il termine iterativo deriva dal fatto che la soluzione viene ottenuta partendo da un'immagine approssimata e modificando ad ogni passo i voxel, sino ad ottenere un accordo soddisfacente con i dati.

La procedura di ricostruzione, in linea di principio, segue la seguente logica: viene scelto un set di intensità, usualmente costante; quindi le proiezioni vengono calcolate dall'immagine ricostruita (stima) e confrontate con quelle sperimentali (misura); i voxel dell'immagine vengono allora corretti, applicando questo procedimento a tutti gli elementi di volume dell'immagine e l'iterazione è completa. La procedura viene quindi ripetuta finché l'errore non sia contenuto entro i limiti stabiliti.

In base alla sequenza con cui sono eseguite le fasi ricostruttive di un algoritmo iterativo si distinguono tre tipi di tecniche: ILST, SIRT ed ART.

Nella tecnica ILST (Iterative Least-Squares Technique) tutte le proiezioni sono calcolate all'inizio dell'iterazione, e le correzioni sono applicate a tutte le celle. Tale metodo non converge ma tende ad oscillare attorno alla soluzione corretta. Nella tecnica SIRT (Simultaneous Iterative Reconstruction Technique), invece, in ciascuna iterazione ogni punto viene corretto per tutti i raggi che lo attraversano, e le correzioni sono incorporate ed utilizzate nei calcoli successivi al fine di accelerare la convergenza. Infine nella tecnica ART (Algebraic Reconstruction Technique) in ciascuna iterazione le correzioni relative ad ogni proiezione sono applicate appena calcolate. Quest'ultima sequenza è la più efficiente in quanto la convergenza dell'algoritmo viene accelerata senza aumentare eccessivamente la complessità computazionale.

Le tecniche iterative forniscono, in genere, ricostruzioni più accurate ma di contro prevedono una maggiore complessità computazionale, nonché una maggiore difficoltà d'implementazione. Il loro uso è in ogni modo registrato con una frequenza sempre maggiore in sostituzione delle tecniche analitiche, grazie alla potenza di calcolo degli attuali calcolatori.

1.4 Tomografia Neutronica

1.4.1 Introduzione

Il primo esperimento di radiografia neutronica è stato effettuato nel 1935 da parte di Kallman e Kuhn in Germania. La qualità delle immagini ottenute era abbastanza bassa rispetto agli standard di oggi e ciò era dovuto soprattutto alla bassa intensità e alla geometria del fascio neutronico disponibile in quei tempi (*Kuhn E. 1937*). Data la complessità del set-up sperimentale e i tempi di esposizione richiesti troppo lunghi non è stato possibile lo sviluppo della tecnica.

Con l'introduzione dei reattori nucleari l'intensità delle sorgenti neutroniche disponibili per scopi sperimentali aumentò di molti ordini di grandezza aiutando a dimostrare le potenzialità delle radiografie neutroniche. Il primo uso di neutroni da reattori nucleari, per produrre radiografie è stato riportato da Thewlis nel 1956 (*Thewlis J. 1956*). La tecnica per diversi anni si è sviluppata lentamente mentre oggi vede un rapido sviluppo grazie al rapido sviluppo delle tecnologie informatiche e quindi delle ricostruzioni delle immagini digitali. Possiamo concludere dicendo che benché la storia sulla radiografia neutronica sia iniziata circa 70 anni or sono (*Berger H 1964; Maier-Leibnitz H 1963; Strobl M. et al 2009*), soltanto negli ultimi 10 anni la tomografia neutronica ha cominciata ad affermarsi come potenziale tecnica non distruttiva.

1.4.2 Proprietà dei neutroni e interazione con la materia

I neutroni sono particelle subatomiche con massa $1,67 \cdot 10^{-27}$ Kg cioè 1.008 u.m.a, privi di carica elettrica, con spin $\frac{1}{2}$ e un momento magnetico μ_n di $-1,913 \mu_N$ cioè $6,0311 \cdot 10^{-5}$ meV/Oersted. Il decadimento di un neutrone libero è $n \rightarrow p + e + \nu_e$ dove **p** è il protone, **e** l'elettrone e **ν_e** l'anti-neutrino, con un tempo di vita di circa 15 minuti. Tale tempo di vita media è abbastanza lungo da permettere l'uso del fascio neutronico come sonda per l'investigazione dei materiali. I neutroni grazie alle loro proprietà interagiscono con la materia in due modi: o mediante forze nucleari o mediante interazioni magnetiche. Nel primo caso le interazioni sono a corto raggio, dell'ordine del diametro nucleare ($1 \cdot 10^{-14}$) m; mentre le interazioni con i momenti magnetici dell'atomo bersaglio avvengono a grandi distanze. Inoltre, dato che le interazioni di tipo nucleare sono interazioni a corto raggio, i neutroni possono attraversare grandi spessori di materiali senza subire una attenuazione

Tomografia

sostanziale.

I neutroni quando interagiscono con i nuclei possono essere: assorbiti, dando origine a reazioni che inducono alla emissione di neutroni secondari, protoni, particelle α , fotoni oppure prodotti di fissione; o diffusi coerentemente, incoerentemente, elasticamente o anelasticamente (Figura 1.4.1).

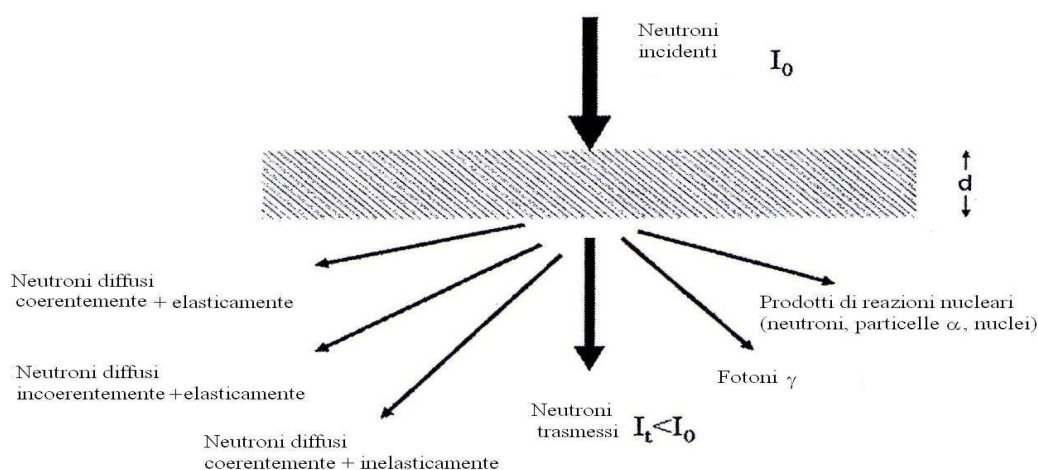


Figura 1.4.1 Interazione dei neutroni con la materia.

I coefficienti di attenuazione m che si determinano negli esperimenti di tomografia neutronica sono legati sia ai processi di assorbimento che a quelli di diffusione. Inoltre il contributo di ogni singolo processo (cioè assorbimento, diffusione elastica coerente, diffusione elastica incoerente, diffusione anelastica coerente, diffusione anelastica incoerente), dipende dalle condizioni sperimentali oltre che dal materiale presso in considerazione.

I neutroni mostrano tre importanti vantaggi:

- * è facile rilevare atomi leggeri, come l'idrogeno, in presenza di quelli pesanti;
- * elementi adiacenti nella tavola periodica hanno generalmente differenti sezioni d'urto e quindi possono essere distinti;
- * isotopi dello stesso elemento possono essere distinti perché hanno sezioni d'urto differenti.

Grazie alle loro caratteristiche i neutroni possono essere considerati sonde non distruttive.

I neutroni vengono classificati in funzione della loro energia come riportato nella seguente tabella:

Tabella 1.4.1 Classificaone dei neutroni in funzione dell'energia.

NEUTRONI	ENERGIA (meV)	TEMPERATURA (K)	LUNGHEZZA D'ONDA (Å)
FREDDI	0.0-10	1-200	30-3
TERMICI	10-100	120-1000	3-1
CALDI	100-500	1000-6000	1-0.4
EPI-TERMICI	> 500	> 6000	< 0.4

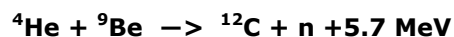
1.4.3 Produzione dei neutroni

I neutroni possono essere prodotti attraverso differenti processi:

- foto-produzione (reazioni nucleare γ, n)
- decadimento radioattivo (reazioni nucleare α, n)
- fusione nucleare
- fissione nucleare
- spallazione (reazioni nucleari p, n)

Nella foto-produzione i neutroni sono prodotti quando l'energia dei fotoni incidenti è più alta dell'energia di soglia della reazione $\gamma \rightarrow n$. Questa energia soglia dipende dal numero atomico (Z) dell'atomo bersaglio, l'intervallo da 7-8 MeV per materiali con Z alto (W, Pb, Fe) da 16-18 MeV per elementi leggeri (C, O).

Le sorgenti neutroniche (α, n) si ottengono inglobando forti emettitori di particelle α (^4He), come polonio o radio, in materiali leggeri come litio, berillio, boro e fluoro. Una reazione particolarmente utile è:



dove l'energia cinetica rilasciata è su tutti i prodotti di reazione. E' possibile miscelare berillio con polveri di polonio o radio e ottenere una sorgente neutronica radiante isotropica. La velocità di produzione, comunque, è molto bassa, tipicamente dell'ordine di $1 \cdot 10^7$ n/s per un campione di 1 g (*Dobrzynski and Blinowshi, 1994*).

La fusione nucleare consiste nell'unione di due nuclei leggeri in un nucleo più

Tomografia

pesante e quando questo avviene il nucleo risultante ha troppi neutroni per essere stabile ed i neutroni in eccesso sono espulsi con notevole energia. Due delle reazioni di fusione più diffuse per la produzione di neutroni sono quelle che vedono l'utilizzo di ioni deuterio e ioni trizio (figura 1.4.2 a e figura 1.4.2 b).

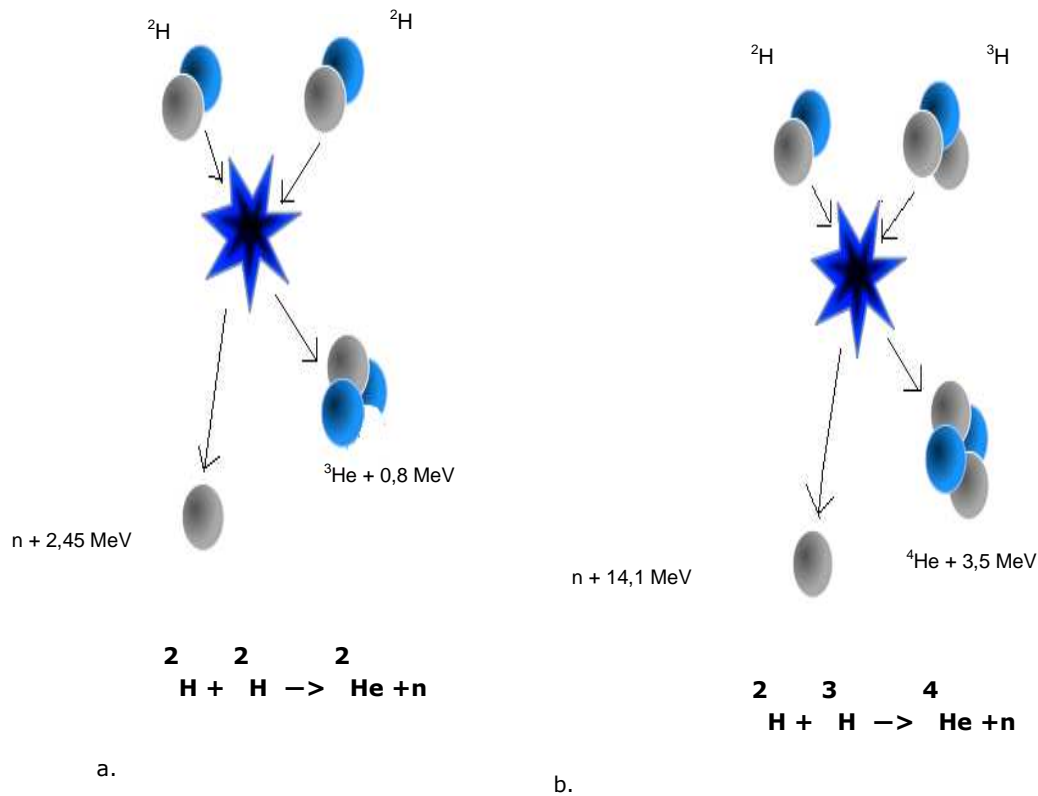
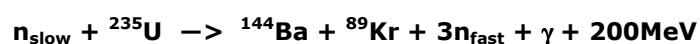


Figura 1.4.2 **a.** Reazione fusione nucleare D-D — **b.** Reazione fusione nucleare D-T.

La produzione dei neutroni attraverso la fissione nucleare avviene all'interno di reattori che impiegano per lo più U^{235} . La fissione del carburante nucleare avviene quando i nuclei target sono colpiti da neutroni lenti. Il processo si basa sulla cattura del neutrone da parte del nucleo target (^{235}U), ciò induce ad una deformazione del nucleo il quale si rompe in due frammenti. Alcuni neutroni, 2-3 neutroni per ogni fissione, vengono prodotti (figura 1.4.3). Ad esempio:



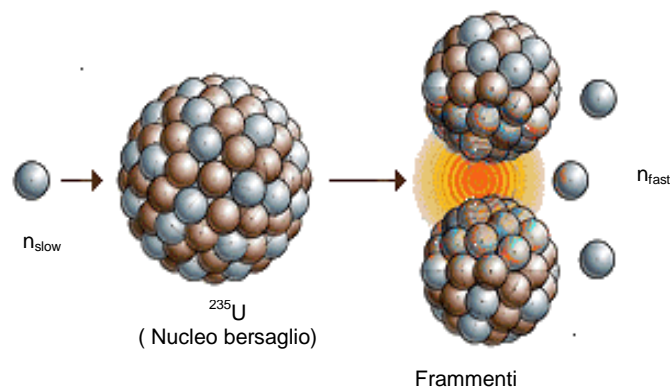


Figura 1.4.3 Processo di fissione nucleare

Un modo per ottenere una reazione a catena è quello di termalizzare i neutroni veloci mediante un moderatore - generalmente acqua pesante o leggera, oppure grafite - e proiettarli in un nuovo ciclo di reazione. La termalizzazione consiste in una serie di fenomeni di diffusione del neutrone veloce che interagisce con i nuclei leggeri del moderatore il quale alla fine conduce ad un aggiustamento dell'energia del neutrone nell'intervallo di temperatura del moderatore. I reattori di ricerca producono sopra $5 \cdot 10^{18}$ neutroni al secondo (*Carlisle 2003*), con un flusso nel cuore del reattore sopra a $2 \cdot 10^{15}$ n/(cm² s).

I neutroni dal cuore del reattore vengono diretti alla postazione di misura mediante tubi. Il fascio neutronico estratto contiene uno spettro di energie che può essere detto "policromatico". Il processo di moderazione da neutroni con energia nell'intervallo corrispondente alla temperatura del moderatore, ma lo spettro non è Maxwellian poiché l'adsorbimento dipende dall'energia e i neutroni lenti vengono rimossi preferibilmente.

Nel processo di spallazione i neutroni vengono prodotti mediante il bombardamento di nuclei di atomi pesanti (come piombo, tungsteno, tantalio etc) con protoni ad alta energia (Figura 1.4.4).

Il fascio protonico usato è generalmente pulsato a una velocità di ripetizione di alcune decine di Hz e i corrispondenti neutroni pulsati quindi hanno una struttura temporale simile. Ogni protone può produrre più di 30 neutroni.

I neutroni prodotti da questo processo hanno energia che si va da pochi MeV a parecchie centinaia di MeV. L'energia di questi neutroni può essere diminuita usando dei moderatori.

Tomografia

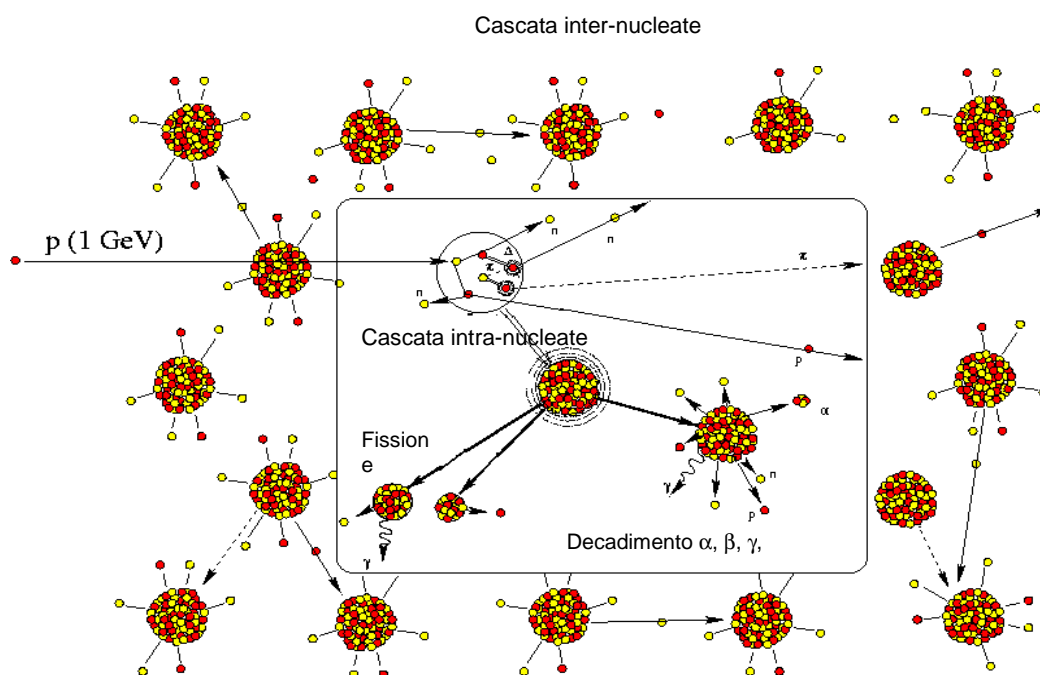


Figura 1.4.4 Processo di spallazione

Spettri dei neutroni "moderati" che vengono usati negli esperimenti sono abbastanza diversi se essi sono prodotti da una sorgente di spallazione o da un reattore nucleare. Infatti il fascio di spallazione ha una maggiore percentuale di neutroni con elevata energia rispetto a quello di un reattore nucleare. Inoltre un'altra sostanziale differenza è che il fascio neutronico generato in un reattore è continuo mentre quello di una sorgente di spallazione arriva in modo pulsato.

1.4 .4 Dettagli sulla Tomografia Neutronica

1.4.4.1 Caratteristiche del fascio e della sorgente neutronica

Una strumentazione di tomografia neutronica che sia capace di acquisire un cospicuo numero di proiezioni in un tempo ragionevole ha bisogno di un fascio lineare con alta intensità, il che significa che i reattori e le sorgenti di spallazione sono indispensabili per tali tecniche.

I reattori nucleari producono un flusso neutronico continuo e stabile che permette di realizzare misure di tomografia con un lungo tempo di esposizione. Invece le sorgenti di spallazione generano fasci pulsati che sono molto utili per esperimenti veloci e per fare radiografie ad energia ben precise. In entrambi i casi i tempi di

esposizione tipici sono dell'ordine di pochi secondi per un flusso medio e di frazioni di secondi per un flusso alto.

Un importante caratteristica di una qualsiasi sorgente neutronica è l'energia media del fascio neutronico utilizzato per l'esperimento. Per ogni applicazione bisogna decidere quale sia l'energia neutronica più adatta e se il fascio neutronico deve essere policromatico o monocromatico. Per decidere ciò ci sono due criteri molto importanti: il primo è valutare il coefficiente di attenuazione del campione per una particolare energia neutronica ed il secondo è valutare l'efficacia del processo di rivelazione. L'attenuazione del fascio neutronico è una proprietà specifica di ogni materiale ed è direttamente connessa con la sezione d'urto di interazione neutronica totale. Per esempio l'idrogeno, il boro e il ferro hanno sezioni d'urto totali molto alte a bassi valori di energia del fascio neutronico, mentre hanno sezioni d'urto totali molto basse a alti valori di energia del fascio neutronico (figura 1.4.5).

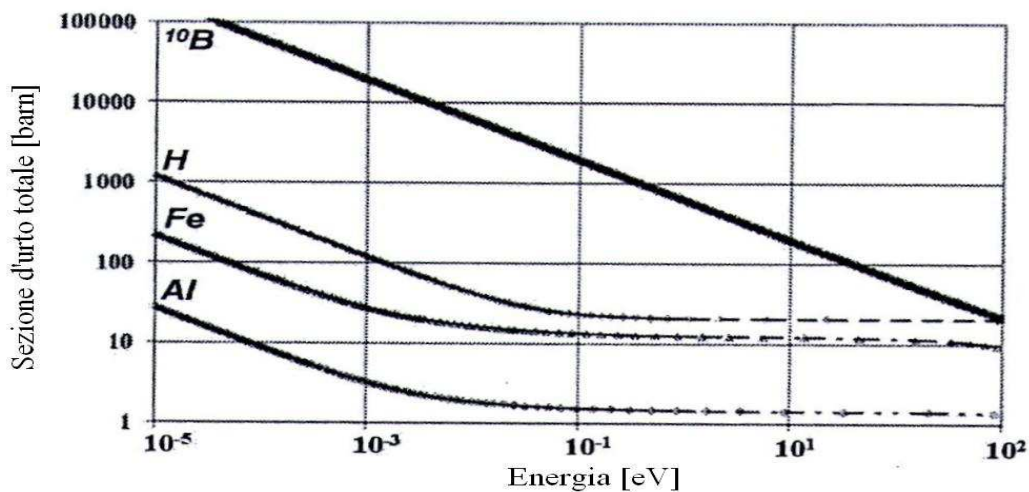


Figura 1.4.5 Dipendenza dell'energia dalla sezione d'urto totale.

La geometria del fascio nella tomografia neutronica dovrebbe essere il più vicino possibile ad una configurazione di una sorgente puntiforme, in modo da ottenere proiezioni ben definite. Un modo per soddisfare questa richiesta è che la dimensione della sorgente **D** sia piccola in confronto alla distanza **L** tra la sorgente e il campione. La configurazione ideale di una sorgente a punti è data dal valore chiamato rapporto L/D:

$$L/D = 1/d$$

che determina la dimensione massima della macchia **d** nell'immagine a una data

Tomografia

distanza l tra il campione e il detector (figura 1.4.6). Poiché la qualità dell'immagine della radiografia dipende dal rapporto L/D (Schillinger 2001), si ha che grandi valori di L/D forniscono immagini con una maggiore risoluzione. La maggior parte degli strumenti di radiografia neutronica possiedono una apertura D variabile; ciò permette di effettuare esperimenti con differenti valori di L/D . Ogni incremento del diametro D conduce ad un aumento del flusso neutronico, mentre si ha una riduzione della risoluzione dell'immagine e viceversa. Quindi in funzione delle esigenze sperimentali, alto flusso o alta risoluzione, uno può scegliere il rapporto L/D ottimale.

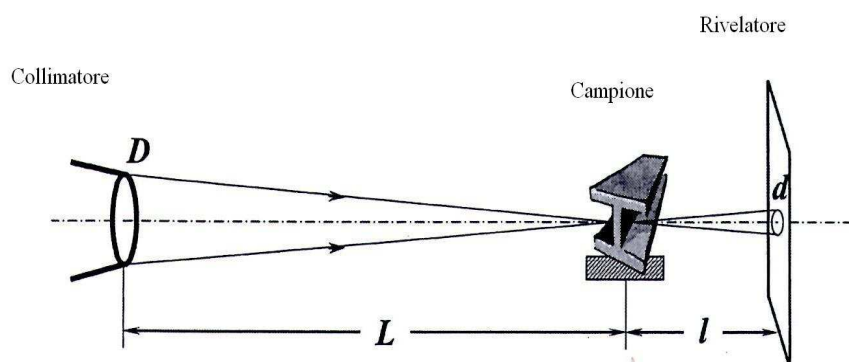


Figura 1.4.6 schema rappresentativo di un esperimento di tomografia neutronica che prevede una geometria a foro di spillo.

Esistono strumenti di radiografia che usano i neutroni freddi ottenuti da "cold sources" poste alla fine di linee guida e ad una distanza relativamente grande dal cuore del reattore. In ogni caso le linee guida aiutano il trasporto del fascio neutronico a grandi distanze impedendo alte perdite di intensità. Il principio di funzionamento delle linee guida neutroniche si basa sulla riflessione totale dei neutroni da parte delle pareti che costituiscono tali linee guida e che sono ricoperte da materiali aventi un elevato indice di rifrazione (Figura 1.4.7). Un vantaggio delle linee guida neutroniche è l'assenza di radiazioni di fondo ad alte energie.

L'angolo di riflessione totale γ_c per un neutrone con una certa energia è data dalla seguente legge:

$$\gamma_c(\lambda) = (2 \cdot (1 - n(\lambda)))^{1/2}$$

dove $n(\lambda)$ è l'indice di rifrazione dello strato ricoprente le linee guida per un neutrone avente una lunghezza d'onda λ . Generalmente il materiale che ricopre le

guide contiene nickel.

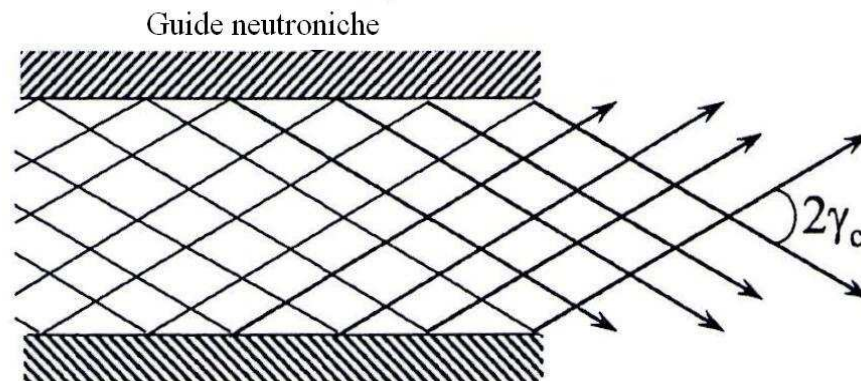


Figura 1.4.7. guide neutroniche caratterizzate da un angolo di riflessione totale γ_c .

Nel caso in cui i neutroni non hanno tutti la stessa lunghezza d'onda le guide neutroniche generano fasci con energia divergente in quanto gli angoli di riflessione sono differenti quindi il rapporto L/D è dato dalla seguente espressione:

$$L/D = 1/\tan(2\gamma_c)$$

il valore tipico di L/D , per guide neutroniche che trasportano neutroni freddi, è di circa 70; tale valore è molto basso se si vuole fare tomografia neutronica ad alta risoluzione. Per migliorare questa scarsa performance uno può combinare l'uso delle guide con una geometria pinhole, applicando un piccolo diaframma alla fine delle guide neutroniche. Lo svantaggio di questa soluzione è la divergenza energetica della composizione spettrale del fascio neutronico uscente, lungo il piano trasversale alla direzione di propagazione del fascio.

Usando la convenzionale geometria pinhole quasi puntiforme si ottiene un valore di L/D molto alto ma l'intensità del fascio decresce rapidamente. Un modo molto più efficiente per incrementare il rapporto L/D è l'applicazione di tecniche che focalizzano il fascio. Un modo efficiente per focalizzare il fascio è l'uso di guide focalizzanti (Kardjilov et al., 2005a). In questo modo il fascio può essere focalizzato all'interno di piccoli spot della dimensione di qualche millimetro; il risultato è una alta divergenza della propagazione del fascio. Inoltre la definizione di una geometria del fascio a cono permette di applicare differenti ingrandimenti dei rapporti e ciò produce ad un incremento della risoluzione spaziale delle immagini generate dalla tomografia neutronica. Tecniche focalizzanti alternative che sono state proposte sono: lenti magnetiche (Shimizu et al., 2000), lenti rifrangenti (Eskildsen et al.,

Tomografia

1998) oppure fibre ottiche (Chen-Mayer et al.,1997; Masschaele et al., 2001), ma non è ancora certo che esse possano essere usate in modo efficiente per generare immagini con i neutroni.

La risoluzione spaziale delle immagini prodotte dalla tomografia neutronica è limitata oltre che dalle caratteristiche del fascio (rapporto L/D, eterogeneità spettrale, intensità del fascio etc,) anche dal rivelatore.

1.4.4.2 Rivelatore

Per la tomografia è richiesto un sistema di rivelazione digitale. In questo modo il rivelatore può rimanere fermo durante la lettura dell'immagine provvedendo a mantenere fisso ed allineato lungo l'asse del fascio sia la posizione del rivelatore che quella del campione.

La rivelazione dei neutroni è una tecnica indiretta che si basa principalmente sulla creazione di trasportatori di carica elettrica liberi. I neutroni possono produrre tali trasportatori o mediante collisione con nuclei o mediante reazioni un cui i neutroni vengono catturati dai nuclei che costituiscono il materiale di rivelazione; ciò induce alla emissione di particelle cariche come le particelle α , le particelle β , i protoni etc. Tali particelle possono essere rilevate con mezzi più convenzionali. Gli elementi più importanti per la rivelazione dei neutroni termici e freddi e che esibiscono una elevata probabilità di cattura dei neutroni sono: ${}^6\text{Li}$, Gd, ${}^{10}\text{B}$ etc.

In un rivelatore generante immagini neutroniche, la quantità di cariche elettriche prodotte mediante reazione nucleare è spesso misurata indirettamente, come, per esempio, negli scintillatori neutronici nei quali le cariche elettriche stimolano l'emissione di luce da parte del solfuro di zinco ZnS (Figura 1.4.8).

I principali requisiti che un rivelatore di tomografia neutronica deve possedere sono i seguenti:

1. il rivelatore dovrebbe produrre un segnale in uscita digitale;
2. il segnale dovrebbe variare linearmente con la quantità di radiazione incidente;
3. l'intervallo dinamico del sistema di generazione dell'immagine dovrebbe essere il più largo possibile;
4. la posizione del rivelatore deve essere fissata in relazione alla posizione del campione;
5. l'area attiva del rivelatore dovrebbe essere più grande di quella di ogni singola proiezione;

6. la sensibilità del sistema di rivelazione nei confronti di alcuni componenti del fascio (neutroni veloci, raggi γ) dovrebbe essere la più bassa possibile;
7. il rumore di fondo deve essere basso e costante durante la misura.
8. Il sistema di rivelazione dovrebbe essere resistente ai neutroni e ai raggi γ .
In caso contrario bisogna attivare una protezione per prevenire il danneggiamento del rivelatore.

Per queste ragioni, alcuni dei sistemi di rivelazione disponibili non sono applicabili alla tomografia neutronica.

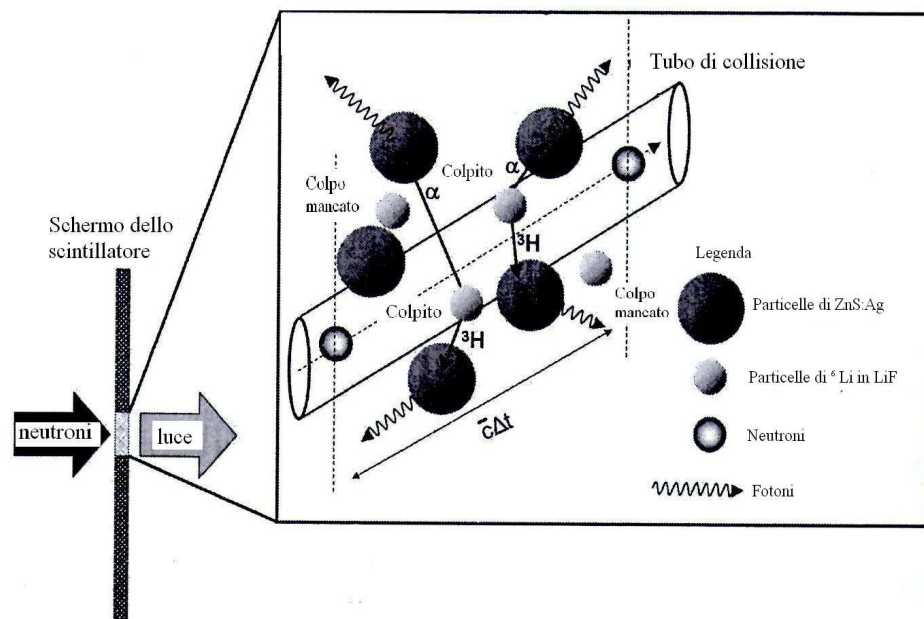


Figura 1.4.8. schema di funzionamento dello scintillatore di neutroni

1.4.4.3 Camere CCD o Panelli Piatti di a-Si

I rivelatori con camera CCD sono frequentemente usati per la tomografia neutronica (Pleinert et al., 1997).

A causa della estrema sensibilità del chip_CCD alla luce ad alta energia, tutti i componenti del sistema di rivelazione sono posti all'interno di una scatola a tenuta di luce (Figura 1.4.9). La camera è localizzata lateralmente rispetto alla direzione del fascio in modo da prevenire il danneggiamento del chip-CCD da parte delle radiazioni; inoltre essa è collegata allo scintillatore per mezzo di specchi o lenti posti a 45°. il numero tipico di pixel in una camera-CCD oggi giorno è tra 1024 e 2080 e la risoluzione ottica è tra 0.03 e 0.2 mm. La sensibilità e la capacità di una

Tomografia

camera-CCD è data della dimensione dei pixel sul chip.

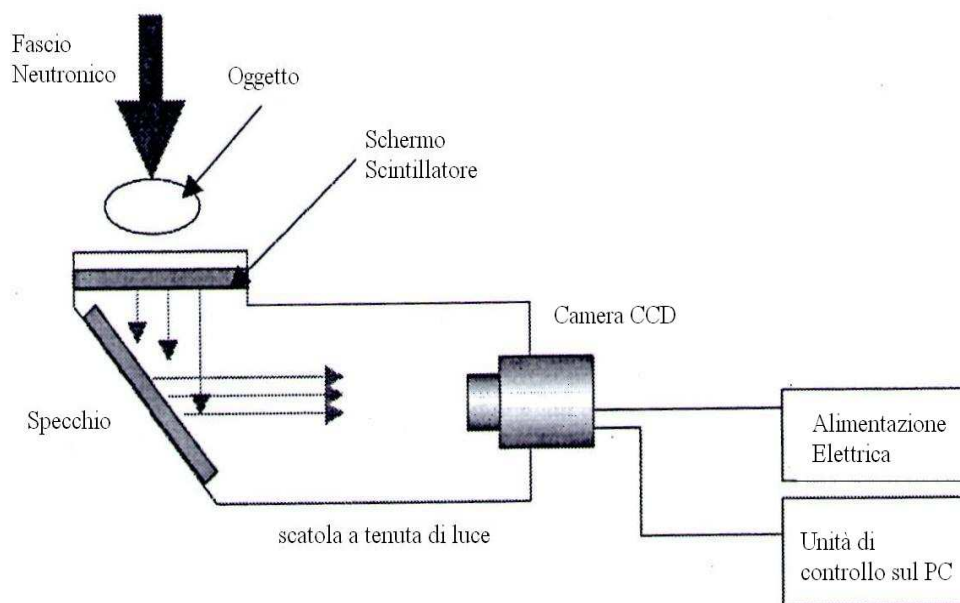


Figura 1.4.9 Sistema di rivelazione dello strumento di NT.

Un sistema di rivelazione alternativo alla camera-CCD sono i pannelli piatti di silicio amorfo (a-Si). Tali pannelli consistono di file di foto-diodi accoppiate con un transistor a film sottile attivo che auto-legge la matrice per pixel, dove lo scintillatore è a vicino contatto con il semiconduttore. Questo tipo di set-up è possibile poiché il silicio amorfo è molto meno sensibile alla esposizione diretta a neutroni veloci e a raggi- γ rispetto alla camera-CCD. La condizione operativa dei pannelli piatti è differente dalle camere-CCD poiché il processo di esposizione - auto-letture - cancellazione è fisso. Quindi, le immagini sono generate in modo continuo, la velocità di formazione è definita in anticipo e le immagini risultanti sono depositate in una memoria intermedia. Alla fine della misura tali immagini sono trasferite nel disco rigido. Quindi i pannelli piatti sono più veloci nell'acquisizione dei dati in confronto ai sistemi CCD e la sequenza completa delle proiezioni può essere ottenuta entro pochi secondi o minuti.

Gli svantaggi delle tecnologie a silicio amorfo sono il breve intervallo dinamico e il piccolo valore del rapporto segnale-rumore in confronto ai sistemi CCD. Entrambi i parametri riducono la qualità dei dati di tomografia ottenuti. Dall'altro lato, il breve tempo di esposizione ha due vantaggi per la tomografia neutronica: i processi di osservazione sono molto veloci e bassi rischi di attivazione durante l'esposizione. Di

seguito riportiamo nella tabella 1.4.2 le differenze dei due sistemi di rivelazione usati nella tomografia neutronica.

Tabella 1.4.2 Confronto tra i due sistemi di rivelazione usati nella tomografia neutronica.

	Unità di misura	Scintillatore più camera-CCD	Scintillatore più pannelli di silicio amorfo
Area attiva	cm ²	da 4x4 a 30x30	da 10x15 a 20x25
Dimensione pixel	mm	da 0,02 a 0,15	0,127
Numero di pixels		da 1024 ² a 2048 ²	~ 1500 ²
Intervallo dinamico	bit	16	12
Rapporto segnale/rumore		120	25
Tempo di esposizione	s	da 2 a 60	0,067
Tempo di auto-lettura	s	2	Durante esposizione
Velocità di formazione delle immagini	fps		da 0,5 a30

Il miglioramento del tempo di risoluzione può essere ottenuto mediante incremento del flusso neutronico attraverso l'uso di sorgenti neutroniche potentissime oppure mediante compressione o focalizzazione del fascio in piccoli spot. Un elevato flusso neutronico è necessario anche per rivelatori con alta risoluzione spaziale; dimensioni piccoli dei pixels implica una riduzione numerica dei neutroni per pixel che può solamente essere compensata con lunghi tempi di esposizione. Notevoli miglioramenti della risoluzione spaziale saranno possibili mediante lo sviluppo di nuove tecniche di rivelazione relative sia ai sistemi di rivelazione ottici che elettronici (Lehmann et al. 2007).

1.4 .4.4 Porta campione

Il porta campione in uno strumento di tomografia neutronica dovrebbe possedere sistemi che permettono la traslazione, l'inclinazione e la rotazione del campione. La gerarchia di tali sistemi è la seguente: il campione è posizionato in un piano di rotazione, l'asse di rotazione è aggiustato mediante un sistema di inclinazione posizionato sotto. Infine, il sistema di traslazione muove entrambe le unità (rotazionale e di inclinazione) fuori dal fascio per registrare le immagini a fascio aperto, che poi vengono usate per la normalizzazione delle proiezioni tomografiche. Il sistema di rotazione è l'unità più importante del porta campione. Permette di acquisire le proiezioni del campione a differenti angoli. Il numero di proiezioni registrate a step angolari uguali dipende dal campo di visione e dalla risoluzione del rivelatore. In pratica, l'intervallo usato generalmente è tra cento e mille proiezioni

Tomografia

su un angolo di 180°.

1.4.4.5 Protezioni

Le protezioni sono una parte significativa della strumentazione di tomografia neutronica. Per ogni sorgente di radiazioni ci sono requisiti legali da rispettare al fine di operare in sicurezza e proteggere il personale dalle radiazioni. Uno strumento di tomografia neutronica è quindi localizzato all'interno di una stanza di misura, costruita con pareti di cemento spesse, e accessibili soltanto attraverso labirinti sicuri e porte di sicurezza. La ragione della grande diffusione delle protezioni è quella di bloccare i neutroni veloci che sono presenti nel fascio. Un modo per fermare i neutroni veloci in modo efficiente è l'uso del cemento con additivi speciali.

Le guide neutroniche sono molto poco curvate; questo ha il vantaggio che i neutroni veloci e i raggi- γ dal reattore non vengono trasportati alla fine delle linee guida, ma escono dalle linee guide e vengono assorbiti. Questo abbassamento significativo delle radiazioni di fondo migliorano il rapporto segnale-rumore.

1.5 Tomografia a raggi X

La tomografia a raggi x si è sviluppata inizialmente in campo medico e successivamente in campo industriale e nei settori come la geologia, la paleontologia, etc.

I sistemi di tomografia computerizzata usati in campo medico si servono di raggi x a bassa energia e di tempi di esposizione brevi, in modo da minimizzare le dosi di raggi x assorbiti dai pazienti. Con l'introduzione della tomografia a raggi x nel campo industriale queste problematiche sono diventate meno importanti; infatti, raggi x ad elevata energia e tempi di esposizione lunghi, nella maggior parte dei casi, possono essere usati. Inoltre i campioni da studiare sono inanimati e quindi è possibile posizionarli in modo preciso ed accurato. Tutto ciò comporta un aumento della risoluzione spaziale nelle immagini prodotte mediante tomografia computerizzata a raggi x.

Le tecniche di tomografia a raggi x possono essere raggruppate in quattro categorie, in base alla risoluzione spaziale e alla dimensione degli oggetti analizzati. Tale classificazione è riportata nella tabella 1.5.1 (Ketcham and Carlson, 2001).

Tabella 1.5.1 classificazione generale della tomografia a raggi X.

Tipo di tomografia a raggi x	Dimensione degli oggetti osservati	Risoluzione spaziale
Convenzionale	m	mm
Alta-risoluzione	dm	100 μm
Ultra-alta-risoluzione	cm	10 μm
microtomografia	mm	μm

Per ottenere la risoluzione spaziale richiesta nella microtomografia a raggi x , è necessario usare come sorgenti di raggi x i Sincrotroni (Coker et al, 1996; Flannery et al, 1987.).

I raggi X possono essere generati in due modi:

- 1) mediante espulsione di elettroni interni dagli atomi che,consequentemente, si vengono a trovare in una situazione di instabilità. Elettroni più esterni di quelli emessi tendono ad occupare il livello vuoto, con conseguente emissione di raggi x;
- 2) mediante accelerazione o decelerazione di particelle cariche libere.

I tubi a raggi x utilizzano entrambi i processi; infatti i raggi x vengono prodotti mediante bombardamento con elettroni di un bersaglio metallico; ciò l'emissione di elettroni dai livelli interni dell'atomo e gli orbitali "vuoti" sono poi occupati dagli elettroni che si trovano negli orbitali più esterni. I tubi a raggi x hanno quindi uno spettro in cui si ha una parte continua che rappresenta i raggi X provenienti dal fenomeno di "bremsstrahlung" la cui estensione dipende dall'energia degli elettroni incidenti e dei picchi relativi all'emissione di radiazioni caratteristici dell'atomo target (Figura 1.5.1). I Sincrotroni usano soltanto il secondo processo, cioè l'accelerazione di particelle cariche libere; il Sincrotrone è un tipo di acceleratore di particelle circolare e ciclico, in cui il campo magnetico (necessario per curvare la traiettoria delle particelle) e il campo elettrico variabile (che accelera le particelle) sono sincronizzati con il fascio delle particelle stesse.

I raggi X sono onde elettromagnetiche, sono cioè caratterizzati da campi elettrici e magnetici oscillanti in piani perpendicolari fra di loro e normali alla direzione di propagazione. Gli elettroni rispondono a questi campi mediante oscillazione con la stessa frequenza e mediante emissione di radiazione che, nel caso di interazione elastica, possiede la stessa lunghezza d'onda e fase della radiazione incidente. La possibilità che l'emissione avvenga anche in direzione diversa da quella della radiazione incidente rende possibile la diffusione.

Tomografia

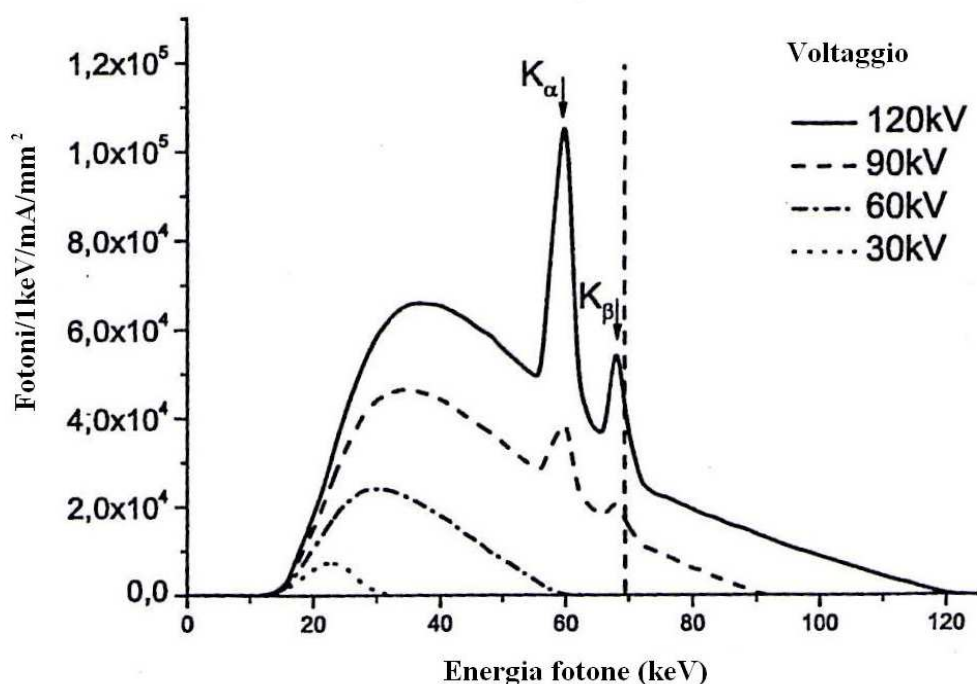


Figura 1.5.1 spettro energetico di un tubo a raggi X con un anodo a tungsteno per 4 differenti voltaggi.

Quando un fascio di raggi X incide su un campione, alcuni fotoni vengono trasmessi, altri diffondono elasticamente ed altri ancora diffondono in modo anelastico (diffusione di Compton); è anche possibile che alcuni vengano assorbiti con conseguente rilascio di nuovi fotoni o elettroni (effetto foto-elettrico). Infine, fotone X con elevata energia (dell'ordine di 5 MeV) possono generare anche una coppia elettrone-positrone o essere assorbito dal nucleo (assorbimento foto-nucleare) con conseguente emissione di neutroni (Figura 1.5.2).

Nella tomografia a raggi x l'energia del fascio utilizzato è generalmente compresa tra 5 e 150 KeV, per cui, trascurando la produzione della coppia elettrone-positrone e l'assorbimento foto-nucleare, possiamo scrivere la sezione d'urto di assorbimento totale σ_{tot} come la somma della sezione d'urto associata all'effetto foto-elettrico σ_{pe} , della sezione d'urto di diffusione elastica σ_{el} e della sezione d'urto di diffusione anelastica σ_{Compt} (eq.1.5.1).

$$\sigma_{tot} = \sigma_{pe} + \sigma_{el} + \sigma_{Compt} \quad (1.5.1)$$

Il valore di tali sezioni d'urto dipende fortemente dall'energia del fotone e dal numero atomico (Jackson and Hawkes, 1981). La dipendenza regolare delle sezioni d'urto dal numero atomico appare anche ovvio dato che i fotoni X interagiscono con gli elettroni.

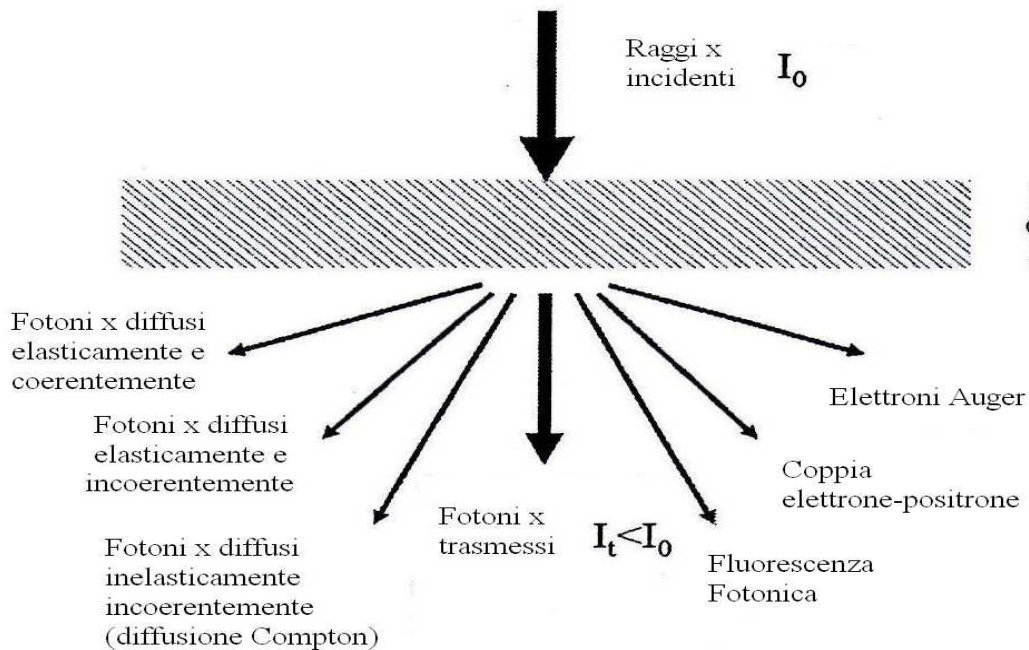


Figura 1.5.2 Interazione dei raggi x con la materia.

Il primo step nella generazione di immagini a raggi x è la preparazione di un fascio adatto.

Le variabili che indicano come effettivamente una sorgente di raggi x è adatta ad un determinato studio sono:

- a) la dimensione degli spot focalizzatori (fenditure);
- b) lo spettro di energia dei raggi X;
- c) la loro intensità.

La dimensione delle fenditure contribuisce a definire la risoluzione spaziale, e lo spettro energetico dei raggi x definisce la penetrabilità; infatti mentre i raggi x soffici sono poco penetrabili, i raggi x duri vengono attenuati poco, producendo così un'immagine con uno scarso contrasto, poiché essi sono meno sensibili al cambiamento di densità e alla composizione del materiale. Infine l'intensità dei raggi x ha effetti diretti sul rapporto segnale-rumore e quindi sulla chiarezza dell'immagine. Flussi fotonici elevati migliorano il rapporto segnale-rumore ma richiedono fenditure di grosse dimensioni. Il fascio ottimizzato, attenuato dal campione, raggiunge infine il rivelatore. I rivelatori usati possono essere divisi in due classi principali:

- a) rivelatori diretti in cui i fotoni X sono direttamente convertiti in un segnale elettrico;

Tomografia

b) rivelatori indiretti in cui i fotoni X sono convertiti in luce visibile, mediante uno scintillatore; successivamente la luce visibile viene convertita in segnale elettrico mediante l'uso di semiconduttori, ad esempio la camera CCD. La scelta dello scintillatore dipende dall'energia dei fotoni e dalla risoluzione che si vuole ottenere. Per esempio un modo per ottenere una risoluzione spaziale inferiore ad 5 μm è l'uso di scintillatori a singolo cristallo.

Bibliografia

- Berger, H., Tylka, J., and Talboy, J., (1964). *Determination of cadmium burnup in reactor control rods by neutron radiography*. Nuclear Science and Engineering, 18, 236.
- Carlisle, C.J. (2003). *The production of neutrons*. In *Neutron Data Booklet*, pp.3.1-1. NIST, Gaithersburg, Maryland.
- Chen-Mayer, H.H., Mildner, D.F.R., Sharov, V.A., Xiao, Q.F., Cheng, Y.T., Lindstrom, R.M., and Paul, R.L. (1997). *A Polycapillary bending and focusing lens for neutrons*. Review of Scientific Instruments, 68, 3744.
- Coker, D.A., Torquato, S., Dunsmuir, J.H. (1996). *Morphology and physical properties of Fontainebleau sandstone via a tomographic analysis*. Journal of Geophysical Research 101 (B8), 17, 497-506.
- Dobrzynski, L. and Blinowski, K. (1994). *Neutrons and Solid State Physics*. Ellis Horwood, New York.
- Eskildsen, M.R., Gammel, P.L., Isaacs, E.D., Detlefs, C., Mortensen, K., and Bishop, D.J. (1998). *Compound refractive optics for the imaging and focusing of low-energy neutrons*. Nature, 391, 563.
- Flannery, B.P., Deckman, H.W., Roberge, W.G., D'Amico, K.L. (1987). *Three-dimensional X-ray microtomography*. Science, 237, 1439-1444.
- Herman, G.T. (1980). *Image Reconstruction from Projections*. The Fundamentals of Computerized Tomography. Academic Press, New York.
- Jackson, D.F. And Hawkes, D.J. (1981). *X-ray attenuation coefficients of elements and mixtures*. Physics Reports, 70, 169.
- Kardjilov, N., Boeni, P., Hilger, A., Strobl, M., and W. Treimer (2005a). *Characterization of a focusing parabolic guide using neutron radiography method*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 542, 248.
- Ketcham R.A. and Carlson W.D. (2001). *Acquisition, optimization and interpretation of X-ray computed tomographic imagery: applications to the geosciences*. Computers & Geosciences, 27, 381-400.
- Kuhn, E. (1937). US Patent 2186 757. <http://www.uspto.gov/patft/>.
- Lehmann, E.H., Frei, G., Kühne, G., and Boillat, P., (2007). *The micro-setup for neutron imaging – a major step forward to improve the spatial resolution*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 576, 389.
- Maier-Leibnitz, H. and Springer, T. (1963). *The use of neutron optical devices on beam-hole experiments*. Nuclear Science and Technology, 17, 217.
- Masschaele, B., Baechler, S., Cauwels, P., Dierick, M., Jolie, J., and Mondelaers, W. (2001). *First results of micro-neutron tomography by use of a focusing neutron lens*. Radiation Physics and Chemistry, 61, 623.
- Pleinert, H., Lehmann, E., and Körner, S. (1997). *Design of the new CCD-camera*

Tomografia

neutron radiography detector. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 399, 382.

Ramachandran and Lakshminarayanan (1971). *Three-dimensional reconstruction from radiographs and electron micrographs: Application of convolution instead of Fourier transforms*. Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA, 68, 2236.

Schillinger, B. (2001). *Estimation and measurement of L/D on a cold and thermal neutron guide*. Nondestructive Testing and Evaluation, 16, 141.

Shepp, L.A. and Logan, B.F. (1974). *The Fourier reconstruction of a head section*. IEEE Transactions on Nuclear Science, 21,21.

Shimizu, H.M., Oku, T., Sato, H., Otani, C., Kato, H., Suda, Y., Nakagawa, H., Kamiyami, T., Kiyonagi, Y., and Wakabayashi, T. (2000). *A magnetic neutron lens*. Physica B, 276-278, 63.

Thewlis, J. (1956). *Neutron radiography*. British Journal of Applied Physics, 7, 345.

Capitolo 2

Materie prime utilizzate dall'uomo nel corso degli anni

2.1 Introduzione

Vi sono periodi storici i cui nomi vengono associati a momenti passati in cui l'uomo utilizzava particolari tipi di materiali; basti pensare:

- ✓ ai periodi paleolitico, mesolitico e neolitico detti anche "ere della pietra";
- ✓ all'età del rame;
- ✓ all'età del bronzo;
- ✓ all'età del ferro.

Il paleolitico, mesolitico e neolitico vengono detti "ere della pietra" poiché dalla analisi dei reperti portati alla luce dagli scavi archeologici si è visto che gli utensili utilizzati in quei periodi erano costituite da pietre lavorate; in particolare il paleolitico è caratterizzato da oggetti in pietra ottenuti mediante scheggiatura, mentre nel neolitico è presente anche la tecnica di levigatura. Inoltre è evidente che a causa dei problemi di conservazione dei materiali organici (ad esempio il legno, il cuoio etc) i manufatti litici, cioè quelli in pietra, sono spesso l'unica testimonianza di queste epoche ad essere sopravvissute fino ai nostri tempi.

Con l'età del rame si ha la nascita della metallurgia; quindi, si ha la fine dei popoli cacciatori-predatori, che vivevano esclusivamente dei prodotti della loro attività venatoria, di pesca e della raccolta dei frutti spontanei del suolo, e l'inizio di popoli agricoltori-produttori-allevatori, che, al contrario, producevano essi stessi quanto necessario per la loro esistenza.

Nell'era del rame, del bronzo e del ferro, si assistette ad un susseguirsi di scambi tra il Mediterraneo e l'Oriente. Questi fenomeni che erano dovuti alla necessità di reperire metalli per costruire utensili di vario tipo e armi, porteranno alla

trasformazione delle prime organizzazioni sociali in vere e proprie civiltà.

Il bronzo viene usato oltre che nell'età del bronzo, anche dopo, da parte di varie civiltà come gli Egizi, Greci, Etruschi, Romani etc. il bronzo viene usato anche nel periodo gotico italiano ma ha massimo impiego nel periodo del rinascimento italiano. Il ferro invece ebbe la sua prima vasta fioritura nell'arte del decoro presso gli Etruschi; apparve in bellissima forma d'arte nel momento aureo dell'arte romanica, per trovare la massima esaltazione nell'arte gotica. Il ferro viene usato anche nel rinascimento e nel barocco anche se di meno rispetto al bronzo. Altri metalli usati sin dell'antichità sono: l'oro e l'argento per costruite monete e gioielli e il piombo. Quest'ultimo è molto usato nell'impero romano per la costruzione di tubature.

Altri materiali molto usati dall'antichità ad oggi, sia nella scultura che in architettura, con funzioni sia strutturali che decorativi, sono i marmi e delle pietre che pur non potendo essere scientificamente classificati come marmi, tuttavia sono passibili di politura e di alto valore decorativo. Tra i marmi più apprezzati nell'antichità, oltre a quello di Carrara e ad altri bianchi statuari, si citano il pavonazzetto antico dell'Asia Minore, il cipollino dell'Eubea, il giallo antico della Tunisia etc.

Un altro materiale molto usato dall'antichità ad oggi, che è oggetto dei miei studi di dottorato, è il legno.

2.2 Il legno

2.2.1 L'importanza del legno dal passato fino ai nostri giorni

Il legno, grazie alle sue proprietà meccaniche e fisiche, al basso peso specifico, alla durata, e alle gradevoli caratteristiche estetiche, è un materiale usato fin dai tempi più antichi, per costruire abitazioni, imbarcazioni, ponti ed utensili di vario tipo. Tutt'oggi esso è molto usato, in particolar modo nei paesi nordici, per esempio nella costruzione di abitazioni civili grazie alle sue proprietà strutturali e di isolante termico, e nei paesi in cui vi sono frequenti terremoti.

Il legno è un materiale di origine vegetale suscettibile ad agenti biodeteriogeni e a parametri ambientali quali umidità, temperatura e pH, tale fatto ha portato, anche nel passato, alla ricerca di metodiche e tecniche idonee a proteggerlo.

Dalle testimonianze scritte di antiche civiltà si deduce che veniva posta molta attenzione sia sulla scelta del legno che sui materiali da utilizzare per aumentarne

Materie prime utilizzate dall'uomo nel corso degli anni

la durabilità nel tempo. Basti pensare ad esempio all'Antico Testamento, dove nella Genesi, si racconta come Noè sia stato istruito da Dio per proteggere la sua arca: "fatti un'arca di legni di cipresso; la dividerai in scompartimenti e la spalmerai di bitume dentro e fuori "; o alla *Naturalis historia* di Plinio il Vecchio il quale cita una quarantina di oli, usati per proteggere il legno.

Nelle antiche civiltà in Birmania, Cina, Egitto, Grecia, Italia i legni venivano preservati usando oli vegetali e animali. I Romani addirittura impregnavano con resine estratte da piante tutte le strutture in legno. Inoltre fino ai secoli XVIII – XIX, i problemi legati al degrado del legno venivano affrontati con metodi empirici e con risultati, in molti casi, non soddisfacenti.

2.2.2 Struttura del legno

La conoscenza della struttura macroscopica e microscopica del legno è di fondamentale importanza, sia per determinare la via attraverso la quale i microorganismi biotici, responsabili del degrado, penetrano nel legno, sia per individuare il percorso seguito dai fluidi usati nel trattamento conservativo. Con struttura macroscopica si intendono tutte le caratteristiche del legno visibili ad occhio nudo o con una lente a piccoli ingrandimenti, mentre con struttura microscopica intendiamo tutti i componenti cellulari che costituiscono il legno (Tsoumis G.1991) e che possono essere visti usando un microscopio ottico o un microscopio elettronico a scansione .

Il legno è un materiale eterogeneo e presenta una struttura articolata dovuto al fatto che esso è formato da cellule diverse, sia per tipo che per forma, e variamente orientate; inoltre, ad un esame macro e microscopico il legno appare poroso mentre risulta fibroso se osservato con maggior dettaglio. La porosità del legno è data dal fatto che la maggior parte delle cellule che lo costituiscono sono morte (cioè prive di citoplasma) con un lume cellulare più o meno ampio.

Dal punto di vista botanico, le specie legnose vengono distinte in legni di conifera e legni di latifoglia. I primi sono conosciuti anche come legni omoxili, poiché la loro massa risulta costituita da una struttura microscopica semplice, omogenea, formata per il 90-95% da cellule filiformi dette tracheidi, e per il 5-10% da cellule radiali. Nella struttura microscopica delle conifere (Figura 2.2.1) sono ben visibili le tracheidi a forma di tanti "tubicini" disposti parallelamente alla direzione dell'asse del tronco. Le tracheidi svolgono nella pianta una duplice funzione: una è quella di dare rigidità e sostegno alla massa legnosa; l'altra è di far circolare i liquidi nutritivi

(la linfa). Poiché detti elementi sono chiusi alle due estremità, il flusso della linfa avviene da una tracheide all'altra tramite aperture o finestre (Giordano G.1981).

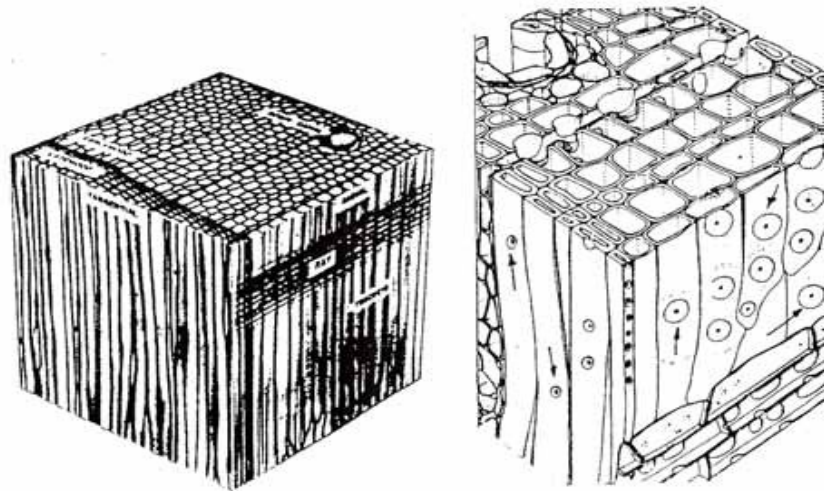


Figura 2.2.1 Struttura microscopica delle conifere

Il legno delle latifoglie invece è conosciuto come legno *eteroxilo*, poiché, a differenza di quello delle conifere è caratterizzato dalla presenza, nella sua struttura microscopica (Figura 2.2.2), di più elementi cellulari di differenti natura e funzione. Fra questi si distinguono le fibre di sostegno, dette fibre *libriformi*; gli elementi di conduzione, detti *vasi* o *trachee*; gli elementi di transizione, detti *fibre tracheidi*, con funzioni miste di sostegno e conduzione e infine gli elementi detti *raggi midollari* con funzione di deposito e di collegamento tra i vari elementi (Giordano G.1981). Tutte le fibre, a loro volta, possiedono una struttura comune, mentre sono differenti per dimensioni (larghezza, lunghezza, volume, etc).

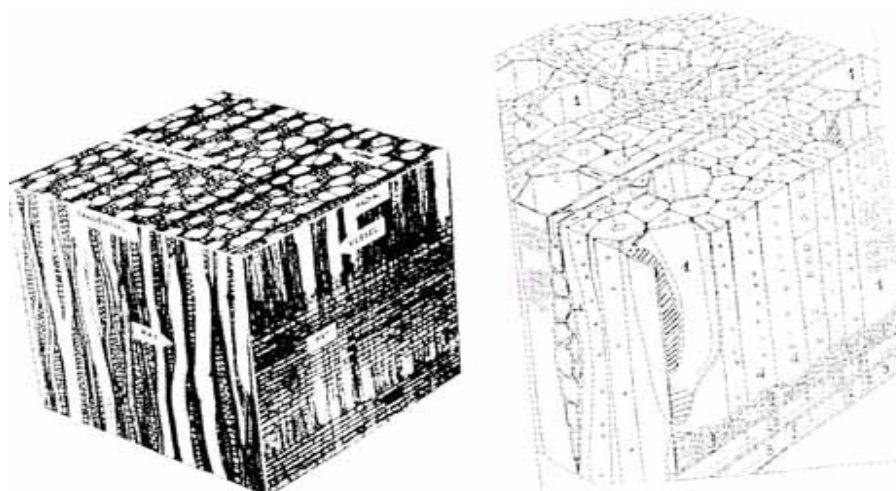


Figura 2.2.2 Struttura microscopica delle latifoglie

Materie prime utilizzate dall'uomo nel corso degli anni

Per quanto riguarda la struttura macroscopica, prendendo come riferimento l'asse di accrescimento primario (altezza) di un fusto e non il secondario (accrescimento in diametro), le caratteristiche macroscopiche del legno variano in funzione del piano lungo il quale il campione viene sezionato ed osservato. A tale proposito si possono considerare tre sezioni principali:

- trasversale,
- longitudinale radiale,
- longitudinale tangenziale.

La *sezione trasversale di un legno si ottiene tagliando il tronco in direzione perpendicolare all'asse di accrescimento primario. Osservando tale sezione si distinguono varie zone che sono: il midollo che è la parte più interna, quella centrale del tronco, che immagazzina le sostanze di riserva; subito dopo si ha una zona, detta cuore o durame, formato da fibre molto corte che hanno solo la funzione di sostegno dell'intero tronco. Negli alberi maturi il durame costituisce la maggior parte del volume del fusto; esso si forma dalla modificazione nel tempo dell'alburno da cui si differenzia per un diverso colore (più scuro) e per la maggior resistenza al degrado da parte di insetti e funghi in quanto si ha l'assenza di amido e la presenza di particolari estrattivi. In questa parte centrale i condotti si riempiono di gomma o resine, o semplicemente aria. Procedendo verso l'esterno, a ridosso del cuore, si trova una zona chiara, detta alburno, che svolge non solo la funzione di supporto dell'intera struttura arborea, ma anche quella di deposito e di trasporto delle sostanze nutritive; tramite i suoi tessuti, favorisce gli scambi idrici tra la parte apicale e le radici della pianta. Procedendo verso la corteccia, dopo l'alburno, si trova un sottile strato di cellule, che prende il nome di cambio con funzioni d'accrescimento della parte legnosa; in effetti, esso ha la caratteristica di produrre cellule legnose nella parte affacciata all'alburno e cellule di corteccia nella parte esterna. A ridosso del cambio infine si trova la corteccia; essa è composta da due strati: uno interno detto floema ed uno esterno, denominato ritidoma. La corteccia svolge una funzione protettiva contro le perdite di umidità e l'attacco di saprofiti e parassiti. Tutti i legni, inoltre posseggono raggi parenchimatici che appaiono sulla superficie della sezione trasversale come delle linee radiali più o meno sottili che si estendono dalla periferica verso il midollo, in alcuni casi sono ben distinguibili ad occhio nudo per il fatto di presentare un colore leggermente diverso rispetto ai tessuti legnosi circostanti.*

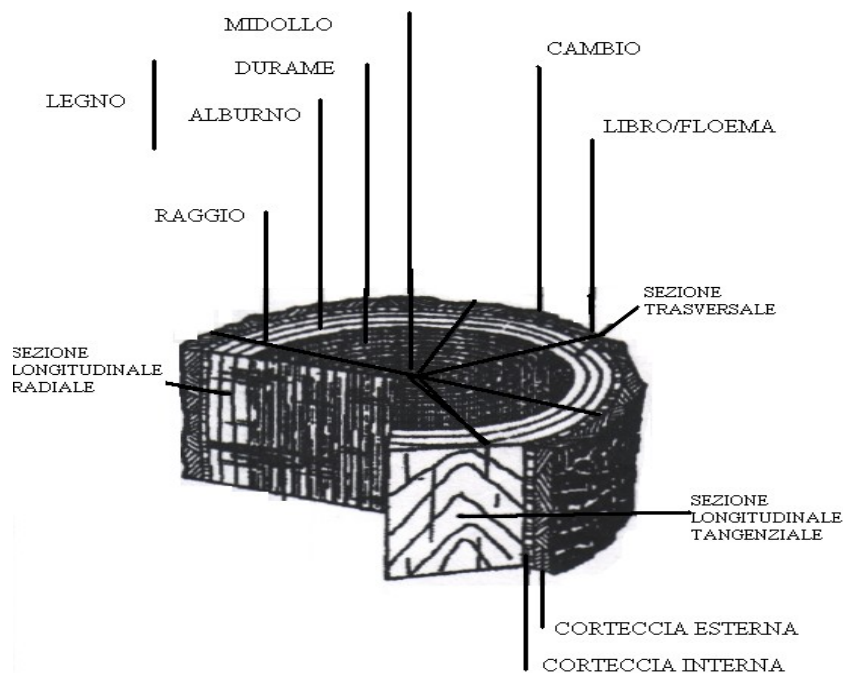


Figura 2.2.3. Principali sezioni di riferimento e relativi aspetti macroscopici dei tessuti legnosi.

È utile ricordare che lo *xilema* o *tessuto legnoso* è la parte vegetale attiva ed è costituito dall'insieme di fibre o cellule allungate, orientate parallelamente all'asse del tronco.

La produzione di tessuti legnosi, generalmente discontinua, si esplica nella formazione di *anelli di accrescimento* successivi e concentrici, detti anche *anelli stagionali*, visibili sulle sezioni trasversali di un fusto, nel cui ambito è spesso possibile distinguere una porzione di *legno primaticcio* ed una di *legno tardivo*, in quanto le condizioni climatiche, l'umidità del suolo, lo stato fisiologico dell'albero sono solitamente molto diversi tra loro all'inizio e nel corso della stagione vegetativa. Infatti, il legno primaticcio è più chiaro, meno denso e si forma all'inizio della ripresa vegetativa; il legno tardivo è più scuro, compatto e si forma nella stagione tardiva.

Nelle conifere, ad esempio, si formano cellule a lume ampio e pareti sottili durante la ripresa dell'attività vegetativa e cellule schiacciate radialmente, con lume ridottissimo e pareti molto spesse verso il termine del periodo vegetativo (*Figura 1.2.4*). Ne consegue che, ad un'osservazione macroscopica, la prima zona appare chiara mentre la seconda assume una colorazione bruna (o in ogni caso più scura), con un contrasto quasi sempre evidente nel passaggio tra un anello di accrescimento e il successivo.

Materie prime utilizzate dall'uomo nel corso degli anni

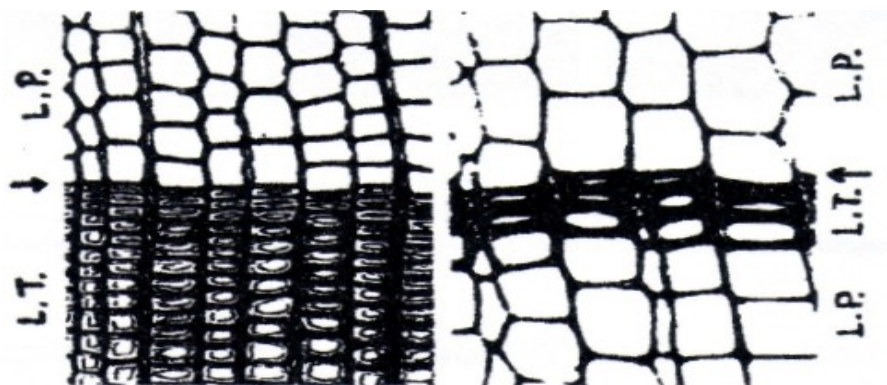


Figura 2.2.4. Sezioni trasversali di legni di conifera in cui appaiono ben evidenti la porzione di legno primaticcio (L.P.) e quella di legno tardivo (L.T.).

Nelle latifoglie si ha invece la formazione o di cellule con lume particolarmente ampio o di un maggiore numero di cellule per unità di superficie trasversale durante la ripresa vegetativa, mentre si ha una diminuzione o del diametro delle cellule o del numero di cellule o di entrambi con il procedere della stagione vegetativa (Figura 1.2.5). Sulla base della distribuzione dei suddetti pori nell'ambito di ciascun anello di accrescimento, le latifoglie vengono classificate in due categorie principali:

- ad anello poroso (come ad esempio Rovere, Castagno e Frassino) caratterizzati da legno primaticcio con pori notevolmente più grandi di quelle del legno tardivo;
- a porosità diffusa (come ad esempio Faggio e Pioppo) caratterizzati, invece, da pori di dimensioni omogenee e più o meno uniformemente distribuiti nell'ambito dell'anello che, pertanto, non presenta differenze sensibili fra legno primaticcio e tardivo.

Ci sono altre specie appartenenti sempre alla famiglia delle latifoglie, come per esempio il Noce, che evidenziano caratteristiche dell'anello intermedie tra i due tipi detti in precedenza. Esse sono note come strutture "ad anello semi-poroso" o "a porosità semi diffusa" e sono spesso caratterizzate da una diminuzione regolare delle dimensioni dei pori nel passaggio dal legno primaticcio a quello tardivo (Core H. A. 1979).

La *sezione longitudinale radiale* si ricava tramite un taglio eseguito longitudinalmente lungo un raggio passante per il midollo. Le varie caratteristiche macroscopiche precedentemente descritte per la sezione trasversale - midollo, durame, alburno, anelli di accrescimento, legno primaticcio e tardivo - in quella

radiale appaiono, generalmente, sotto forma di strisce o bande longitudinali.

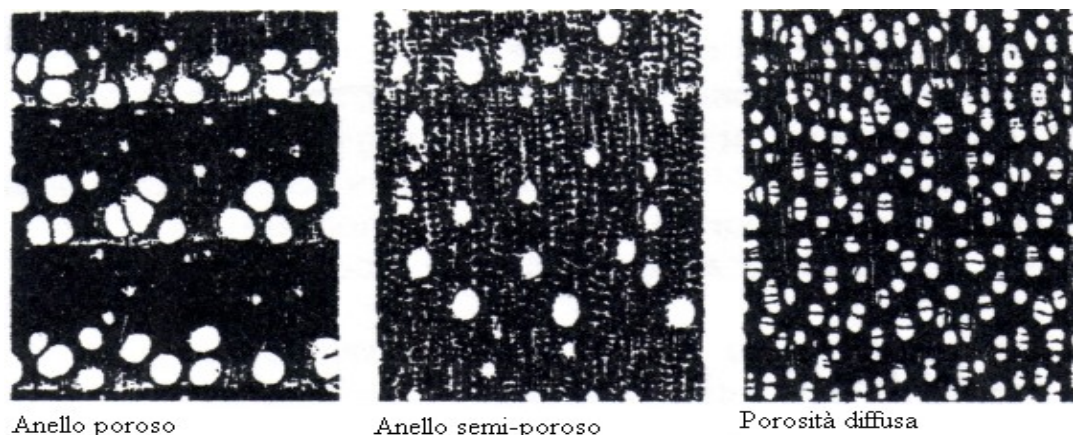


Figura 2.2.5 Possibile distribuzione della porosità nel legno di latifoglie.

Un ulteriore aspetto della superficie del legno si rileva sezionando un campione sempre lungo un piano longitudinale ma tangenziale agli anelli di accrescimento, ovvero con un taglio che non passa per il midollo. Nella su detta *sezione longitudinale tangenziale* quindi il midollo non risulta visibile sulla superficie del pezzo, mentre le altre caratteristiche anatomiche e morfologiche appaiono in maniera diversa da quella rilevabile in una sezione longitudinale radiale. La superficie tangenziale presenta, pertanto, un'apparenza più o meno regolare che dipende dalla rastremazione del fusto e dal contrasto più o meno accentuato tra le porzioni di legno primaticcio e tardivo. Nel caso, ad esempio, del legno di conifere e delle latifoglie ad anello poroso si può evidenziare una successione di strisce longitudinale di diverso colore o compattezza che, a seconda dell'altezza lungo il fusto, assumono la forma di rami di iperbole o di parabola.

I legni sono caratterizzati dalla presenza di *nodi* e *cipollature*: i nodi sono originati nei punti in cui dal fusto si dipartono i rami; essi, essendo differenti per compattezza e per direzione delle fibre, si presentano diversi dal legno che li circonda; inoltre una volta che i rami sono morti essi tendono a staccarsi dal legno circostante; le cipollature invece consistono in una mancanza di continuità tra gli anelli annuali, tale assenza di continuità provoca il distacco della parte interna del fusto e costituisce un grave difetto del legno. Il legno inoltre può presentare, gallerie o cavità provocate da insetti o alterazioni dovute a funghi, in questi casi le caratteristiche meccaniche del legno possono essere compromesse anche in modo grave.

Materie prime utilizzate dall'uomo nel corso degli anni

2.2.3 Composizione chimica del legno

Il legno è un materiale non omogeneo, molto complesso, sia per quanto riguarda la sua struttura botanica e che per quanto riguarda la sua composizione chimica (Lewin M. 1991; Pettersen R. C. 1984). Quest'ultima è caratterizzata dalla presenza di composti ad alto peso molecolare, quali la *cellulosa*, le *emicellulose* e la *lignina* insieme con altri, quali gli *estrattivi* di natura *organica* ed *inorganica* (figura 2.2.6).

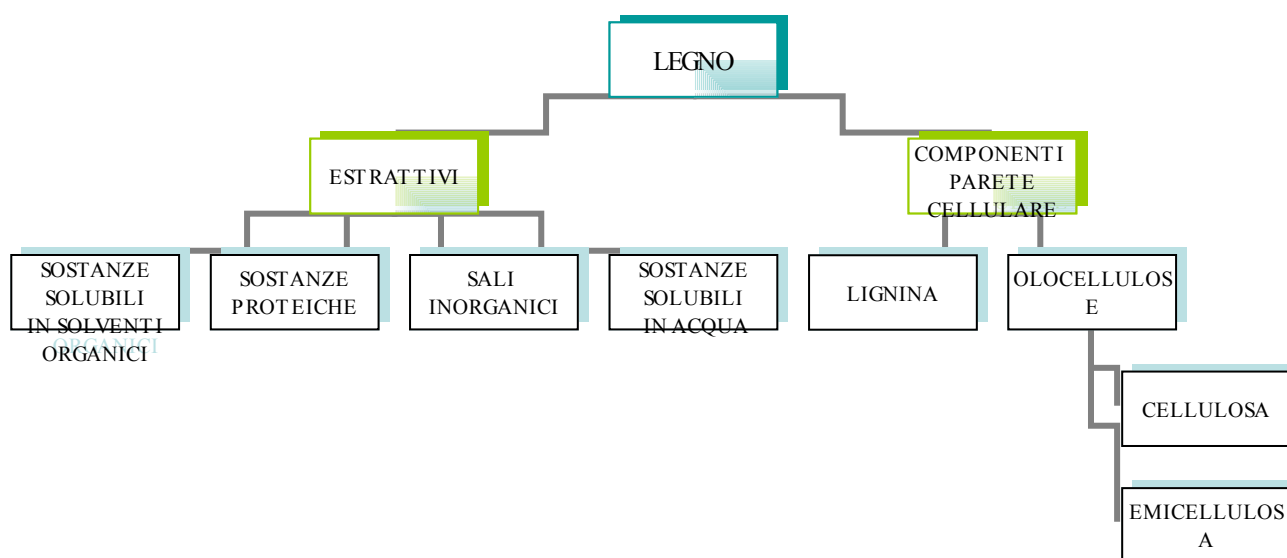


Figura 2.2.6 Visione schematica della composizione chimica dei legni.

La cellulosa, l'emicellulosa e la lignina vengono anche chiamate "componenti strutturali" del legno, poiché la loro quantità totale è, nella maggioranza dei casi, dell'ordine del 90% rispetto all'intera massa legnosa. I suddetti componenti strutturali del legno sono presenti in quantità variabile in funzione della specie e dell'età del vegetale.

La *cellulosa* è il composto principale della parete cellulare ed è presente in tutti i legni mediamente in quantità pari al 40-45%. Essa è un polisaccaride costituito da unità monomeriche di glucosio (Figura 2.2.7), unite le une alle altre in maniera lineare, mediante il legame 1-4 β -glucosidico (cioè il carbonio in posizione 1 di una molecola di glucosio è legata al carbonio in posizione 4, della molecola successiva: tale gruppo che comprende 2 molecole di glucosio forma un dimero e prende il nome di *cellobiosio*); l'unità monomerica di glucosio viene prodotta, tramite attività fotosintetica, dall'ossido di carbonio presente nell'atmosfera.

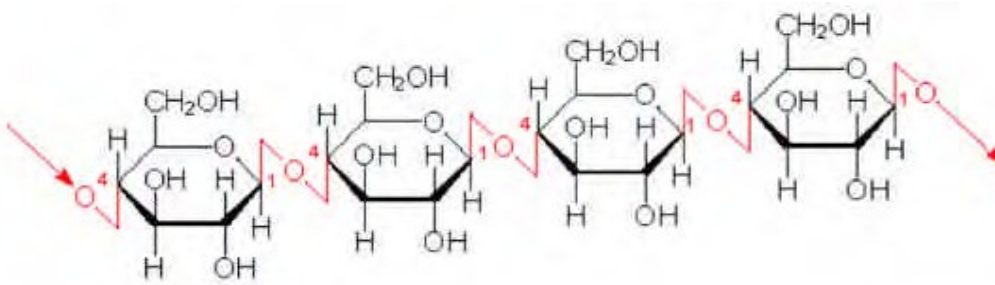


Figura 2.2.7 Formula di struttura della cellulosa

La sua formula bruta può essere scritta nel seguente modo $(C_6H_{10}O_5)_n$, dove n indica il numero di unità glucosiliche che compongono la molecola della cellulosa e che ne determinano la lunghezza della catena. Le catene molecolari della cellulosa, a struttura filiforme, si trovano incorporate nella parete delle fibre non in forma singola e separata ognuna dalle altre, ma associate a costituire dei fasci di molecole, come riportato nella figura 2.2.8. Come si può vedere le singole catene filiformi della cellulosa (G), sono associate a formare più fasci che prendono il nome di *micelle* (F); a loro volta, fasci di queste micelle (E) si riuniscono tra loro (D) per formare le *microfibrille* (C) che, analogamente al caso precedente, si associano (B) per costituire le *macrofibrille*.

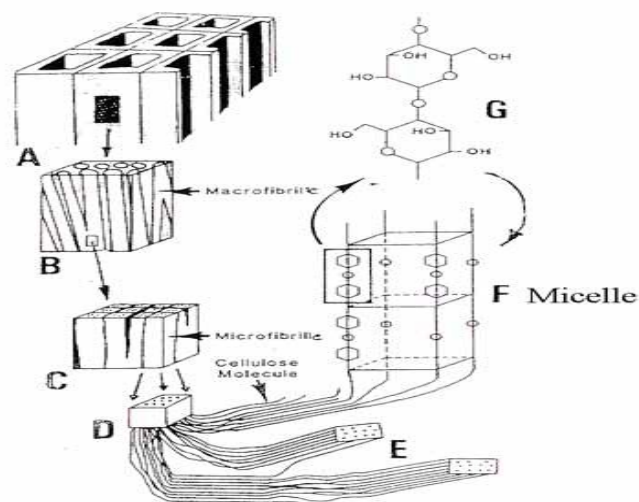


Figura 2.2.8 Rappresentazione grafica di come si dispongono le catene di cellulosa.

Tra le microfibrille esistono interstizi o *spazi che* sono totalmente o parzialmente occupati da sostanze di natura non cellulosa come l'emicellulosa e la lignina. Tali sostanze vengono dette "sostanze incrostanti", mentre la cellulosa costituisce l'ossatura della parete cellulare.

Materie prime utilizzate dall'uomo nel corso degli anni

Nella molecola della cellulosa predomina una struttura cristallina nella misura di circa il 75%, mentre la parte rimanente è allo stato amorfo. Una rappresentazione puramente indicativa della struttura amorfa e cristallina della cellulosa è riportata nella *figura 2.2.9* dove è chiaramente visibile la parte cristallina (corrisponde alle linee parallele, ordinate) e la parte amorfa (caratterizzata dal disordine, dall'intreccio, dall'agrovigliarsi delle catene della cellulosa).

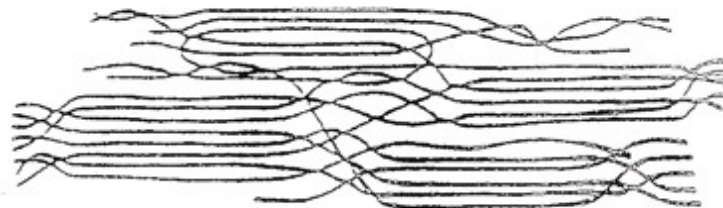


Figura 2.2.9 Rappresentazione grafica della struttura cristallina e amorfa della cellulosa.

L'*emicellulosa* è un polisaccaride a basso peso molecolare di composizione irregolare; le unità di monosaccaridi che si riscontrano in prevalenza sono: mannosio, xilosio, glucosio, galattosio ed arabiosio; mediamente le unità monosaccaridi che costituiscono l'emicellulosa sono comprese tra 100 e 200 unità. L'emicellulosa (*figura 2.2.10*) presenta una struttura ramificata, dovuta al fatto che oltre ai legami 1-4 sono presenti i legami 1-3 e 1-6 glicosidici, ed amorfa.

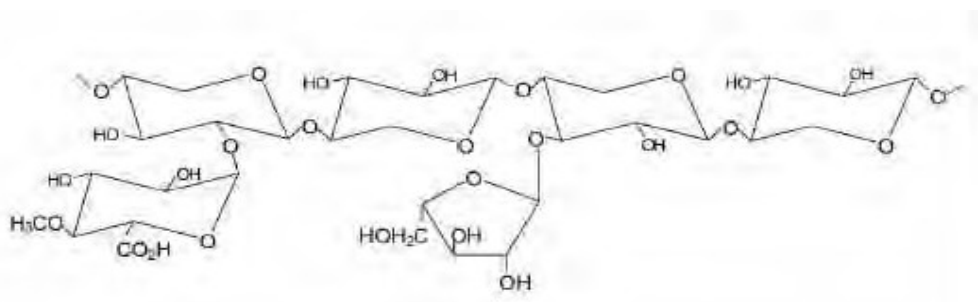


Figura 2.2.10 struttura schematica dell'emicellulosa

L'emicellulosa è presente in ogni vegetale in misura variabile. Essa oltre a rinforzare la cellulosa, in quanto possiede proprietà adesive che tendono a cementare quando si disidratano, ha funzione di riserva.

La *lignina* è un polimero di natura fenolica, complesso, amorfo ed altamente idrofobo; esso è costituito principalmente dalle seguenti unità monomeriche: alcol

p-cumarilico, alcol coniferilico e alcol sinapilico (figura 2.2.11).



Figure 2.2.11. Unità monomeriche maggiormente presenti della lignina - alcool p-cumarico - alcool coniferico - alcool sinapilico.

La principale funzione della lignina è di legare e cementare tra loro le varie fibre per conferire compattezza e resistenza alla struttura legnosa, inoltre essa costituisce una protezione contro insetti, agenti patogeni, lesioni e luce ultravioletta.

La lignina viene depositata all'interno delle pareti durante il processo di lignificazione, il quale costituisce l'ultimo stadio dello sviluppo cellulare.

2.2.4 Legni archeologici e metodi di consolidamento

I legni di derivazione archeologica, nella maggior parte dei casi, presentano situazioni di degrado chimico, fisico e biologico, dovute alla loro permanenza in acqua o, quanto meno, in ambienti umidi (Unger A, 2001; Bjordal C. G. 1999; Kim Y. S. 2000.). La casistica presenta, ovviamente, anche situazioni di legni rinvenuti asciutti e perfettamente conservati; un esempio sono i sarcofagi egizi, i quali come appena detto si sono mantenuti in un ottimo stato grazie al bassissimo tasso di umidità.

Il legno il quale è costituito prevalentemente da sostanze organiche, è attaccato da funghi e insetti; i quali trovano nei costituenti chimici della parete cellulare o nelle sostanze di riserva delle cellule paranchimatiche (amidi, zuccheri semplici) la fonte di nutrimento. Nonostante ciò i legni presentano una durabilità naturale, ossia una resistenza all'attacco da parte di organismi biotici. Tale durabilità naturale cresce con l'aumentare degli estratti duramificanti, cioè fenoli, tanniti etc; mentre diminuisce con l'aumento della presenza di sostanze di riserva come l'amido. Infatti si ha che la parte legnosa chiamata alburno, che è costituito da tessuti vivi che svolgono funzioni di trasporto e quindi sono ricchi di amido, ha una durabilità inferiore

Materie prime utilizzate dall'uomo nel corso degli anni

rispetto al durame in cui è cessata la funzione di conduzione e l'amido è stato trasformato in tannini o altre sostanze. Naturalmente la resistenza agli organismi biotici varia in funzione sia della porzione di legno preso in considerazione che in funzione della specie. La determinazione della durabilità del legno viene eseguita secondo norme ben precise, miranti a valutare la perdita in peso di provini standardizzati in seguito all'attacco di determinati tipi di funghi, in opportune condizioni di temperatura (22°C) ed umidità (70%) per un periodo di 16 settimane. (Anselmi, Govi, 1996).

Tra gli agenti biotici più dannosi per il legno si annoverano i funghi cromogeni, i funghi da carie e gli insetti. Affinché in fungo possa svilupparsi ha bisogno di determinate condizioni fisiche (temperatura, umidità) e chimiche (presenza di ossigeno, pH etc.). I funghi, i quali si nutrono di sostanze prodotte da altri organismi, una volta penetrati nella cellula legnosa secernano enzimi, che attaccano i costituenti della parete, generando composti assimilabili dai funghi.

I funghi cromofori sono i responsabili della alterazione cromatica del legno mentre i funghi da carie modificano le caratteristiche fisiche-meccaniche. Quest'ultimi vengono distinti in tre categorie, in funzione della componente legnosa di cui si nutrono:

1. funghi da carie bianca, i quali attaccano sia la lignina che la cellulosa;
2. funghi da carie bruna, i quali attaccano principalmente la cellulosa, in particolare prima quella amorfa e poi quella cristallina;
3. funghi da carie soffice, i quali attaccano essenzialmente la cellulosa ed emicellulosa. Questo tipo di carie è particolarmente presente in legni a contatto con il terreno o in acqua.

In conclusione, i segni di un attacco fungino sono rilevabili dapprima con un tenue cambiamento di colore, cui segue una perdita delle caratteristiche fisiche, meccaniche, e chimiche. Quindi l'attacco fungino di un legno si nota essenzialmente con:

- il cambiamento di colore;
- la riduzione della compattezza;
- l'aumento della porosità;
- la perdite in peso variabili nel tempo in funzione del tipo di fungo e della specie lignea, e quindi variazione della composizione chimica;
- ed infine la riduzione delle proprietà meccaniche (trazione, durezza e compressione).

Prescindendo ai problemi relativi ad attacchi biotici, i legni rimasti in acqua per

lungo tempo subiscono un deterioramento irreversibile delle pareti cellulari: in un primo momento vengono rimossi, a seguito di un fenomeno di diffusione, i prodotti del metabolismo solubili in acqua (sali, zuccheri, tannini, amidi), successivamente interviene una idrolisi delle emicellulose meno stabili (pectine, pentosani), mentre quelle più stabili (galattani, poliuronidi) si degradano solo se attaccati da organismi specifici. Contemporaneamente avviene la decomposizione parziale della cellulosa ed in definitiva ciò che rimane sono soltanto le sostanze più "resistenti" cioè quelle meno solubili in acqua come la lignina. Infatti i legni "bagnati" si caratterizzano per un elevato contenuto di lignina e, un minore contenuto di olocellulosa (olocellulosa = emicellulosa + cellulosa). Quando un legno rimane per un lungo tempo in acqua anche la lignina appare notevolmente compromessa, mentre la cellulosa è quasi del tutto scomparsa.

In fine possiamo dire che i fattori ambientali sono parametri molto importanti che possono pregiudicare o favorire la conservazione di un manufatto ligneo. È noto che i pochi reperti di origine vegetale trovati negli scavi sono di solito molto degradati e talvolta addirittura allo stato carbonioso, mentre si trovano in migliori condizioni i reperti trovati o in luoghi molto asciutti con elevata temperatura e bassa umidità, o imbibiti d'acqua, come i reperti provenienti da ritrovamenti lacustri o marini. Il fatto che ci sia una buona conservazione del legno in luoghi asciutti con elevata temperatura e bassa umidità è dovuto al fatto che in queste condizioni gli organismi biotici non possono sopravvivere. Mentre per quanto riguarda i reperti lignei provenienti da zone lacustre o marine si ha che l'acqua, che è una delle cause del degrado del legno, ne favorisce nello stesso tempo la conservazione, in quanto impregnando la microstruttura lignea fa sì che vengano mantenute le dimensioni e i dettagli strutturali del manufatto.

I trattamenti preservativi e consolidanti sono indispensabili per recuperare e conservare i manufatti lignei, inoltre per quanto riguarda i legni imbibiti di acqua nel processo di consolidamento è necessario la sostituzione graduale dell'acqua con le sostanze consolidanti, in modo da mantenere le caratteristiche e le dimensioni originale del reperto.

I sistemi conosciuti fino adesso per il consolidamento del legno prevedono l'utilizzo di:

- ✘ polimeri idrofili come: il polietilenglicole (PEG) (Håfors 2001; Hoffmann 1986; Hoffmann 2001) e il polipropilenglicole (PPG) con differenti pesi molecolari, e l'idrossipropilcellulosa (Klucel G) (Donato 2004; Giachi 2010);
- ✘ resine naturali come la colofonia;

Materie prime utilizzate dall'uomo nel corso degli anni

- * resine sintetiche come il Paraloid B72 (resina acrilica formata da etilmetacrilato-metilacrilato);
- * molecole piccole che vengono fatte polimerizzare in situ; quest'ultimo metodo risulta ad oggi applicato in via sperimentale data la complessità del procedimento (Vicini 2001).

2.3 Roccia metamorfica - Marmo

Le rocce metamorfiche sono rocce che hanno subito modificazioni nella composizione mineralogica o nella struttura e nella tessitura a causa di processi metamorfici, cioè in seguito a cambiamenti di temperatura e pressione; ciò è dovuto al fatto che gli atomi dei minerali in determinate condizioni di temperatura e pressione si dispongono in modo da formare nuovi reticolo cristallini.

Le rocce metamorfiche possono derivare dalla trasformazione di rocce sedimentarie, magmatiche o da altre rocce metamorfiche. Le rocce sedimentarie vengono generate per sedimentazione di detriti inorganici, organici e sali minerali e successiva o contemporanea compattazione e cementazione. Nella loro formazione sono individuabili quattro fondamentali processi: degradazione chimica e meccanica, trasporto dei sedimenti, sedimentazione e diagenesi. Con quest'ultimo termine si intende l'insieme dei processi di compattazione, cementazione e parziale ricristallizzazione, che trasforma il sedimento in roccia. Le rocce sedimentarie sono quelle più diffuse sulla superficie terrestre, alcuni esempi sono: il calcare, la dolomia, l'arenaria ect. Invece, le rocce magmatiche, dette anche ignee, sono le rocce generate dal raffreddamento del magma, una massa silicatica fusa, contenente elementi volatili (acqua, anidride carbonica, acidi, idrogeno, etc.) che conferiscono ad essa una certa fluidità. Tali rocce vengono a loro volta classificate, in funzione alla velocità e luogo dove si ha il raffreddamento del magma, in rocce magmatiche intrusive o plutoniche, effusive o vulcaniche, ipoabissali o filoniane: le prime si formano all'interno della crosta terrestre o nella parte più alta del mantello terrestre e sono caratterizzate da un lento raffreddamento che favorisce la crescita dei cristalli al loro interno, tipiche rocce di questo tipo sono i graniti e il quarzo-dioriti; le seconde invece si formano in seguito ad un'eruzione o ad una colata lavica e quindi subiscono un raffreddamento rapidissimo che porta ad una struttura microcristallina, porfirica, con abbondanti quantità di materiale vetroso. Esempi sono il basalto, il porfido e la pomice. Vi sono infine le rocce filoniane o ipoabissali, che, solidificano sotto la superficie terrestre, in piccole cavità, essi hanno una

struttura intermedia alle prime due, cioè alle rocce magmatiche intrusive o effusive. I marmi sono rocce metamorfiche, essi possono essere prodotti mediante processi metamorfici sia di contatto che regionale su rocce sedimentarie, quali il calcare o la dolomia. Tali processi metamorfici provocano una completa ricristallizzazione del carbonato di calcio di cui sono in prevalenza composte tali rocce e danno luogo ad un mosaico di cristalli di calcite o di dolomite. Quindi l'azione combinata della temperatura e la pressione, durante la trasformazione della roccia sedimentaria in marmo, porta alla progressiva obliterazione delle strutture e tessiture originariamente presenti nella roccia, con la conseguente distruzione di qualsiasi fossile, stratificazione o altra struttura sedimentaria presenti nella roccia originaria. In teoria un marmo puro dovrebbe essere formato solo da cristalli di calcite; in realtà sono sempre presenti dei componenti accessori. Tali componenti hanno un'importanza notevole nel determinare il valore artistico e commerciale del marmo poiché dalla loro natura chimica e concentrazione dipendono la colorazione, le tonalità, il disegno, l'alterabilità, etc. i componenti accessori più diffusi sono: quarzo, miche, cloriti, talco, pirite, magnetite, grafite, apatite, feldspati, ossidi di ferro. I marmi in senso lato possono essere classificati in base al colore, alla composizione chimica, alla presenza o meno di pigmento e quindi alla natura di questo. La classificazione in base al colore è quella più usata commercialmente, intendendo per colore quello predominante su altri che eventualmente sono presenti. Si distinguono pertanto marmi bianchi (costituiti da calcite (CaCO_3), dolomite ($\text{CaCO}_3\cdot\text{MgCO}_3$) o una loro miscela), turchini, gialli, rossi, neri, verdi, policromi e variegati. Chimicamente i marmi vengono suddivisi in carbonatici, solfatici e silicatici. I primi comprendono i veri marmi; i solfatici sono gli alabastri gessosi, come quelli di Volterra o i ballatini della Sicilia; ai marmi silicatici vanno riferite le rocce di natura ignea e di bell'aspetto come graniti, sieniti, etc. e altre metamorfiche come oficalci, calcefiri, serpentine, etc.

2.3.1 Metamorfismo.

In petrografia con il termine metamorfismo si intendono il complesso di trasformazioni strutturali, mineralogiche e chimiche di rocce solide per adattamento a condizioni chimico-fisiche diverse da quelle originarie. Le modificazioni più significative operate dal metamorfismo sono:

1. progressivo aumento della dimensione dei cristalli col crescere dell'intensità metamorfica e la tendenza all'equidimensionalità da parte dei cristalli di una

Materie prime utilizzate dall'uomo nel corso degli anni

stessa specie minerale;

2. comparsa di un aspetto foliato, ossia di una disposizione dei minerali in bande o letti subparalleli anche in rocce originariamente sprovviste di qualsiasi disposizioni preferenziale degli elementi costitutivi, che con l'accentuarsi della pressione orientata o di quella di carico passa ad una vera e propria tessitura scistosa;
3. distribuzione dei minerali presenti tanto più ordinata e regolare quanto più intenso è stato il metamorfismo;
4. modificazioni dell'assetto cristallino tale da renderlo più stabile nelle nuove condizioni di pressione e di temperatura; il processo comporta una ricristallizzazione più o meno spinta in funzione dell'entità del cambiamento ambientale.

La ricristallizzazione porta alla comparsa di nuovi minerali stabili in determinati valori di temperatura e pressione: per un certo intervallo quindi possono coesistere stabilmente soltanto determinati tipi di minerali, la cui associazione risulta caratteristica per quelle condizioni. L'insieme dei caratteri chimici e mineralogici presenti in una roccia metamorfica permette di determinare le condizioni ambientali, ossia l'intervallo di temperatura e di pressione, in cui ha operato il metamorfismo. Per stabilire l'intensità del metamorfismo, ossia il grado di metamorfismo, si ci può basare semplicemente sulla presenza o meno di alcuni minerali, detti critici, indicatori specifici di facies.

Una prima suddivisione dell'ambiente metamorfico, basata su rapporti tra livello termico e pressione con la profondità, distingue un'epizona, una mesozona e una catazona. Nell'epizona, cioè nelle zone più superficiali, il metamorfismo agisce in condizioni di temperatura non molto elevata, mentre le pressioni sono per lo più orientate, o di carico o generate da cause tettoniche, e raggiungono valori notevoli; l'ambiente favorisce le reazioni chimiche esotermiche e la formazione di minerali a minor volume molecolare, ossia con abito lamellare, tabulare o prismatico. La mesozona presenta caratteri intermedi tra la precedente e la catazona. Quest'ultima è una zona profonda, dove la pressione, pur crescente, non è più unidirezionale ma raggiunge valori più o meno uguali in tutte le direzioni, mentre la temperatura è assai elevata; in questa zona sono favorite le reazioni endotermiche e la formazione e la stabilità di minerali ad alto volume molecolare. Questa schematica suddivisione può essere integrata tenendo conto della presenza o prevalenza di alcuni minerali critici. L'entità delle trasformazioni chimico-mineralogiche dipende dal numero di costituenti presenti nelle rocce sottoposte al

metamorfismo; se i costituenti sono pochi, poche saranno le fasi possibili, se ce ne sono molti, potranno invece formarsi diversi minerali stabili solo in successivi intervalli di temperatura e di pressione. Così, per esempio, un'arenaria silicea o un calcare puro, metamorfosati daranno rispettivamente una quarzite o un marmo, mentre da un sedimento argilloso-arenaceo si otterrà al crescere del metamorfismo un argilloscisto, una fillade micaceo-cloritica, un micascisto biotitico-granatifero, etc.

Le variabili che influiscono in particolar modo sul metamorfismo sono la temperatura e la pressione: secondo il variare della loro importanza reciproca si hanno diversi tipi di metamorfismo (figura 2.3.1). Il metamorfismo dipendente prevalentemente dalla pressione si definisce metamorfismo dinamico o metamorfismo tettonico o di dislocazione o meccanico o cinetico; quello dovuto essenzialmente alla temperatura, metamorfismo termico o metamorfismo di contatto; quello dovuto sia alla temperatura sia alla pressione, metamorfismo regionale o generale. Il metamorfismo regionale è capace di esplicare un'azione a vasto raggio mentre gli altri tipi di metamorfismo hanno rilievo solo in ambito ristretto.

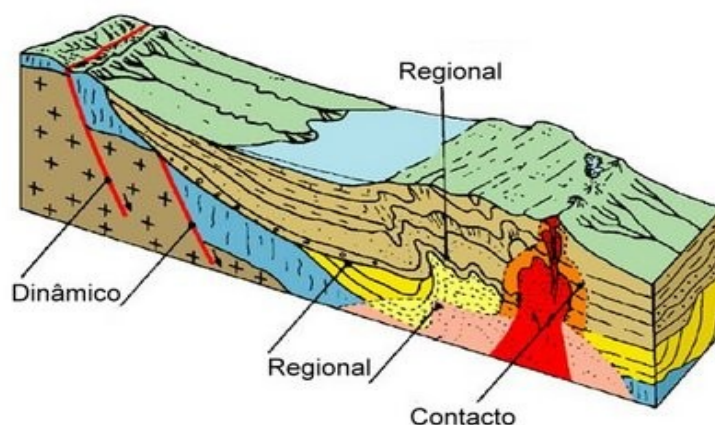


Figura 2.3.1 Tipi di metamorfismo

Le rocce sottoposte al metamorfismo dinamico subiscono essenzialmente o deformazioni plastiche o frantumazioni più o meno intense; tale metamorfismo avviene lungo le superfici di rottura (le faglie) o di sovrascorrimento. Il metamorfismo termico è limitato alle zone di contatto tra un magma e le rocce incassanti. Più che il valore delle temperature, è significativa la durata del contatto termico. Il metamorfismo di contatto è caratterizzato da una più o meno evidente ricristallizzazione: i minerali idrati sono sostituiti da altri anidri; resti organici,

Materie prime utilizzate dall'uomo nel corso degli anni

sostanze argillose, silice colloidale, parti vetrose di rocce effusive sono sostituiti da fasi cristalline stabili alle nuove condizioni; i calcari si trasformano in marmi, ecc. La liberazione di sostanze volatili o ancor di più l'apporto di nuove sostanze da parte delle soluzioni magmatiche comporta il manifestarsi di un'intensa attività chimica metasomatica, cui è dovuto il formarsi di numerosissimi minerali, detti di contatto, diversi secondo la composizione del magma, il contenuto in materie volatili e la natura delle rocce incassanti. Tipica espressione di questa forma di metamorfismo è la formazione dell'aureola metamorfica nelle rocce attorno a un'intrusione profonda. Gli effetti del metamorfismo di contatto diminuiscono man mano che ci si allontana dall'intrusione. Il metamorfismo regionale è tipico delle aree sedi di anormali flussi di calore; esso è legato alle grandi deformazioni della crosta terrestre (che, per esempio conducono alla formazione di catene montuose). Questo tipo di metamorfismo oltre a causare la formazione di nuovi minerali, conferisce alla roccia una nuova tessitura solitamente orientata. Alcune tipiche rocce sono gli scisti, gli gneiss etc.

Una roccia può a più riprese essere soggetta a metamorfismo: il fenomeno è definito polimetamorfismo e può essere sia progressivo, quando i processi metamorfici risultano man mano più intensi, sia retrogrado (retrometamorfismo o diaforesi).

Una roccia metamorfica può essere identificata in funzione del suo grado di metamorfismo, cioè in funzione dell'intensità del processo metamorfico a cui è stata soggetta. Il grado metamorfico dipende principalmente della temperatura. Più alta è la temperatura più alto è il grado metamorfico (Figura 2.3.2).

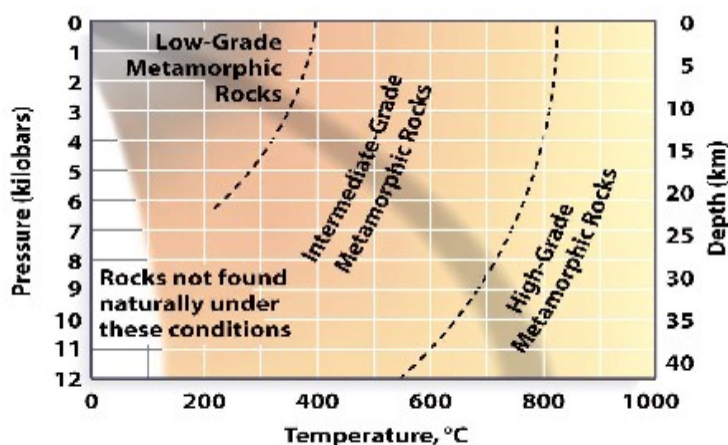


Figura 2.3.2 Gradi di metamorfismo

Bibliografia

- Alselmi, Govi, 1996. *Patologia del legno*. Ed. Agricole.
- Bjordal C. G., Nilsson T. and Daniel G., 1999. *Microbial decay of waterlogged archaeological wood found in Sweden*. Int. Biodeterioration Biodegrad, 4, 63-73.
- Core H. A., Côté W. A. and Day A.C., 1979. *Wood: Structure and identification*. Second edition. Syracuse University Press USA.
- Donato I.D., P Agazzino, (2004). *Composti polimerici per il consolidamento di legni degradati*. Sci. Technol. Cult. Herit. 13, 71-81.
- Giachi G, Capretti C, Macchioni N, Pizzo B, Donato ID (2010) *A methodological approach in the evaluation of the efficacy of treatments for the dimensional stabilisation of waterlogged archaeological wood*. Journal of Cultural Heritage. 11, 91-101.
- Giordano G., 1981. *Tecnologia del legno*. Vol. I. La materia prima. UTET, Torino.
- Håfors B (2001). *Conservation of the Swedish warship Vasa from 1628*. The Vasa Museum, Stockholm.
- Hoffmann P (1986). *On the stabilization of waterlogged oakwood with PEG. II. Designing a two-step treatment for multiquality timbers*. Stud Conserv 31,103–113.
- Hoffmann P (2001). *To be and to continue being a cog: the conservation of the Bremen Cog of 1380*. The International Journal of Nautical Archaeology. 30, 129-140.
- Kim Y. S. and Singh A. P., 2000. *Micromorphological characteristics of wood biodegradation in wet environments: a review*. IAWA J., 21, 135-155.
- Lewin M. and Goldstein I. S., 1991. *Wood structure and composition*. International Fiber Science and Technology V11. Marcel Dekker inc. New York USA.
- Petterson R.C., 1984. *The chemical composition of wood*. American Chemical Society.
- Tsoumis G., 1991. *Science and technology of wood: structure, properties, utilization*. Van Nostrand Reinhold. New York USA.
- Unger A., Schniewind A. P. and Unger A., 2001. *Conservation of wood artefacts*. Springer- Verlag. Berlino.
- Vicini S., Margotti S., Moggi G., Pedemonte E., 2001. *In situ copolymerisation of ethylmethacrylate and methylacrylate for restoration of stone artefacts*. Journal Cultural Heritage. 2, 143-147.

Capitolo 3

Materiali, strumentazione e software utilizzati

3.1 Materiali

I materiali utilizzati, nel lavoro di tesi, per quanto riguarda i legni sono: legni di pino degradati da carie bruna; e legni di abete e di castagno immersi in acqua deionizzata per circa tre anni a temperatura ambiente, cambiando periodicamente l'acqua deionizzata (questi legni sono stati gentilmente forniti dalla Prof. I.D. Donato).

I consolidanti usati sono: il polietilenglicole (PEG) in particolare il PEG400 e il PEG1500 , l'idrossipropilcellulosa o Klucel e la Colofonia. I solventi utilizzati sono: l'ossido di deuterio, l'acetone, l'etanolo.

Il polietilenglicole (PEG) è un prodotto di polimerizzazione dell'ossido di etilene con la seguente formula di struttura (figura 3.1.1):

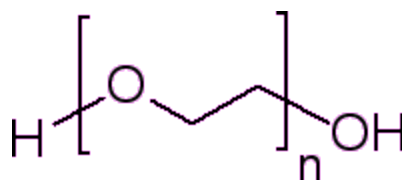


figura 3.1.1 Formula di struttura del polietilenglicole

Esistono diversi tipi di polietilenglicole, classificati in base alla lunghezza media del polimero, ovvero al numero medio di monomeri **n**. A tale variazione corrispondono

differenti proprietà fisiche (come la viscosità). Per valori di n bassi il prodotto è liquido, al crescere di n il polimero prende invece l'aspetto di un solido ceroso dal punto di fusione relativamente basso. Il polietilenglicole è solubile in acqua, metanolo, di-cloro-metano ect; mentre è insolubile in solventi organici come l'esano e l'etere dietilico.

Il PEG è stato utilizzato sin dagli anni 60' come consolidante per reperti lignei archeologici ritrovati sott'acqua o in ambienti umidi. Il primo reperto ligneo di grandi dimensioni, consolidato mediante impregnazione con il PEG è stato il vascello Vasa attualmente conservato presso il museo Vasa di Stoccolma. Il PEG è ancora oggi uno dei materiali più diffusi per il consolidamento di legni archeologici bagnati, nonostante siano stati identificati diversi problemi legati alla sua applicazione, soprattutto in presenza di elementi metallici la cui corrosione è facilitata dal fatto che il PEG si comporta come un conduttore di elettricità anche allo stato solido.

L'idrossipropilcellulosa, detta anche Klucel, è una cellulosa modificata con la seguente formula di struttura (figura 3.1.2):

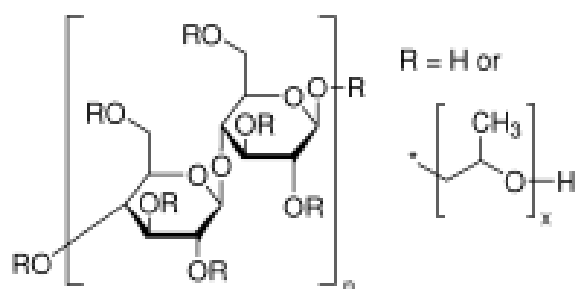


figura 3.1.2 Formula di struttura dell'idrossipropilcellulosa

Come si può vedere dalla formula di struttura (figura 3.1.2) alcuni gruppi -OH della cellulosa sono stati sostituiti da gruppi idrossipropossilici -OCH₂CH(CH₃)OH. La cellulosa è un polisaccaride costituito da unità monomeriche di glucosio, unite le una alle altre in modo lineare, cioè mediante legami 1-4 β-glicosidici. La cellulosa è una delle componenti principali della parete cellulare dei legni. L'idrossipropilcellulosa è solubile in acqua ed in solventi organici polari. Il Klucel utilizzato ha un peso molecolare medio di 80.000 uma.

La Colofonia è una resina vegetale solida, trasparente, di colore gialla,

Materiali, strumentazione e software utilizzati

derivata dalla distillazione delle trementine (resina di conifere in particolare di alberi di Pino). La composizione chimica della Colofonia è complessa: circa il 90% sono resine acide mentre il 10% sono esteri, aldeidi e alcoli. Delle resine acide il 90% sono isomeri dell'acido abietico, cioè di-terpeni tri-ciclici. Tali isomeri possono essere suddivisi in due gruppi principali: i tipi abietici con doppio legame coniugato e i tipi pimarici con doppio legame non-coniugato (figura 3.1.3) (Sadhra 1997).

la Colofonia è insolubile in acqua ma solubile in solventi organici come alcool, etere, acetone, etil acetato, etc.

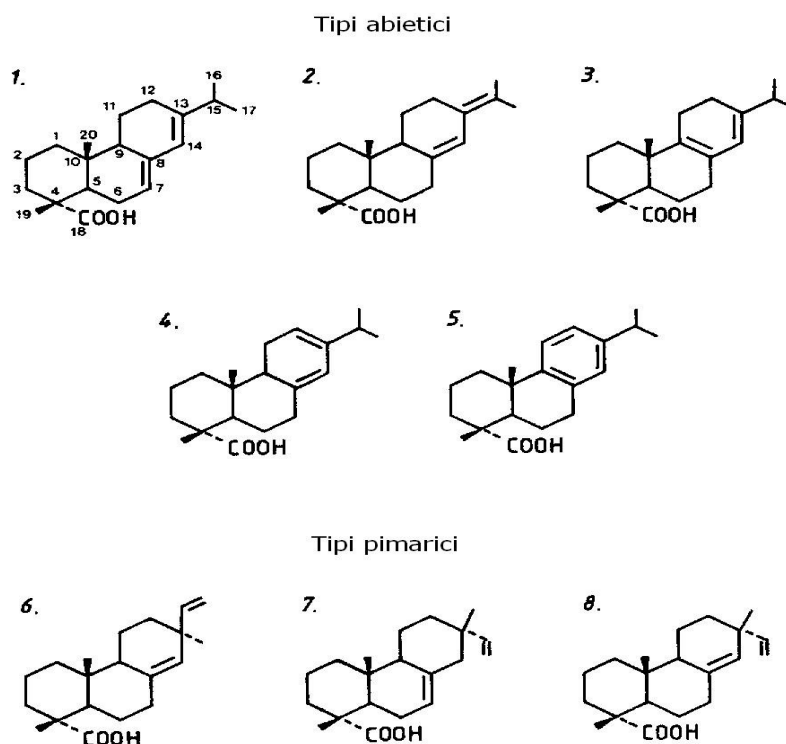


Figura 3.1.3 Isomeri dell'acido abietico

Per quanto riguarda i marmi essi sono campioni provenienti da Villa Adriana a Tivoli (Roma); tale villa è stata costruita nel II secolo d.C dall'imperatore romano Adriano; ed è stata inserita nella lista del Patrimonio dell'Umanità dall'UNESCO .

Invece i reperti subacquei archeologici ci sono stati forniti dalla Soprintendenza del Mare di Palermo.

3.2 CONRAD

Tutte le misure di tomografia neutronica sono state effettuate allo strumento di

tomografia neutronica CONRAD (**C**old **N**eutron **R**adiography) all'istituto Hahn-Meitner a Berlino, in Germania (Hinger, A. 2006). Tale strumento è posizionato alla fine di una guida neutronica curvata, che ha origine presso la sorgente fredda del Reattore BER-II. La geometria fornisce un fascio di neutroni freddi con una lunghezza d'onda tra 2 e 12 Å. La densità del flusso dei neutroni freddi alla fine della guida è dell'ordine di circa $2 \cdot 10^8$ n/cm²s con un background di raggi- γ e neutroni veloci trascurabile.

Lo strumento include due posizioni di misura. La prima posizione è localizzata direttamente alla fine della guida neutronica, dando come vantaggio un elevato flusso di neutroni freddi disponibili. Questa densità di flusso è sufficiente per realizzare esperimenti in tempo reale. Comunque, dall'altro lato la risoluzione delle immagini è limitata dalla divergenza del fascio energia-dipendente delle guide che forniscono un rapporto L/D scarso di circa 70 (Schillinger, B. 2001). Inoltre, la dimensione del fascio disponibile è limitata dalla sezione d'urto della guida che è 3×5 cm².

La seconda posizione di misure usa una geometria a foro di spillo che permette una migliore collimazione del fascio (rapporto L/D più di 1000) e una maggiore risoluzione spaziale dell'ordine di 200 μ m. Il sistema di collimazione consiste in un tubo di volo lungo 5 m e un set di diaframmi. Il flusso neutronico sarà ridotto ma tuttavia arriva ad un valore di circa 10^7 n/cm²s alla posizione di misura. Le immagini ottenute dal scintillatore LiZnS sono proiettati mediante specchi e lenti nel chip-CCD.

Infine possiamo dire che: nella prima posizione di misura è disponibile un flusso estremamente alto e quindi una elevata risoluzione temporale; mentre nella seconda posizione di misura è disponibile un fascio ben collimato quindi una elevata risoluzione spaziale (Figura 3.2.1).

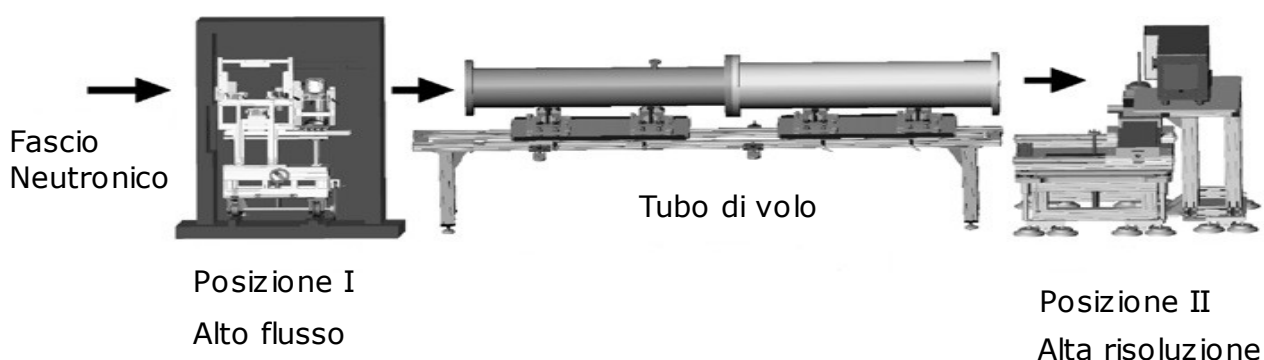


Figura 3.2.1 disegno del setup dello strumento Conrad.

3.3 Acquisizione dati e ricostruzioni

Una volta che le condizioni del set-up della tomografia neutronica sono stati definiti l'esperimento può essere eseguito nella seguente maniera:

1. il campione deve essere posizionato immobile sul porta campione e il più vicino possibile al piano del rivelatore in modo da minimizzare l'offuscamento geometrico (in conformità con la legge $D/L=l/d$ eq.2.).
2. Alcune immagini "open beam" (con la radiazione, ma senza campione) e una immagine "dark-current" (senza radiazione) devono essere prese nelle stesse condizioni sperimentali di quelle prese per il campione.
3. Il numero di proiezioni radiografiche n_p necessarie devono essere acquisite mediante rotazione del campione intorno all'asse verticale in intervalli angolari uguali di $180/(n_p+1)$.
4. Dopo che le proiezioni del campione sono state acquisite è necessario: rimuovere i spot bianchi, cioè i pixel non buoni, causati o da elementi del rivelatore danneggiati in modo permanente o da elementi del rivelatore colpiti dai raggi- γ ; ed eliminare le influenze della distorsione del fascio e della non-omogeneità del rivelatore. Ciò è possibile mediante processi di correzione e normalizzazione che usano: filtri, l'immagine "dark-current" e le immagini "open beam". Quindi, tutti i dati di proiezione sono divise mediante l'immagine di "riferimento open beam", la quale era stata precedentemente filtrata per "i pixels non buoni" e corretta per il "dark current".
5. Dopo la correzione e normalizzazione delle proiezioni; devono essere generate i sinogrammi e applicato algoritmo della retro-proiezione filtrata in modo da generare le sezioni orizzontali del campione.
6. In fine lo sviluppo ortogonale delle sezioni tangenziali del campione da origine al campione in 3-D.

Lo scopo finale della tomografia è determinare la matrice dei coefficienti di attenuazione $\mu(x, y, z)$ su tutto il volume del campione. Un'assunzione essenziale nella ricostruzione tomografica è che il coefficiente di attenuazione del fascio segua la legge esponenziale $I/I_0=\exp(-\mu d)$ (eq. 1.2.6) dove il coefficiente di attenuazione lineare si considera essere una sovrapposizione della sezione d'urto di diffusione e di assorbimento del materiale sotto investigazione. Un elevato contributo di diffusione induce forti artefatti nella ricostruzione tomografica che dovrebbero essere adeguatamente corretti. Un modo per analizzare il contributo degli effetti di

diffusione, includendo la descrizione delle caratteristiche del fascio, trasmissione del campione, e risposta del rivelatore sono stati simulati con l'aiuto di un metodo di Monte-Carlo usando il codice MCNPX (Hassanein et al.,2006). Il nocciolo della analisi è stimare la funzione chiamata "Point scattered Function" (PScF) descrivendo il contributo di diffusione per ogni punto dell'oggetto. A causa della difficoltà di calcolo delle corrispondenti PScF per tutte le combinazioni di materiali, di fasci lineari e distanze campione-rivelatore, parametri approssimate vengono utilizzati. In molti casi e anche nei nostri, alcune approssimazioni sono usate in modo da semplificare gli algoritmi [Strobl 2009]. Tali approssimazioni sono:

1. il fascio è considerato perfettamente collimato;
2. le interazioni fuori al campione e i neutroni diffusi non vengono presi in considerazione, in quanto trascurabili;
3. il fascio viene considerato monocromatico, in questo modo la dipendenza energetica del coefficiente di attenuazione del materiale viene trascurato.

Quindi dopo aver acquisito le proiezioni del campione, mediante le misure di tomografia neutronica o di tomografia a raggi x; esse vengono: corrette e normalizzate; generate i sinogrammi e applicato algoritmo della retro-proiezione filtrata in modo da generare le sezioni orizzontali del campione (figura 3.3.1). Tutto ciò viene effettuato usando il programma Octopus.

Dopo aver ottenuto le sezioni orizzontali dal campione è possibile, mediante il programma VG Studio, avere la ricostruzione dell'oggetto in 3D. Tale programma inoltre permette: di effettuare la segmentazione, cioè vedere come sono distribuite le varie fasi che costituiscono il campione, sia singolarmente che in gruppo; di generare gli istogrammi, cioè grafici in cui vengono riportati i numeri dei pixels in funzione dei coefficienti di attenuazione, per qualsiasi sezione, etc.

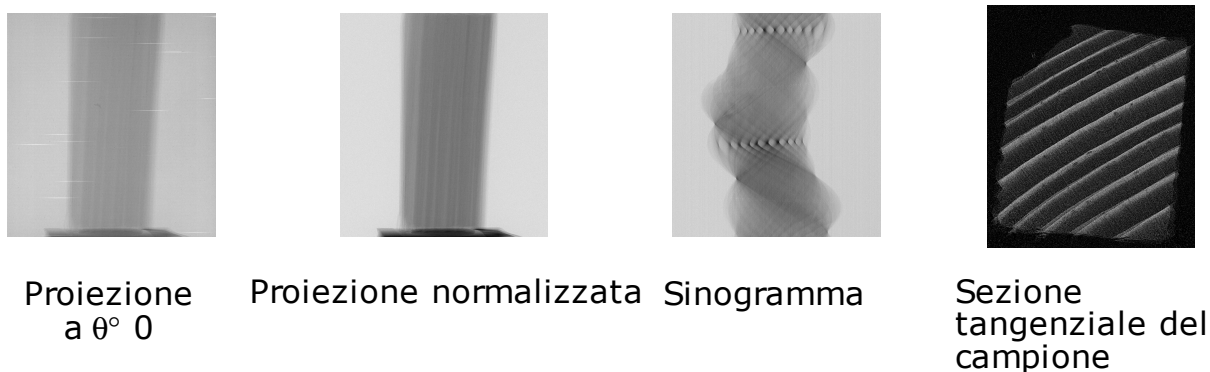


Figura 3.3.1 Passaggi per ottenere la ricostruzione delle sezioni orizzontali dei campioni in generale.

Bibliografia

- Hassanein, R., Meyer, H.O., Carminati, A., Estermann, M., Lehmann, E., and Vontobel, P., (2006). Investigation of water imbibition in porous stone by thermal neutron radiography. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 39, 4284.
- Hilger, A., Kardjilov, N., Strobl, M., Treimer W. and Banhart J.(2006). *The new cold neutron radiography and tomography instrument CONRAD at HMI berlin*. *Physica B*, 385-286, 1213.
- Schillinger, B. (2001). *Estimation and measurement of L/D on a cold and thermal neutron guide*. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 16, 141.
- Strobl, M., Manke, I., Kardjilov, N., Hilger, A., Dawson, M., and Banhart, J.,(2009). *Advances in neutron radiography and tomography*. *Journal of Physics D: Applied Physics* 42.

Capitolo 4

Tomografia neutronica applicata allo studio di legni degradati.

4.1 Introduzione

Il legno è un materiale usato fin dai tempi della preistoria. Essendo un materiale organico è soggetto all'azione di microorganismi, i quali trovano in esso fonte di vita. Il legno oltre ad essere suscettibile ad agenti biodeteriogeni è sensibile a parametri ambientali quali umidità, temperatura e pH.

Poiché, l'obbiettivo di un restauratore non è quello di sostituire gli elementi degradati, cancellando così quelle tracce che l'opera originaria conserva e che sono una testimonianza dello sviluppo culturale e tecnologico raggiunto, ma è quello di preservarli, di consolidarli, avendo cura di mantenere le dimensioni, le caratteristiche estetiche etc, si è deciso di effettuare studi di Tomografia Neutronica (NT) e di Tomografia a raggi X (XT) su legni degradati mediante microrganismi, e successivamente consolidati. Tali studi sono stati affrontati con l'obbiettivo di confermare l'ipotesi di partenza di questa tesi e cioè che tali tecniche sono buone tecniche di bulk, non distruttive, che permettono di stimare l'entità di degrado e se e come il consolidante si dispone all'interno del campione di legno.

Oltre a misure di NT e XT su legni degradati e successivamente consolidati, sono state effettuate misure in situ di Radiografia Neutronica (NR) su legni di castagno e di abete, per evidenziare lo scambio $H_2O - D_2O$ e misure NT e XT su legni di castagno e di abete consolidati con PEG400.

4.2 Legni degradati

I legni utilizzati sono legni di pino (dimensione di circa 1cm x 1,5 cm x 2,5 cm) degradati da Carie Bruna, cioè da funghi che attaccano essenzialmente la cellulosa, e successivamente consolidati con Klucel e Colofonia. Il processo di consolidamento è stato effettuato mediante immersione dei campioni nelle soluzioni impregnanti per un totale di circa tre settimane. Nella tabella 4.2.1 vengono riportate le sigle identificative dei vari campioni e le soluzioni utilizzate nella loro impregnazione. I processi di impregnazione sono stati effettuati alla temperatura di 22 °C (temperatura del laboratorio) per i campioni PC PD, PF e PG. Mentre per i campioni PB e PE la temperatura di impregnazione è stata di 45 °C in quanto a temperature più basse nelle soluzioni erano evidenti fenomeni di smescolamento.

Tabella 4.2.1 soluzioni utilizzate per impregnare i legni di pino degradati da carie bruna.

Nome campioni	Soluzioni impregnanti
PB	Klucel 6,98% in peso in etanolo
PE	Klucel 7,04% in peso in acetone
PC	Colofonia 6,85% in peso in etanolo
PD	Colofonia 29,36% in peso in etanolo
PF	Colofonia 30,37% in peso in acetone
PG	Colofonia 58,57% in peso in acetone

Le misure NT sui legni di pino degradati sono state effettuate sia prima che dopo il consolidamento. Le misure XT sono state effettuate su tutti i campioni consolidati e soltanto su un campione di pino degradato ma non consolidato.

Dopo aver acquisito i dati NT e XT, cioè le proiezioni a diversi angoli, sono state effettuate le ricostruzioni delle sezioni orizzontali mediante il programma Octopus. Ogni misura XT contiene in totale circa 2000 sezioni mentre ogni misura NT ne contiene circa 1000. Per ogni sezione è possibile generare istogrammi, sia della sezione completa che di sue parti; in tali istogrammi vengono riportati i numeri di pixels vs i coefficienti di attenuazione. Tutti gli istogrammi generati sono stati sottoposti a fit con gaussiane che rappresentano le varie fasi presenti.

Per il fit degli istogrammi XT relativi alle sezioni complete del legno non trattato sono state necessarie tre gaussiane: una relativa "all'aria" (gaussiana celeste figura 4.2.1), una al legno primaticcio (gaussiana rossa figura 4.2.1) ed una al legno

Tomografia neutronica applicata allo studio di legni degradati.

tardivo (gaussiana blu figura 4.2.1).

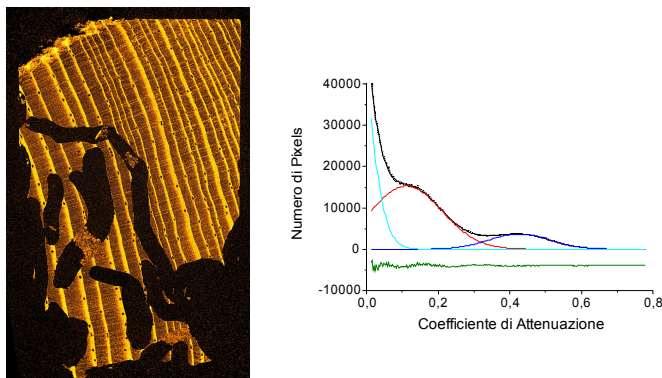


figura 4.2.1 Una sezione e rispettivo fit dell'istogramma XT di un legno di pino degradato non consolidato.

Nel fit degli istogrammi NT relativi alle sezioni complete dei legni non trattati si sono rese necessarie quattro gaussiane: una relativa "all'aria" (gaussiana celeste figura 4.2.2), una al legno primaticcio (gaussiana rossa figura 4.2.2), una al legno tardivo (gaussiana blu figura 4.2.2) ed infine una relativa alla superficie esterna in cui si ha adsorbimento di umidità (gaussiana fucsia figura 4.2.2).

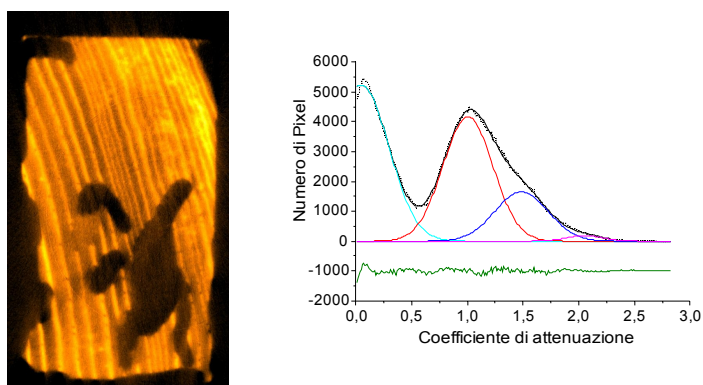


figura 4.2.2 Una sezione e rispettivo fit dell'istogramma NT di un legno di pino degradato non consolidato..

Nel fit degli istogrammi XT relativi alle sezioni complete di tutti i legni consolidati si è fatto uso di quattro gaussiane: una relativa "all'aria" (gaussiana celeste figura 4.2.3), una al legno primaticcio (gaussiana rossa figura 4.2,3) una ad una struttura intermedia tra legno primaticcio e tardivo (gaussiana verde figura 4.2.3) ed infine una relativa al legno tardivo (gaussiana blu figura 4.2.3).

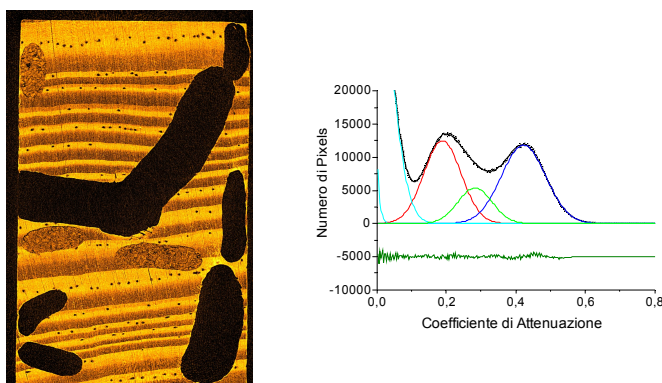


Figura 4.2.3 Una sezione e rispettivo fit dell'istogramma XT di un legno di pino degradato consolidato (PE).

Infine nel fit degli istogrammi NT relativi alle sezioni complete di tutti i legni consolidati si è reso necessario l'uso di cinque gaussiane significative: una relativa "all'aria" (gaussiane celeste figura 4.2.4), una al legno primaticcio interno (gaussiana rossa figura 4.2.4) una relativa al legno tardivo interno (gaussiana blu figura 4.2.4) una al legno primaticcio vicino ai bordi (gaussiana fucsia figura 4.2.4) ed infine una relativa al legno tardivo in prossimità dei bordi (gaussiana gialla figura 4.2.4).

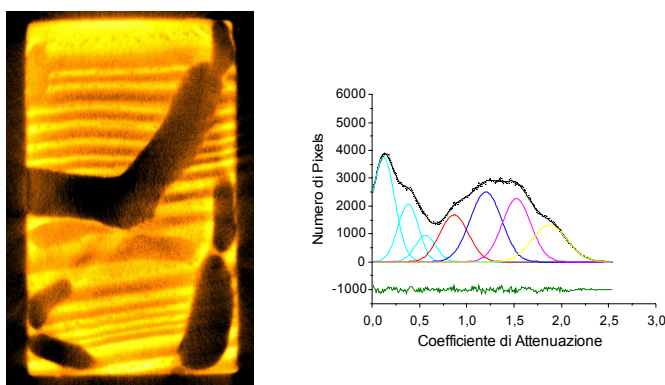


Figura 4.2.4 Una sezione e rispettivo fit dell'istogramma NT di un legno di pino degradato consolidato (PE).

Il fatto che in tutti gli istogrammi la prima parte è relativa "all'aria" e non alla componente legnosa è stata messa in evidenza effettuando confronti tra gli istogrammi relativi alle sezioni complete con quelli relativi ad una porzione della sezione contenente soltanto la componente legnosa. Di seguito nella figura 4.2.5 e figura 4.2.6 è riportato tale confronto prendendo in considerazione la stessa

Tomografia neutronica applicata allo studio di legni degradati.

sezione riportata nelle figure 4.2.3 e 4.2.4.

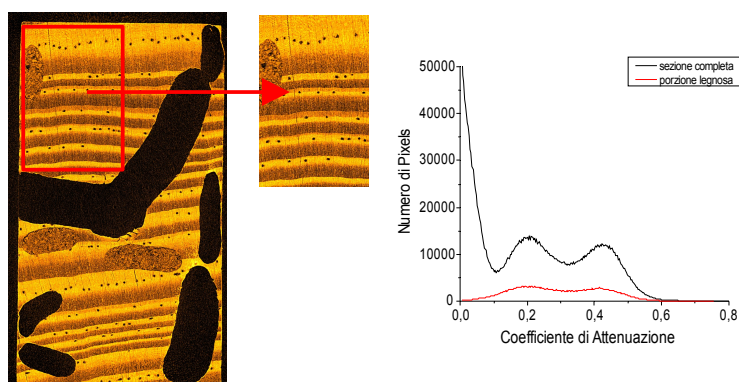


Figura 4.2.5 Confronto tra l'istogramma dell'intera sezione (linea nera) e quello relativo ad una porzione legnosa (linea rossa) della stessa sezione di un legno di pino degradato consolidato (PE) generati mediante XT.

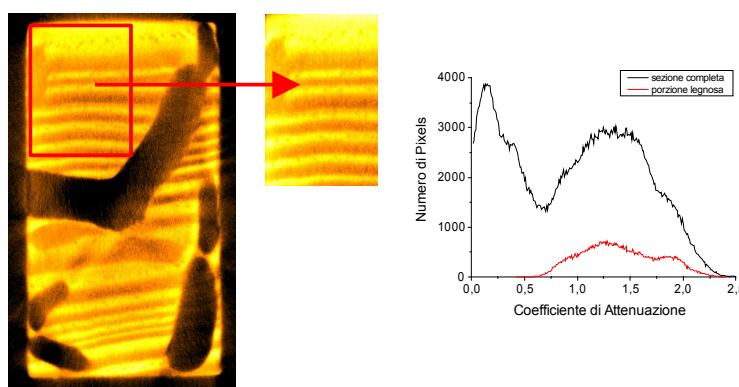


Figura 4.2.6 Confronto tra l'istogramma dell'intera sezione (linea nera) e quello relativo ad una porzione legnosa (linea rossa) della stessa sezione di un legno di pino degradato consolidato (PE) generati mediante NT.

La maggiore sensibilità dei neutroni rispetto ai raggi x nei confronti dei consolidanti è stato messo in evidenza dall'esame comparativo fra gli istogrammi relativi ad una porzione interna ed ad una vicina al bordo di una sezione centrale del legno consolidato, generate da misure di XT e NT. Infatti, si ha che la posizione della gaussiana relativa al legno primaticcio interno non è cambiata rispetto a quella relative al legno primaticcio esterno e così pure per il legno tardivo, quando si usano raggi X (Figura 4.2.7 **a** e **b**); mentre, nel caso dei neutroni, si ha una traslazione delle gaussiane a coefficienti di attenuazione più alti quando vengono presi porzioni di campione vicino ai bordi (Figura 4.2.8 **a** e **b**).

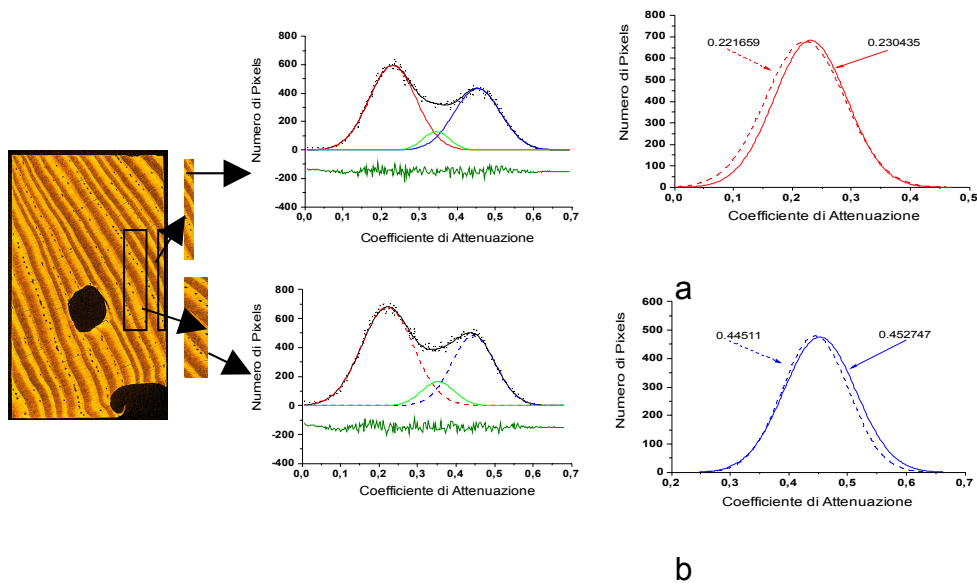


Figura 4.2.7 **a.** Gaussiana relativa ad una porzione interna di legno primaticcio (curva tratteggiata), e gaussiana relativa ad una porzione vicina al bordo di legno primaticcio (curva continua); **b.** gaussiana tratteggiata relativa ad una porzione interna di legno tardivo (curva tratteggiata), e gaussiana relativa ad una porzione vicina al bordo di legno tardivo (curva continua). Tali porzioni sono state prese dalle sezione interna del campione PB generata da misure di XT.

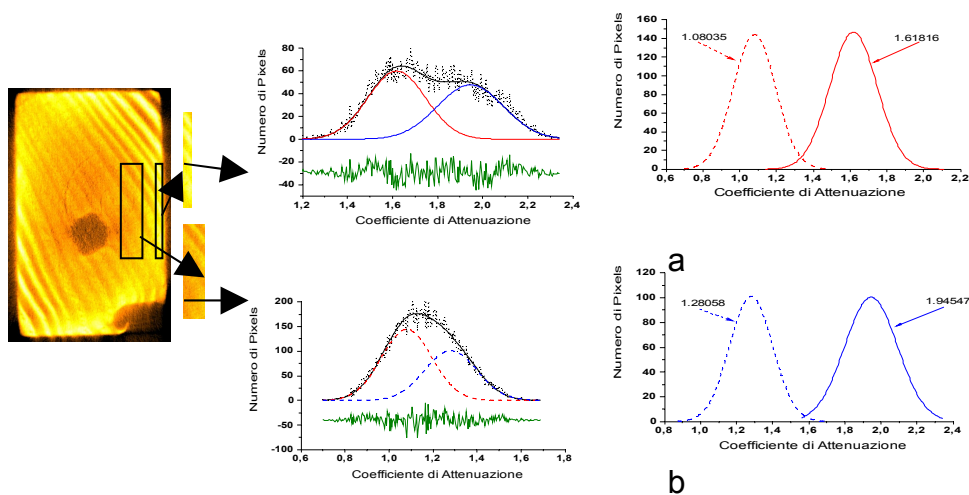


Figura 4.2.8 **a.** Gaussiana relativa ad una porzione interna di legno primaticcio (curva tratteggiata), e gaussiana relativa ad una porzione vicina al bordo di legno primaticcio (curva continua); **b.** gaussiana tratteggiata relativa ad una porzione interna di legno tardivo (curva tratteggiata), e gaussiana relativa ad una porzione vicina al bordo di legno tardivo (curva continua). Tali porzioni sono state prese dalle sezione interna del campione PB generata da misure NT.

Tomografia neutronica applicata allo studio di legni degradati.

La maggior sensibilità dei neutroni, rispetto ai raggi X, nei confronti dei due tipi di legno (primaticcio e tardivo) presi vicino al centro o in prossimità del bordo si verifica naturalmente in tutte e sei i campioni consolidati presi in considerazione (PB, PE, PC, PD, PF e PG). Di seguito nella tabella 4.2.2 vengono riportati i valori di quanto la posizione delle gaussiane relative al legno primaticcio e tardivo in prossimità del centro è traslata rispetto a quelle relative al legno primaticcio e tardivo in prossimità dei bordi. Tale informazione viene ricavata analizzando le stesse porzioni di legno generate dalle misure di NT e XT.

Tabella 4.2.2. Differenza tra la posizione delle gaussiane relative al legno primaticcio e tardivo in prossimità dei bordi e del centro, ricavate dall'analisi dei dati di XT e NT.

	Tomografia raggi x		Tomografia neutronica	
	Differenza tra la posizione delle gaussiane relative al legno primaticcio vicino ai bordi e vicino al centro	Differenza tra la posizione delle gaussiane relative al legno tardivo vicino ai bordi e vicino al centro	Differenza tra la posizione delle gaussiane relative al legno primaticcio vicino ai bordi e vicino al centro	Differenza tra la posizione delle gaussiane relative al legno tardivo vicino ai bordi e vicino al centro
PB	0,0088	0,0076	0,5378	0,6649
PE	0,0085	0,0020	0,2322	0,2620
PC	0,0006	0,0049	0,1506	0,2217
PD	0,0106	0,0127	0,5707	0,5373
PF	0,1911	0,0293	0,7725	0,7070
PG	0,0230	0,0070	0,8743	1,0623

Per quanto riguarda i dati XT, per ogni campione sono state prese porzioni interne di sezioni equidistanti l'una dall'altra 0,72 mm e sono stati generati gli istogrammi. Alcune sezioni relative alle estremità superiori ed inferiori del campione sono state tolte in quanto erano quelle zone in cui naturalmente si era addensato maggiormente il consolidante e poiché una estremità era ancorata mediante una colla al porta campione. Su tutti gli istogrammi è stato effettuato il fit mediante gaussiane. Per quanto riguarda gli istogrammi relativi al campione di pino non trattato il fit è stato effettuato con due gaussiane mentre per i legni trattati sono state utilizzate tre gaussiane. Di seguito, nella figura 4.2.9, vengono riportati i risultati di tali fit, cioè la posizione delle gaussiane in funzione delle sezioni quindi in funzione della distanza dato che ogni sezione è equidistante 0,72 mm e si inizia da una estremità sino ad arrivare all'altra. In particolare la figura 4.2.9 **a** è relativa al legno di pino non trattato mentre le figure 4.2.9 **b, c, d, e, f, e g** sono relative ai

campioni PB, PE, PC, PD, PF e PG. Dai risultati dei fit possiamo dire che i raggi X riescono a distinguere un legno consolidato da uno non consolidato, ma non sono così sensibili da dare indicazioni sulla diffusione del consolidante all'interno del campione. Per quel che riguarda i dati NT, nel caso dei campioni consolidati, sono state prese le stesse porzioni interne investigate con la XT, mentre per i campioni non consolidati è stato analizzato un minor numero di sezioni. Come nel caso della NT nel fit dei campioni non trattati sono state usate due gaussiane mentre in quelli trattati sono state usate tre gaussiane. I risultati della analisi dei dati NT, riportati nelle figure 4.2.10, 4.2.11 e 4.2.12, dimostrano che i neutroni sono sensibili all'entità di degrado, al tipo di consolidante e alla sua diffusione all'interno del campione.

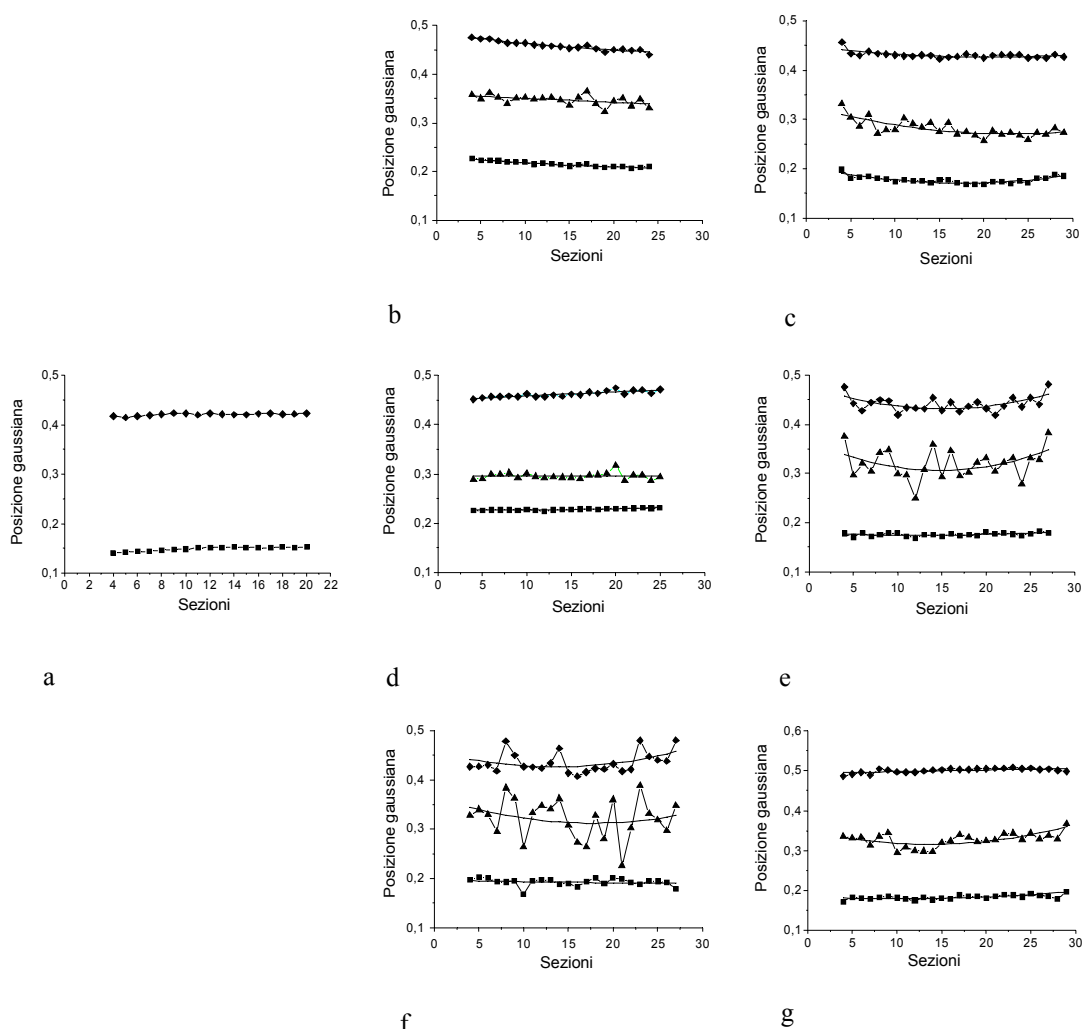


Figura 4.2.9 Risultati dei fit fatti su istogrammi relativi a porzioni interne di sezioni equidistanti l'una dall'altra 0,72 mm dei campioni - **a** pino non trattato - **b** PB - **c** PE - **d** PC - **e** PD - **f** PF e - **g** PG.

Tomografia neutronica applicata allo studio di legni degradati.

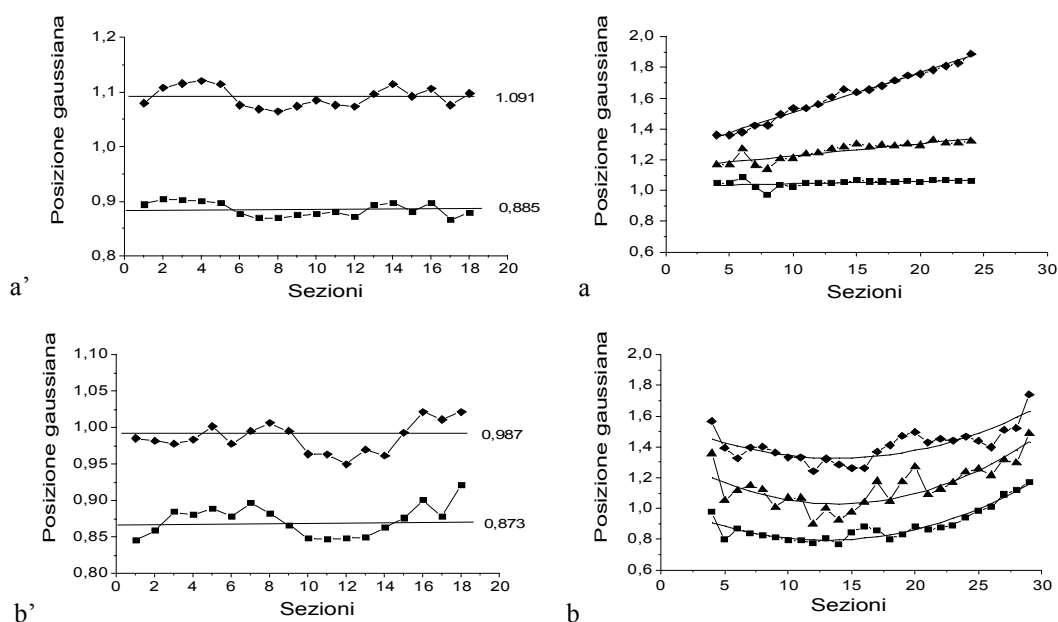


Figura 4.2.10 Risultati dei fit fatti su istogrammi relativi a porzioni interne di sezioni equidistanti l'una dall'altra 0,72 mm per i campioni consolidati e equidistanti l'una dall'altra circa 1,02 mm per i campioni non trattati - **a'** campione PB non trattato - **a** campione PB trattato- **b'** campione PE non trattato e - **b** campione PE trattato.

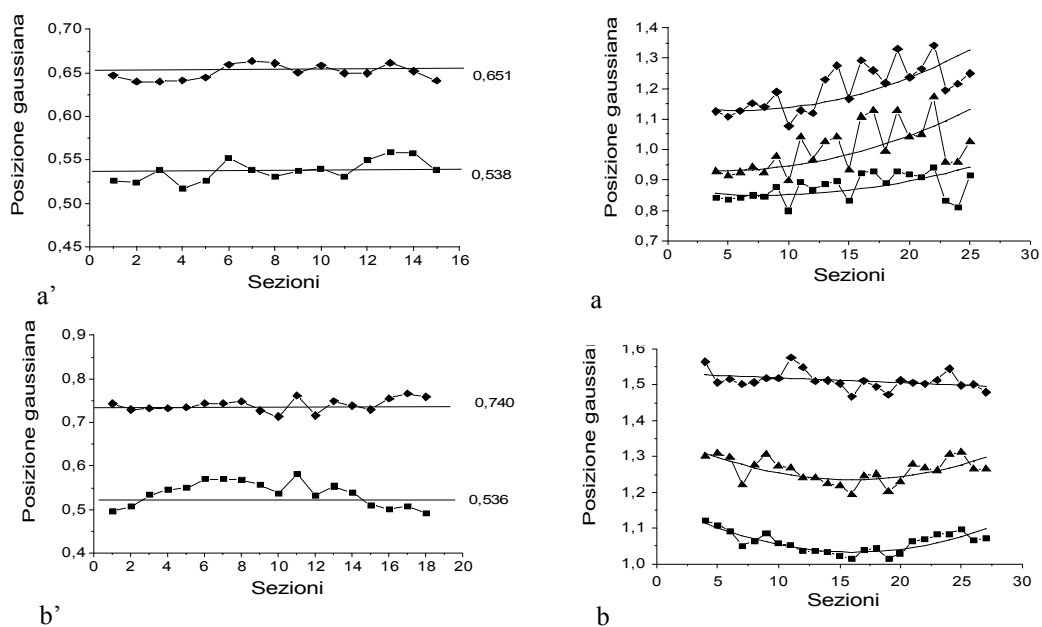


Figura 4.2.11 Risultati dei fit fatti su istogrammi relativi a porzioni interne di sezioni equidistanti l'una dall'altra 0,72 mm per i campioni consolidati e equidistanti l'una dall'altra circa 1,02 mm per i campioni non trattati - **a'** campione PC non trattato - **a** campione PC trattato- **b'** campione PD non trattato e - **b** campione PD trattato.

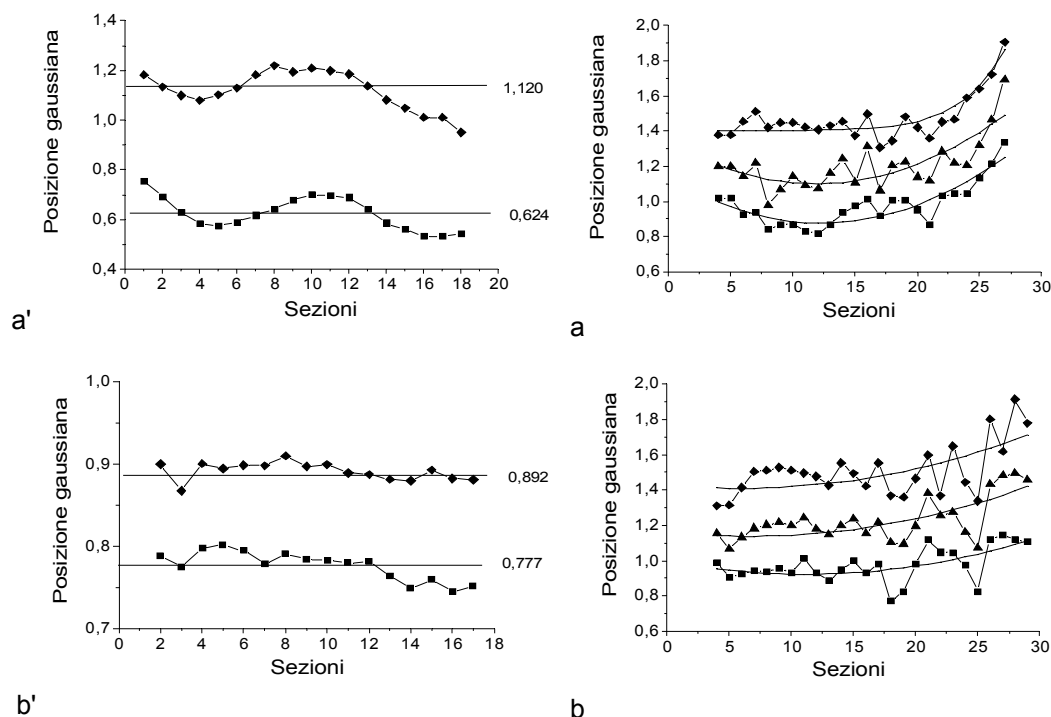


Figura 4.2.12 Risultati dei fit fatti su istogrammi relativi a porzioni interne di sezioni equidistanti l'una dall'altra 0,72 mm per i campioni consolidati e equidistanti l'una dall'altra circa 1,02 mm per i campioni non trattati - **a'** campione PF non trattato - **a** campione PF trattato- **b'** campione PG non trattato e - **b** campione PG trattato.

4.3 Radiografia e Tomografia neutronica

Legni di abete e di castagno impregnati con H₂O sono stati posti in una vaschetta contenente D₂O fino a pescare per 1 cm e sono state fatte misure di Radiografia Neutronica (NR), cioè sono state acquisite le proiezioni del campione in funzione del tempo. Da tali indagini è stato possibile ottenere informazioni sullo scambio tra la H₂O e la D₂O (Figura 4.3.1). Inoltre, come riportato nella figura 4.3.2, sono stati generati gli istogrammi relativi ad una zona bassa ed una media e una alta delle varie radiografie in modo mettere maggiormente in risalto la diversa composizione della miscela "H₂O:D₂O" nel tempo.

Tomografia neutronica applicata allo studio di legni degradati.

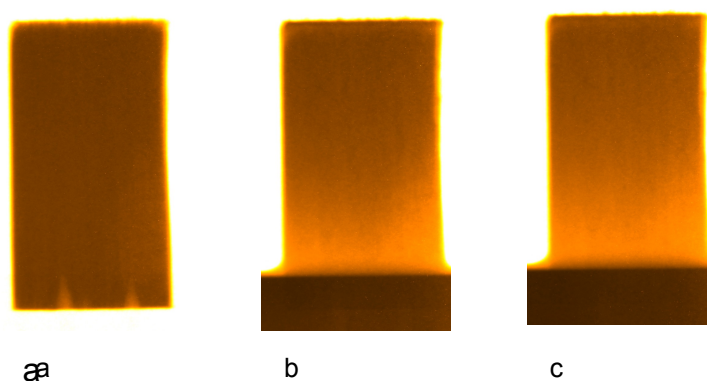


Figura 4.3.1 Radiografie neutroniche a tempi diversi di un legno di Castagno impregnato con H₂O posto in un vaschetta con D₂O – **a** tempo zero – **b** dopo un'ora - **c** dopo due ore .

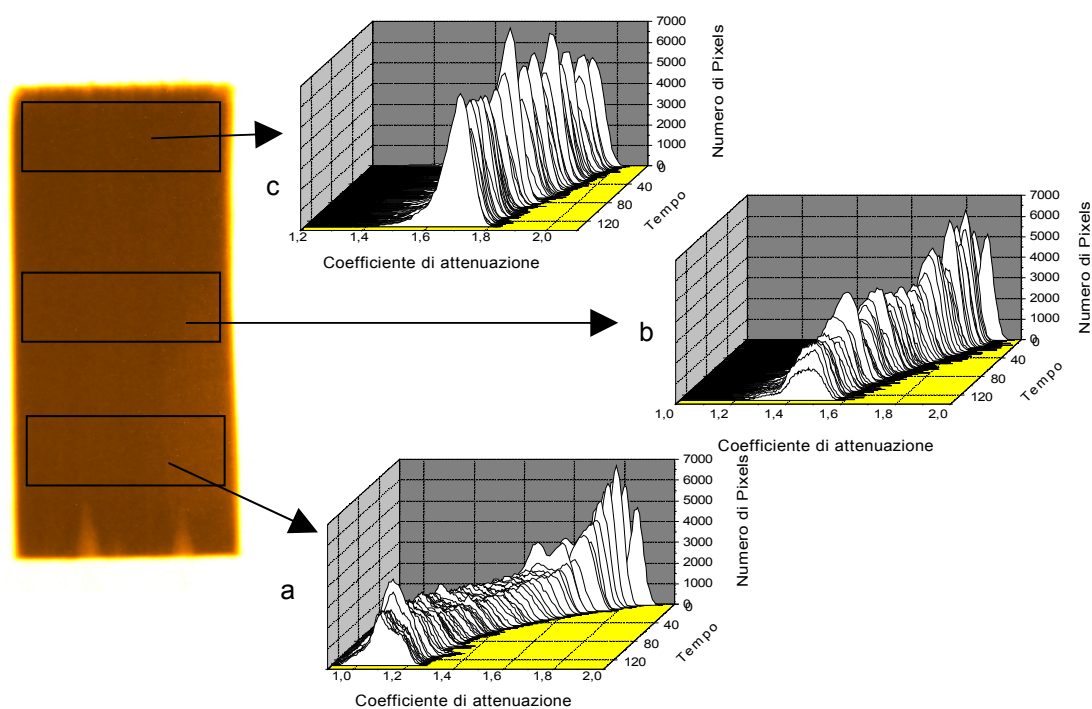


Figura 4.3.2. Istogrammi relativi ad una zona bassa (a) ed una media (b) e una alta (c) delle radiografie registrate in funzione del tempi.

Due campioni di legno di abete e due di castagno (dimensione 1x1x2,5 cm³) che erano stati posti in acqua deionizzata per tre anni, poiché non presentavano degrado, sono stati posti in stufa alla temperatura di 103°C sino ad arrivare ad un

peso costante, in modo da eliminare tutta l'acqua. Successivamente due dei suddetti campioni di legno uno di abete e uno di castagno sono stati immersi in PEG400 per circa 3 settimane. Misure NT sono state fatte sui campioni asciutti e quelli consolidati con PEG400. Dalla elaborazione dei dati di NT sui suddetti campioni si è arrivati alla conclusione che il PEG riesce a penetrare in tutto il campione disponendosi maggiormente nelle parti più esterne. Si è arrivati a tale conclusione effettuando (figura 4.3.3 e figura 4.3.4):

- il confronto tra la posizione delle gaussiane relative al legno primaticcio e al legno tardivo del campione asciutto e quelli relative ad una sezione centrale dei campioni consolidati;
- e dall'andamento della posizione delle gaussiane relative al legno primaticcio e tardivo in funzione delle sezioni.

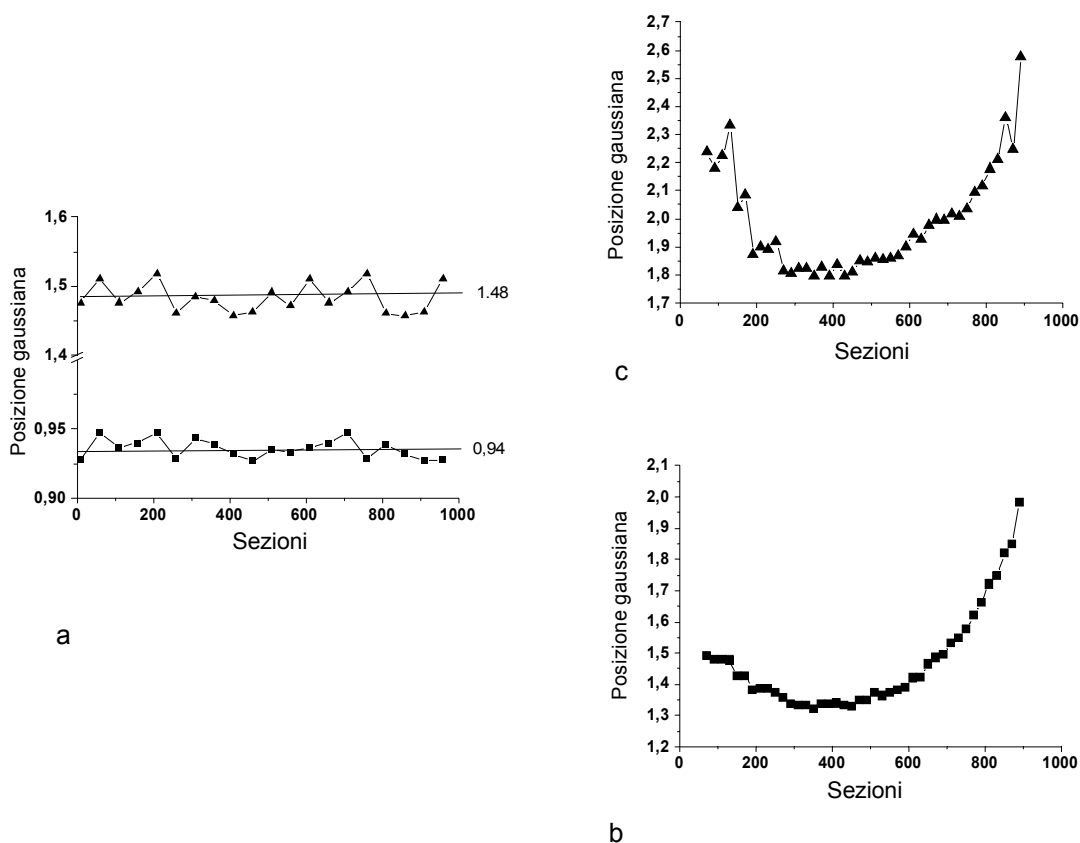


Figura 4.3.3. - **a** risultati dei fit degli istogrammi relative ad alcune sezioni del legno di abete asciutto - **b** e **c** risultati dei fit degli istogrammi relative ad alcune sezioni del legno di abete trattato con PEG400; in particolare il grafico b è la posizione della gaussiana relativa al legno primaticcio in funzione delle sezioni, mentre il grafico c è relativo al legno tardivo.

Tomografia neutronica applicata allo studio di legni degradati.

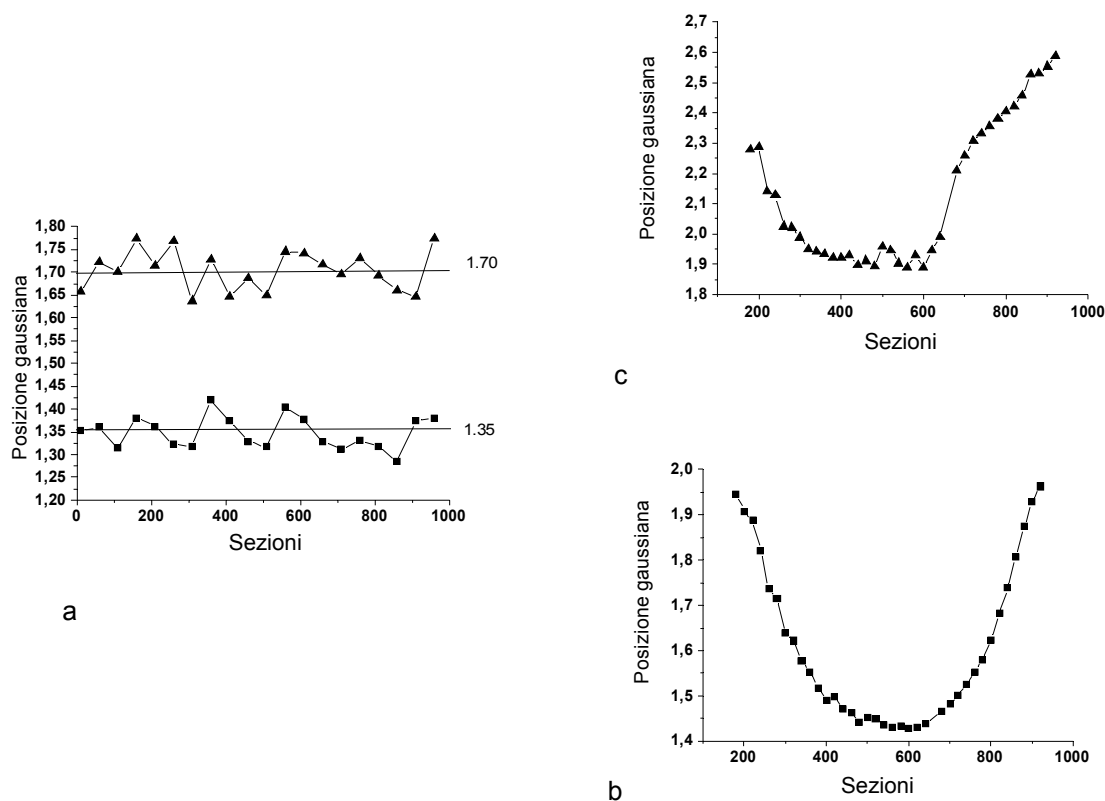


Figura 4.3.4. - **a** risultati dei fit degli istogrammi relative ad alcune sezioni del legno di castagno asciutto - **b** e **c** risultati dei fit degli istogrammi relative ad alcune sezioni del legno di castagno trattato con PEG400; in particolare il grafico b è la posizione della gaussiana relativa al legno primaticcio in funzione delle sezioni, mentre il grafico c è relativo al legno tardivo.

Come detto precedentemente nel paragrafo 4.2, una volta effettuate le misure NT, mediante il programma Octopus sono state effettuate le ricostruzioni delle sezioni orizzontali. Tali sezioni orizzontali possono essere caricate mediante il programma Vgstudio ed ottenere l'immagine 3D del campione. Tale programma permette inoltre di effettuare la segmentazione, cioè si selezionare alcune parti dell'istogramma e quindi poter associare alle varie parti dell'istogramma le corrispondenti fasi. Di seguito, nella figura 4.4.5 viene riportato in posizione **a** e **b** l'istogramma e l'immagine dell'intero campione di legno di abete asciutto, in posizione **c** l'immagine relativa alla prima parte dell'istogramma **a**, cioè il legno primaticcio, e in posizione **d** l'immagine relativa alla seconda parte dell'istogramma **a**, cioè il legno tardivo.

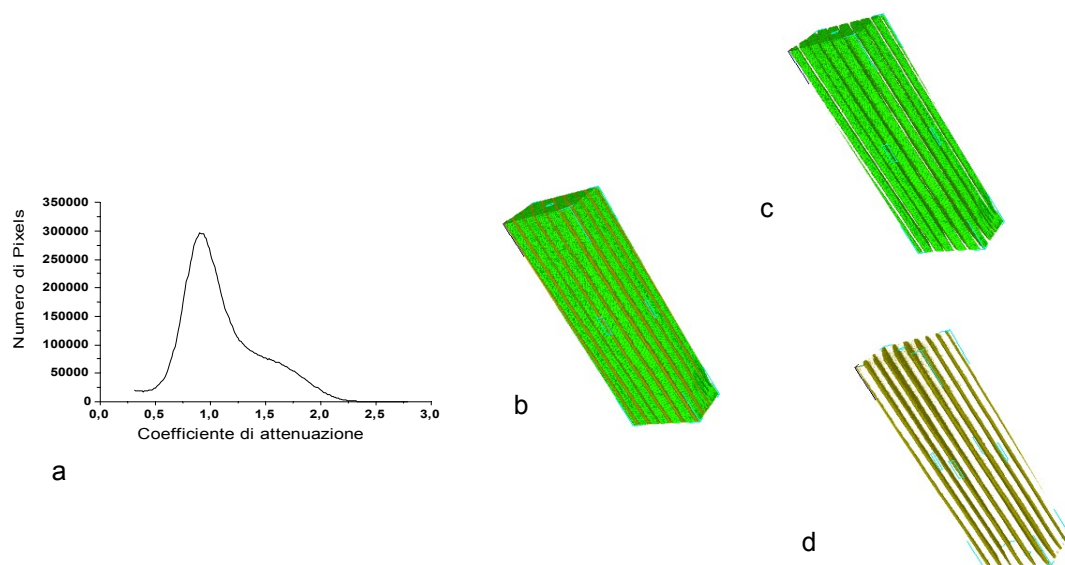


Figura 4.3.5 - **a** e **b** istogramma e immagine dell'intero campione di legno di abete asciutto - **c** l'immagine relativa alla prima parte dell'istogramma a cioè il legno primaticcio - **d** l'immagine relativa alla seconda parte dell'istogramma a cioè il legno tardivo.

Oltre ed effettuare la segmentazione è possibile tagliate il campione in modo da comprendere come la fase selezionata nell'istogramma, relativo al campione completo, sia distribuita. Di seguito nella figura 4.4.6 viene riportata la distribuzione del componente relativo alla seconda parte dell'istogramma relativo al legno di abete consolidato con PEG400; in particolare in posizione **a** viene riportata la parte interna, nella posizione **b** la parte interna più due estremità infine in posizione **c** l'intero campione.

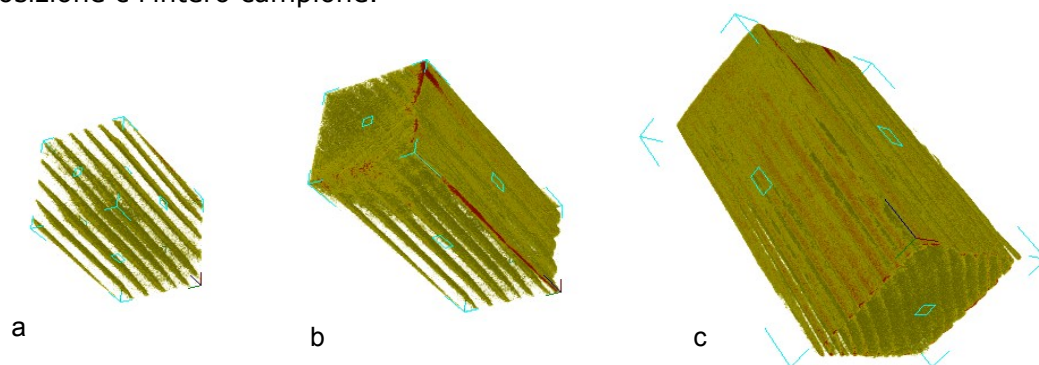


Figura 4.3.6 Distribuzione del componente relativo alla seconda parte dell'istogramma relativo al legno di abete consolidato con PEG400. - **a** la parte interna - **b** parte interna più due estremità - **c** l'intero campione.

Tomografia neutronica applicata allo studio di legni degradati.

4.4 Complementarietà XT e NT

XT e NT sono due tecniche non distruttive complementari per quanto riguarda la loro applicazione sui materiali lignei. Infatti con XT si ottengono immagini con una maggiore risoluzione spaziale mentre NT è molto più sensibile al consolidante che penetra all'interno del legno.

XT per quanto riguarda i legni degradati (Figura 4.4.1) permette di visualizzare in modo molto chiaro e netto, il legno primaticcio, il legno tardivo, le cavità naturali del legno, le cavità che si sono formate in seguito al degrado e le cavità in cui si sono depositati i prodotti derivanti dal degrado del legno da parte della carie bruna. Inoltre come mostrato nelle figure 4.4.1 **b** e **c** nel caso dei legni non degradati XT ci permette di distinguere tra un legno di conifera (abete) e un legno di latifoglia (castagno). Tali legni sono caratterizzati da strutture microscopiche differenti.

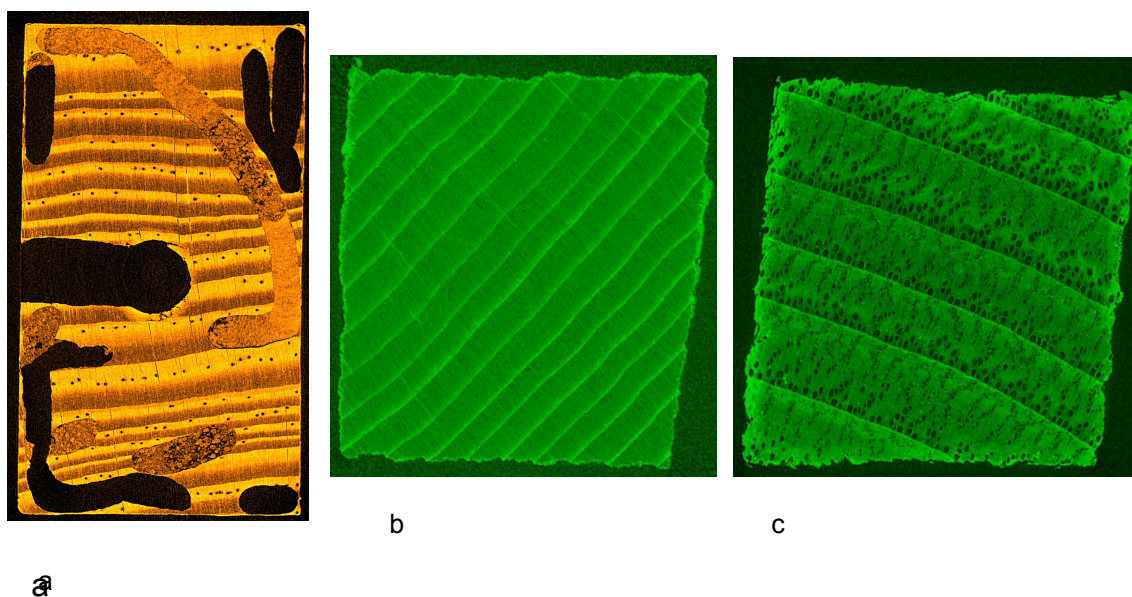
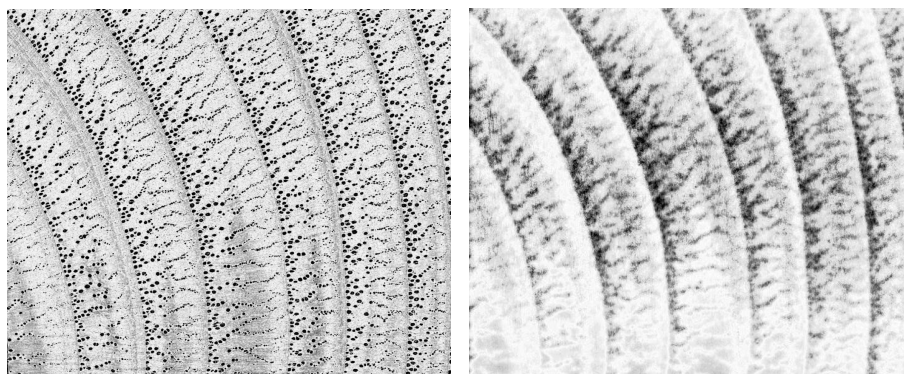


Figura 4.4.1 - **a** immagine relativa ad una sezione di legno di pino degradato - **b** immagine relativa ad una sezione di legno di abete - **c** immagine relativa ad una sezione di legno di castagno.

NT invece, rispetto a XT, è molto più sensibile al contenuto in umidità (figura 4.4.2) e al consolidante (figura 4.4.3); infatti le immagini generate con NT presentano una maggiore variazione cromatica. Inoltre, in questi casi, possiamo affermare che la minore risoluzione delle immagini generate con NT sia legata anche alla maggiore sensibilità della sonda neutronica al contenuto idrogenionico, in quanto ciò

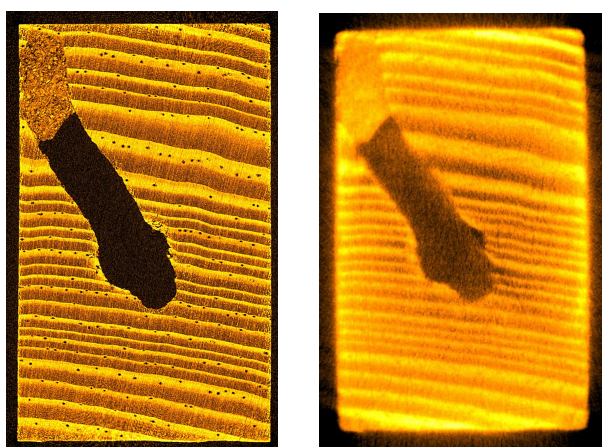
determina un minore contrasto tra le varie zone quindi una minore "chiarezza" dell'immagine (figura 4.4.2 b).



a

b

Figura 4.4.2 - a immagine relativa ad una sezione di legno di castagno con un certo contenuto di umidità generata mediante XT - b immagine relativa ad una sezione di legno di castagno con un certo contenuto di umidità generata mediante NT.



a

b

Figura 4.4.3 - a immagine relativa ad una sezione di legno di pino consolidato con colofonia (PD) generata mediante XT - b immagine relativa ad una sezione di legno di pino consolidato con colofonia (PD) generata mediante NT.

Capitolo 5

Tomografia neutronica applicata allo studio di rocce metamorfiche – Marmi.

5.1 Introduzione

Tra i materiali di interesse archeologico ritroviamo una grande varietà di pietre usate nella costruzione di edifici, monumenti, statue e altri oggetti di interesse archeologico e culturale. Tra i materiali lapidei di interesse archeologico e culturale particolarmente diffusi sono i marmi bianchi e quelli colorati.

Negli studi archeologici e storico-artistici con il termine marmi di intendono anche altre rocce che non sono tali dal punto di vista geologico e chimico; tali rocce sono: i graniti, i porfidi, le dioriti, i basalti, gli alabastri etc.

La provenienza di oggetti in pietra è di fondamentale importanza per gli archeologi quando vengono studiate le loro correlazioni con gli eventi storici e i contatti sociali tra le diverse culture. Ad esempio, nella civiltà egizia venivano utilizzate diverse varietà di pietre come i graniti, le dioriti, i basalti, gli alabastri per realizzare vasi rituali; nella scultura greca era largamente diffuso l'uso di marmi bianchi, infatti la Grecia era ricca di cave di marmo, con numerose varietà pregiate di marmi bianchi (pentelico, tasio, nassio, pario); durante l'Impero Romano vengono utilizzati oltre ai marmi bianchi anche quelli colorati (Borghini 1992; De Nuccio M. 2002; Lazzarini L 2004). Quest'ultimi vennero utilizzati, prima in frammenti inseriti in tessiture a mosaico, e poi in grandi lastre, per i rivestimenti parietali e pavimenti degli interni delle ricche dimore patrizie. Tra i marmi colorati i più diffusi erano: il marmo giallo antico, l'africano, il pavonazzetto, il cipollino e il marmo rosso antico. Intorno al II

secolo a.C i romani iniziarono lo sfruttamento delle cave di Luni (oggi il marmo prodotto da queste cave viene chiamato "marmo di Carrara") che sostituirà i marmi bianchi importati dalla Grecia. Inoltre durante l'impero romano dopo la conquista dell'Egitto vengono importate anche delle pietre egiziane come porfiridi, basalti, alabastrini etc.

Di seguito vengono riportate le misure di Tomografia Neutronica fatti su "marmi" provenienti da Villa Adriana (figura 5.1.1), a Tivoli (Roma). Villa Adriana è un insieme di edifici classici progettati e costruiti nel II secolo d.C dall'imperatore romano Adriano; questa villa è stata inserita nella lista del Patrimonio dell'Umanità dall'UNESCO. Su alcuni campioni oltre le misure di tomografia neutronica (NT) sono state effettuate anche misure di diffrazione neutronica (ND) riportate nella tesi di Dottorato in fisica di Giulia Festa (Festa G. 2009). Quindi su tali campioni sarà effettuato un confronto delle due tecniche.



Figura 5.1.1. immagine di Villa Adriana.

5.2 Elaborazione dei dati di NT sui campioni di Villa Adriana

Su tutti i dati di tomografia neutronica, relativi ai vari campioni provenienti da Villa Adriana, prima sono stati generati gli istogrammi dell'intero campione e poi quelli di una porzione interna. Su tutti gli istogrammi è stato effettuato il fit con gaussiane; ad ogni gaussiana è stata associata una fase del sistema che avrà una certa composizione chimica (figura 5.2.1. a').

Oltre a generare gli istogrammi dell'intero campione sono stati generati quelli relativi ad una porzione interna, in quanto dalle immagini delle varie sezioni di ogni campione e dai corrispondenti istogrammi si notava che i bordi erano caratterizzati da

Tomografia neutronica applicata allo studio di rocce metamorfiche – Marmi.

coefficienti di attenuazione più alti; ciò si può spiegare considerando che le parti estreme dei campioni erano quelle zone che avevano subito uno stress di tipo meccanico dovuto al campionamento. A titolo di esempio, nella figura 5.2.1 riportiamo le immagini e i rispettivi istogrammi di una sezione interna del campione V5 di una porzione interna di tale sezione e di quella relativa ad una sua estremità.

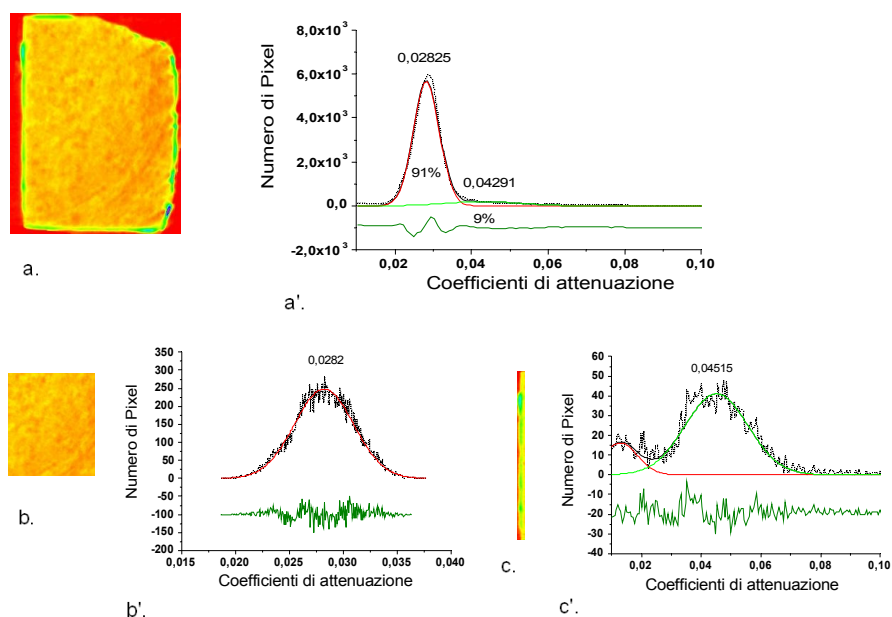



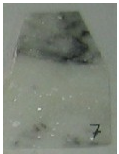















Figura 5.2.1. **a. a'**. immagine e istogramma relativo ad una sezione interna del campione V5 - **b. b'**. immagine e istogramma relativo ad una porzione interna dell'immagine a. - **c. c'**. immagine e istogramma relativo ad una estremità dell'immagine a.




Di seguito riportiamo la tabella 5.2.1 in cui sono inseriti i nomi, le foto, le fasi, il valore dei coefficienti di attenuazione μ (posizioni delle gaussiane) e le percentuali (%) delle fasi che si ricavano dalla analisi dei dati di tomografia neutronica (NT) dei campioni di Villa Adriana.

Tabella 5.2.1 Risultati dell'analisi dei dati di NT sui campioni di Villa Adriana.

Nome	Foto	Risultati di NT
V18		Due fasi $\mu = 0,029$ 48% $\mu = 0,035$ 52%
V5		Una fase $\mu = 0,028$ 100%
V8		Una fase $\mu = 0,033$ 100%
V7		Due fasi $\mu = 0,033$ 91% $\mu = 0,035$ 9%
V13		Due fasi $\mu = 0,038$ 90% $\mu = 0,048$ 10%
V16		Due fasi $\mu = 0,038$ 79% $\mu = 0,043$ 21%
V19		Due fasi $\mu = 0,039$ 85% $\mu = 0,046$ 15%
V21		Tre fasi $\mu = 0,037$ 46% $\mu = 0,045$ 33% $\mu = 0,09$ 21%

Tomografia neutronica applicata allo studio di rocce metamorfiche – Marmi.

Nome	Foto	Risultati di NT
V6		Due fasi $\mu = 0,047$ 89% $\mu = 0,060$ 11%
V3		Tre fasi $\mu = 0,041$ 53% $\mu = 0,047$ 32% $\mu = 0,069$ 15%
V1		Due fasi $\mu = 0,040$ 68% $\mu = 0,047$ 32%
V9		Due fasi $\mu = 0,039$ 94% $\mu = 0,057$ 6%
V11		Due fasi $\mu = 0,034$ 75% $\mu = 0,037$ 25%
V12		Tre fasi $\mu = 0,035$ 64% $\mu = 0,040$ 28% $\mu = 0,058$ 8%
V15		Due fasi $\mu = 0,040$ 89% $\mu = 0,044$ 11%
V17		Due fasi $\mu = 0,038$ 89% $\mu = 0,044$ 11%
V20		Due fasi $\mu = 0,036$ 64% $\mu = 0,038$ 36%

Nome	Foto	Risultati di NT
V4		Tre fasi $\mu = 0,066$ 8% $\mu = 0,075$ 87% $\mu = 0,086$ 9%
V10		Tre fasi $\mu = 0,029$ 2% $\mu = 0,044$ 82% $\mu = 0,051$ 16%
V14		Tre fasi $\mu = 0,099$ 40,5% $\mu = 0,12$ 25,5% $\mu = 0,14$ 34%

Dai dati di tomografia neutronica oltre a definire le fasi e le percentuali che compongono il campione è possibile rappresentarlo in 3D e vedere come queste fasi sono disposte al suo interno. A titolo di esempio, riportiamo nella figura 5.2.2 le ricostruzioni 3-D dei campioni V18 e V14. Nella figura 5.2.2 a. la componente gialla è soltanto esterna ed è dovuta allo stress meccanico che il marmo ha subito durante il campionamento.

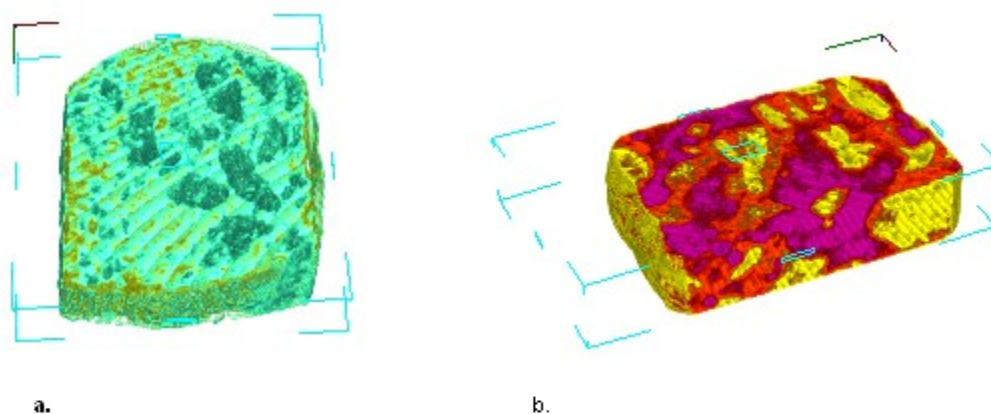


Figura 5.2.2. **a.** Ricostruzione 3-D del campione V18 - **b.** Ricostruzione 3-D del campione V14

Tomografia neutronica applicata allo studio di rocce metamorfiche – Marmi.

5.3 Confronto NT e ND

Dal confronto dei risultati di NT e ND, riportati nella tabella 5.3.1, si arriva alle seguenti conclusioni:


1. nel caso di marmi bianchi la NT e ND danno gli stessi risultati; negli altri casi il fatto che non diano o le stesse fasi o le stesse percentuali o entrambe è legato al fatto che con la NT vengono analizzati campioni molto più grandi rispetto alla ND e che la NT è sensibile ai componenti accessori e alla loro distribuzione nel campione. Ad esempio sul campione V9 è stata effettuata la ND di porzioni differenti; grazie a ciò è stato possibile vedere che la vena presente nel campione è costituita da due fasi, calcite e quarzo, in accordo con la NT (tabella 5.3.2);
2. inoltre mentre la ND ci dà informazione solo sui componenti cristallini che costituiscono il campione lapideo la tomografia neutronica è sensibile anche ai componenti, detti accessori, che conferiscono al marmo un determinato colore. Da calcoli teorici dei coefficienti di attenuazione, considerando una lunghezza d'onda di 8 Å e una densità di 2,7 g/cm³, si è visto che la calcite CaCO₃, ha un coefficiente di attenuazione di 0,033 cm⁻¹; se il 5% di calcio viene sostituito da ferro il coefficiente di attenuazione diviene 0,04 cm⁻¹;

Tabella 5.3.1 Risultati dell'analisi di ND e NT sui campioni di Villa Adriana.

Nome	Risultati di ND	Risultati di NT
V5	Una fase cristallina 100 % dolomite	Una fase $\mu = 0,028$ 100%
V8	Una fase cristallina 100 % calcite	Una fase $\mu = 0,033$ 100%
V9	Una fase cristallina 100 % calcite	Due fasi $\mu = 0,039$ 94% $\mu = 0,057$ 6%
V17	Due fasi cristalline 97,9 % calcite 2,1 % quarzo	Due fasi $\mu = 0,038$ 89% $\mu = 0,044$ 11%

Nome	Risultati di ND	Risultati di NT
V15	Tre fasi cristalline 96,9 % calcite 0,1 % quarzo 3 % plagioclasio	Due fasi $\mu = 0,040$ 89% $\mu = 0,044$ 11%
V12	Due fasi cristalline 93,4 % calcite 6,6% plagioclasio	Tre fasi $\mu = 0,035$ 64% $\mu = 0,040$ 28% $\mu = 0,058$ 8%
V19	Tre fasi cristalline 57,2 % calcite 38,5 % mica 4,3 % quarzo	Due fasi $\mu = 0,039$ 85% $\mu = 0,046$ 15%
V4	Tre fasi cristalline 80,9 % mica 15,8 % calcite 3,3 % quarzo	Tre fasi $\mu = 0,066$ 8,0% $\mu = 0,075$ 87% $\mu = 0,086$ 9,0%
V14	Tre fasi cristalline 83 % plagioclasio 1,5 % quarzo 15,5 % ortoclasio	Tre fasi $\mu = 0,099$ 40,5% $\mu = 0,120$ 25,5% $\mu = 0,140$ 34,0%
V10	Sei fasi cristalline 42,2 % plagioclasio 34,2 % ortoclasio 8,1 % mica 7,8% hornblende 3,4 % quarzo 2,3 % hematite	Tre fasi $\mu = 0,029$ 2,0% $\mu = 0,044$ 82% $\mu = 0,051$ 16%

Tabella 5.3.2 Risultati dell'analisi di ND a diverse posizioni e NT sul campione V9.

	Risultati di ND			Risultati di NT
	posizione	calcite	quarzo	Due fasi $\mu = 0,039$ 94% $\mu = 0,057$ 6%
	0 mm	100	—	
	5 mm	97,2	2,8	
	15 mm	100	—	
	25 mm	100	—	
	35 mm	100	—	
	45 mm	100	—	

Tomografia neutronica applicata allo studio di rocce metamorfiche – Marmi.

5.4 Campione V18

Il campione V18 è un marmo bianco abbastanza omogeneo (figura 5.4.1 **a**). L'immagine di una sezione interna ottenuta mediante NT, mostra chiaramente la presenza di due componenti (figura 5.4.1 **b**). Il corrispondente istogramma (figura 5.4.1 **c**) consente di valutare le percentuali relative (molto simili) dei due componenti. Al fine di definire la composizione chimica, è risultato utile il confronto fra la posizione delle due gaussiane utilizzate per il fit dell'istogramma relativo al campione V18 (figura 5.4.2 **a**) e quelle usate per i campioni V5 e V8 (figura 5.4.2 **b** e **c**), per i quali erano disponibili anche i risultati ND. Pertanto si è potuto concludere che il campione V18 è un marmo costituito da Calcite e Dolomite.

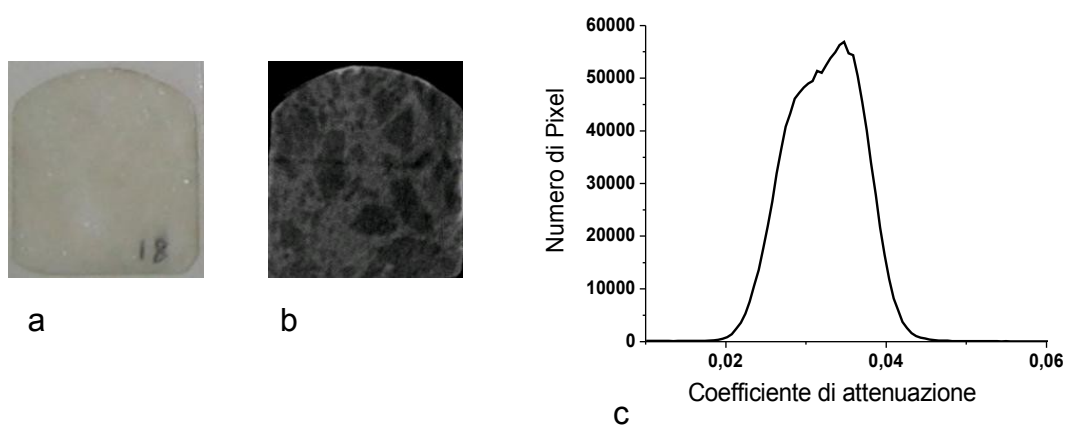


Figura 5.4.1. **a.** foto del campione V18 – **b.** immagine di NT del campione V18 – **c.** istogramma relativo alla figura 5.4.1. b.

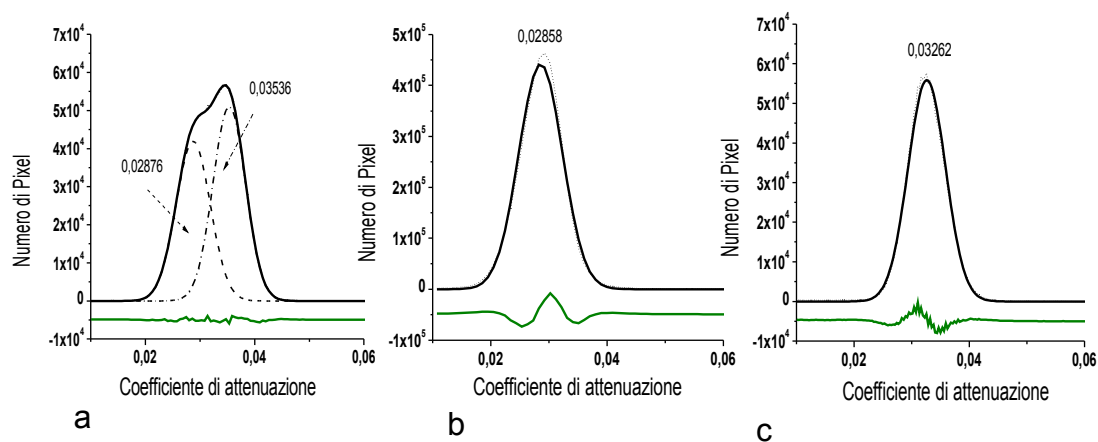


Figura 5.4.2. **a.** fit dell'istogramma relativo al campione V18 – **b.** fit dell'istogramma relativo al campione V5 – **c.** fit dell'istogramma relativo al campione V8.

Bibliografia

- Borghini G. 1992. *Marmi antichi*. Materiali della cultura artistica I.
- De Nuccio M., Unguro L., Pensabene P., Lazzarini L. 2002. *I marmi colorati della Roma Imperiale*. Catalogo della mostra, Roma, pp.108-121.
- Festa G. 2009. Neutron-based imaging applied to cultural Heritage. Tesi di dottorato in Fisica, Università degli Studi di Roma 'Tor Vergata', pp. 121-128.
- Lazzarini L., Antonelli F. 2004. *L'identificazione del marmo costituente manufatti antichi*. Pietre e marmi antichi. Cedam, Padova, pp. 66-71.

Capitolo 6

Tomografia Neutronica applicata allo studio di reperti subacquei

6.1 Introduzione

Lo scopo di chi fa studi su oggetti considerati beni culturali è quello di comprendere il periodo di origine, il processi di produzione, le applicazioni e gli usi del reperto e di preservarli per le generazioni future. Tra le varie tecniche di investigazione non distruttive, la tomografia neutronica (NT) è un ottima ed in alcuni casi l'unica tecnica che permette di stabilire l'entità di degrado, la struttura interna e le fasi che costituiscono il reperto, questo grazie al fatto che i neutroni sono molto penetranti. Negli ultimi anni si è riscontrato molto interesse nella protezione, conservazione e valorizzazione dei reperti provenienti dal "mondo sommerso", sia da parte della comunità Europea che da quella mondiale; basti pensare alla Convenzione delle Nazioni Unite sulla Legge del Mare (1982) e alla Convenzione UNESCO sulla protezione dei Beni Culturali sommersi (2001).

Dato l'interesse nella tutela e nella valorizzazione dei beni sommersi e poiché il nostro scopo è quello di cercare di dimostrare le potenzialità della tomografia neutronica applicata ai beni culturali si è deciso: di effettuare misure di NT su reperti subacquei forniteci dalla Soprintendenza del Mare di Palermo. Di seguito riportiamo alcuni esempi che riteniamo facciano comprendere importanza della NT applicata ai beni culturali.

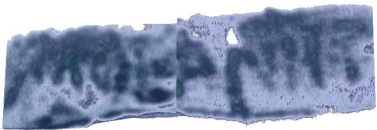
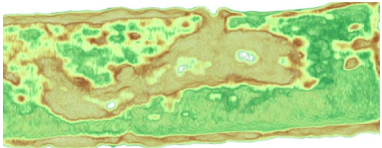
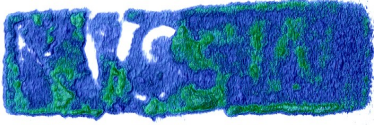
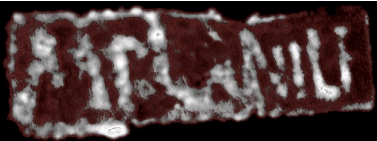
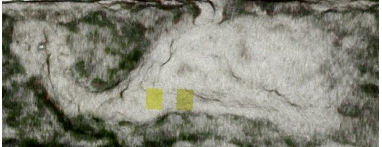
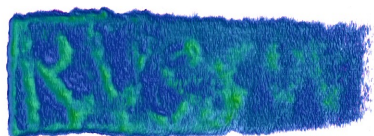
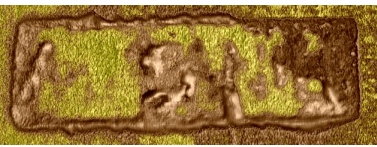
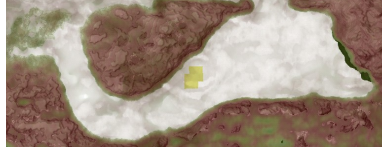
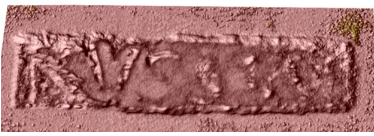
6.2 *Lingotti di piombo di epoca romana*

Gli archeologi mostrano che tra la fine del secondo secolo avanti Cristo e metà del primo secolo dopo Cristo l'uso del piombo da parte dell'impero romano crebbe velocemente in seguito sia all'incremento del commercio marittimo sia all'incremento delle costruzioni edili. Nel primo caso il piombo veniva usato per equipaggiare le navi, in particolare per il rivestimento dello scafo, mentre nel secondo caso esso veniva usato per costruire i tubi che distribuivano l'acqua all'interno delle grandi città. Il Mediterraneo era un importante rotta che permetteva il commercio e lo scambio culturale tra le popolazioni di quel periodo (Romani, Egiziani, Cartaginesi, Greci etc) quindi non ci sorprende il fatto che lungo le rotte commerciali del mare Mediterraneo c'era un intenso traffico di navi cariche di materiale in piombo in particolare lingotti. Un'analisi accurata dei lingotti di piombo ritrovati nelle navi affondate aggiunge informazioni importanti per gli archeologi. Infatti da analisi epigrafiche si è visto che tutti i lingotti riportavano un marchio che era la combinazione di caratteri e immagini. Questi marchi rappresentavano una sorta di marchio di fabbrica di grande importanza per gli archeologi in quanto questo permette di determinare con grande accuratezza l'anno e il produttore. Le aree contenenti questi marchi sono ricoperti da prodotti generati dai processi di corrosione, da sali depositati e da alghe, per poter leggere questi marchi è necessario eliminare questi strati; inoltre dopo questa rimozione non è detto che sia possibile leggerli poiché ciò dipende dall'entità di corrosione dell'oggetto quindi si è pensato di effettuare le misure di NT dato che: i neutroni sono molto poco sensibili agli atomi di piombo, il che significa che possono attraversare grandi spessori di piombo indisturbatamente, e che lo strato superficiale di "calcare" ha coefficienti di attenuazione differenti dalle regioni sottostanti.

Dalla elaborazione delle misure di NT (tabella 6.2.1) fatte su tre lingotti di piombo di epoca romana, ritrovate nei pressi di un porto siciliano e dalle dimensioni di circa $8 \times 10 \times 40 \text{ cm}^3$, si è visto che il marchio di "fabbrica" era lo stesso per tutti e tre i lingotti e che esso era costituito da due scritte e al centro un delfino che salta. Noi pensiamo che il marchio di "fabbrica" sia il seguente: **M.PLANI L.F/DELFINO/RVSSIN** che è Marcius Planius Russinius, appartenente ad un'importante famiglia di manifatturieri nella regione di Cartagena (Sierra Morena).

Tomografia Neutronica applicata allo studio di reperti subacquei

Tabella 6.2.1: marchi di "fabbrica" presenti nei tre lingotti di piombo di epoca romana ricavate dalle ricostruzioni di NT.

Estremità sinistra	Centro	Estremità destra
		
		
		

Per dimostrare che i neutroni sono molto poco sensibili agli atomi di piombo, il che significa che possono attraversare grandi spessori di piombo indisturbatamente, e che lo strato superficiale di "calcare" ha coefficienti di attenuazione differenti dalle regioni sottostanti riportiamo nella figura 6.2.1 una sezione tangenziale, rispetto a come è posizionato il lingotto di piombo nella figura 6.2.1a, ricavato dalle misure di NT e il rispettivo istogramma. Come si può vedere dall'istogramma (figura 6.2.1 c.) la gaussiana relativa alla componente piombo, cioè quella più intensa in posizione 0,125, è separata dalla componente esterna, cioè la gaussiana in posizione 0,343. La componente esterna è costituita da sali che si sono depositati e da prodotti di corrosione, inoltre nella figura 6.2.1 b. è possibile vedere che la zona in cui è presente il marchio (parte evidenziata dal rettangolo rosso) si è verificata una maggiore sedimentazione del calcare. Guardando la figura 6.2.1 b. è anche possibile vedere all'interno del lingotto una cavità in cui non c'è la componente piombo e questo ci fa pensare che essa si sia formata durante il processo di produzione.

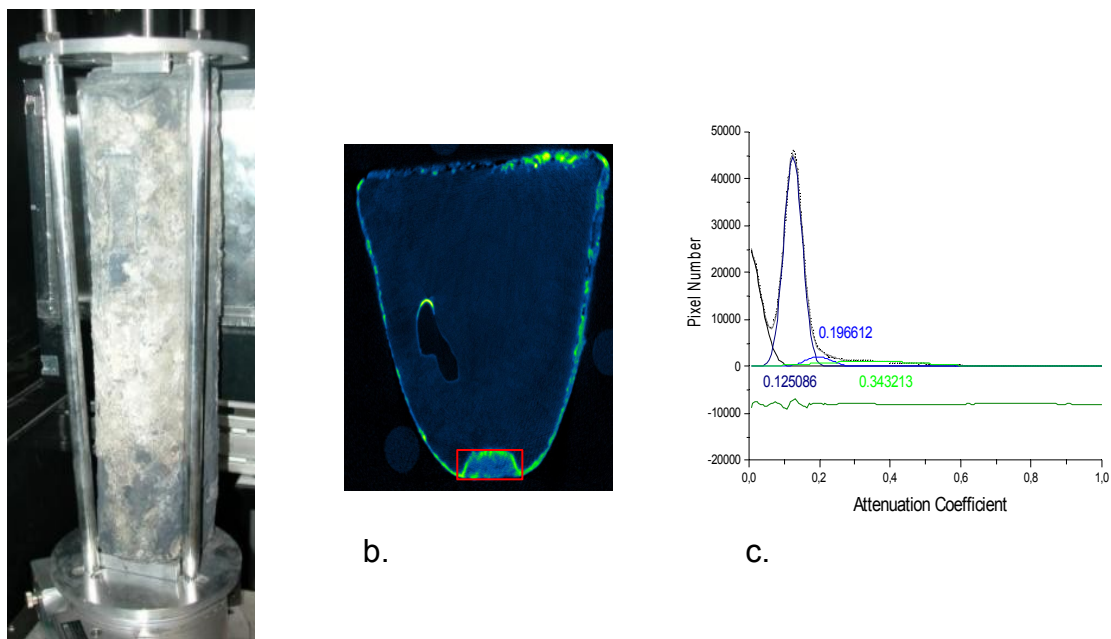


Figura 6.2.1: **a.** immagine reale del lingotto di piombo – **b.** sezione tangenziale del lingotto ricavata da misure di NT – **c.** istogramma relativo alla figura 6.1b

Lo studio epigrafico sui lingotti mediante le misure di NT è stato possibile grazie al contrasto tra la parte metallica e quella calcarea, cioè grazie ai differenti coefficienti di attenuazione delle due zone.

6.3 *Reperti integralmente corrosi*

Dalle misure di NT su dei reperti subacquei, è stato possibile vedere che: gli oggetti originari si sono completamente degradati e che ciò che è rimasto è soltanto la loro sagoma.

Di seguito a titolo di esempio riportiamo nella figura 6.3.1 per ogni reperto a sinistra le immagini reali e a destra quelle ricavate della NT. Come si può vedere della ricostruzioni di NT: il primo reperto conteneva una forcina (figura 6.3.1 a') mentre gli altri contenevano dei chiodi; inoltre possiamo dire che questi chiodi hanno forma diversa.

Tomografia Neutronica applicata allo studio di reperti subacquei

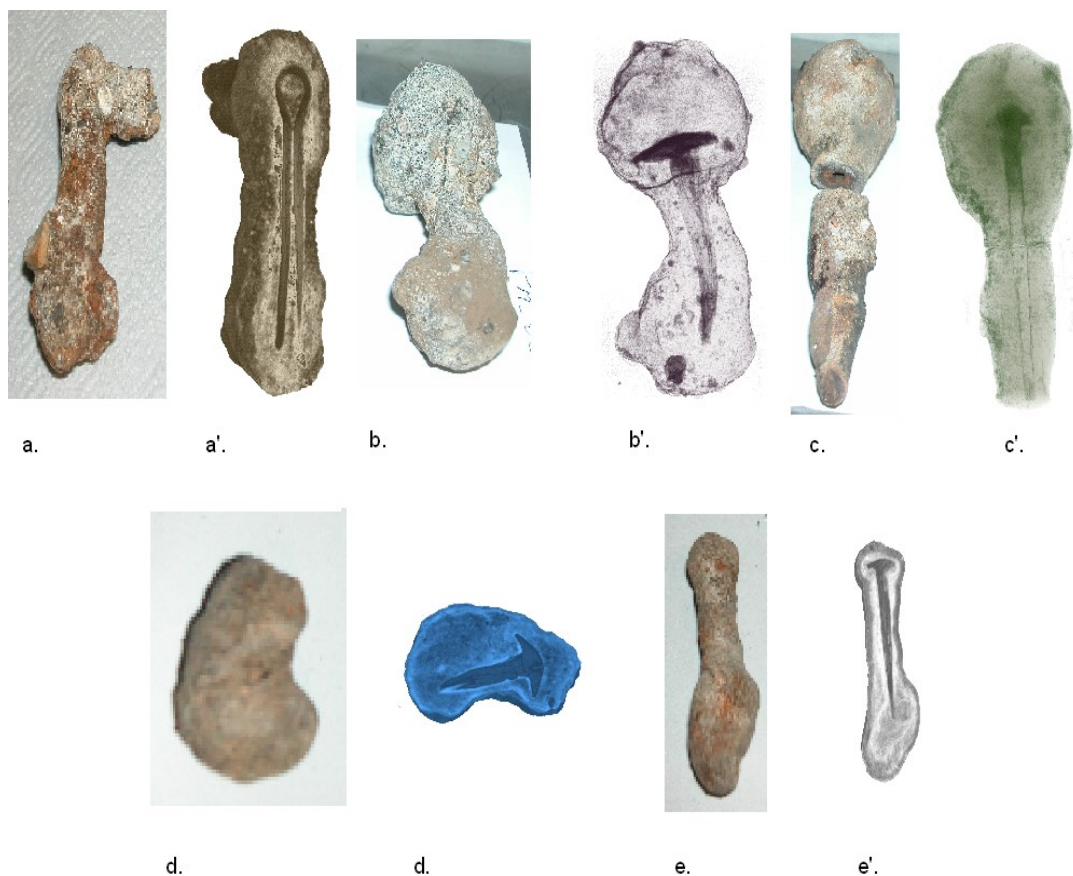


Figura 6.3.1: **a., b., c., d.** e **e.** sono le immagini reali dei reperti - **a'., b'., c'., d'.** e **e'.** sono le rispettive ricostruzioni di NT.

Per far comprendere come siamo arrivati alla conclusione che i reperti presi in considerazione sono stati completamente corrosi; riportiamo a titolo di esempio l'elaborazione fatta sul reperto che conteneva la forcina.

L'elaborazione consiste nel prendere diverse sezioni del reperto lungo la direzione xz; per ogni sezione (per esempio figura 6.3.2 a.) si genera l'istogramma della sezione completa (curva nera della figura 6.3.2 e.); quello relativo ad una zona esterna al reperto (curva rosa della figura 6.3.2 e.); quello relativo ad una zona che conteneva il reperto (curva rossa della figura 6.3.2. e.) ed infine l'istogramma relativo alla zona calcarea (curva blu della figura 6.3.2 e.). Confrontando la posizione dell'istogramma relativo alla zona che conteneva il reperto con gli altri istogrammi (figura 6.3.2 e.) è possibile vedere che l'istogramma rosso è posizionato a bassi valori di coefficiente di attenuazione vicino all'istogramma rosa cioè nella prima parte dell'istogramma completo, il che significa che l'oggetto originale si è completamente corroso.

Gli istogrammi, relativi ad una zona esterna al reperto, ad una che conteneva il

reperito ed infine alla zona calcarea, sono state moltiplicate per un fattore numerico in modo da evidenziare la loro posizione rispetto all'istogramma relativo alla sezione completa (figura 6.3.2 e.).

Effettuando il fit dell'istogramma relativo alla sezione completa (figura 6.3.2 a.) si è visto che il fit dell'istogramma relativo alla zona calcarea è stato effettuato con quattro gaussiane (figura 6.3.2 f.: gaussiana blu, verde, gialla e giallo chiaro) questo è dovuto al fatto che il metallo è presente nelle varie zone calcaree in differente percentuale; infatti guardando la figura 6.3.2 a. è possibile vedere che la zona calcarea che era direttamente a contatto con l'oggetto originario ha una maggiore percentuale di metallo (zona colorata in giallo a cui corrispondono elevati coefficienti di attenuazione) rispetto alle zone più distanti (zona colorata in blu a cui corrispondono coefficienti di attenuazione più bassi).

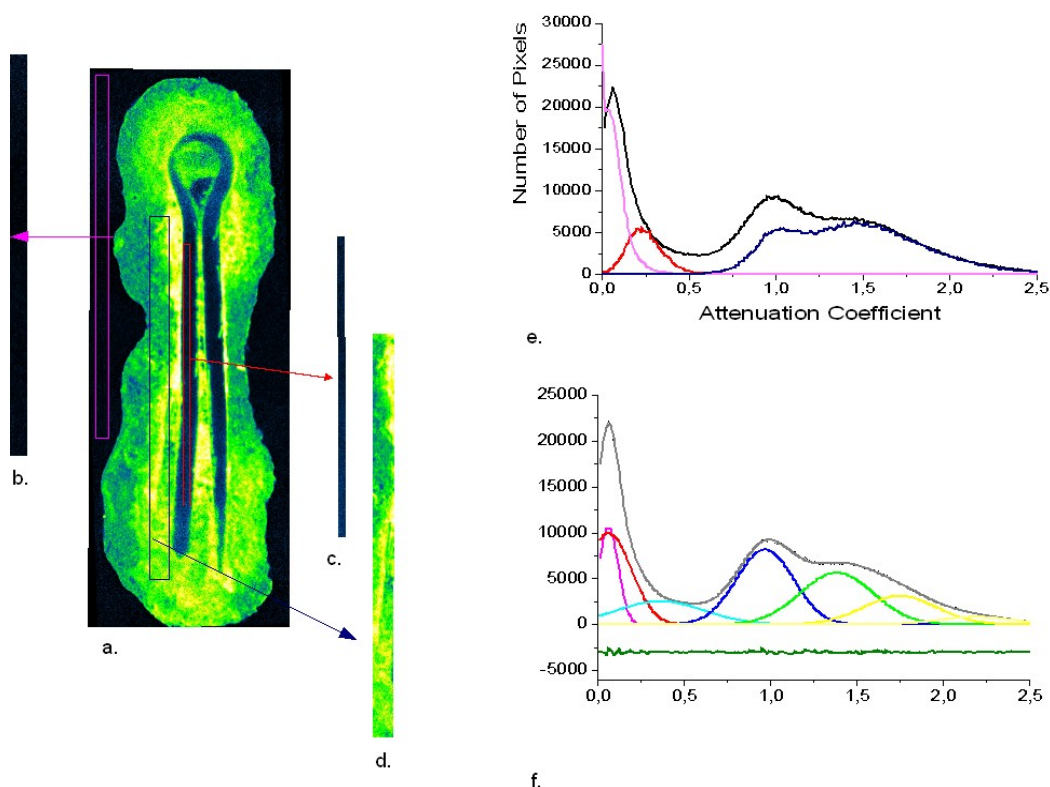


Figura 6.3.2: **a.** sezione del reperto lungo la direzione xz ricavata da misure di NT - **b.** zona esterna al reperto - **c.** zona in cui era presente il reperto - **d.** zona calcarea - **e.** istogramma relativo: alla sezione completa (linea nera); ad una zona esterna al reperto (linea rosa); ad una zona che conteneva il reperto (linea rossa) ed una zona calcarea (linea blu) - **f.** fit dell'istogramma relativo alla sezione completa (figura 6.3 a.)

Inoltre con il programma Vgstudio è possibile ricostruire in 3-D l'oggetto come era prima di corrodersi di seguito riportiamo nelle figura 6.3.3 e 6.3.4 il reperto che

Tomografia Neutronica applicata allo studio di reperti subacquei

conteneva al suo interno la forcina ed uno reperto che al suo interno conteneva il chiodo.

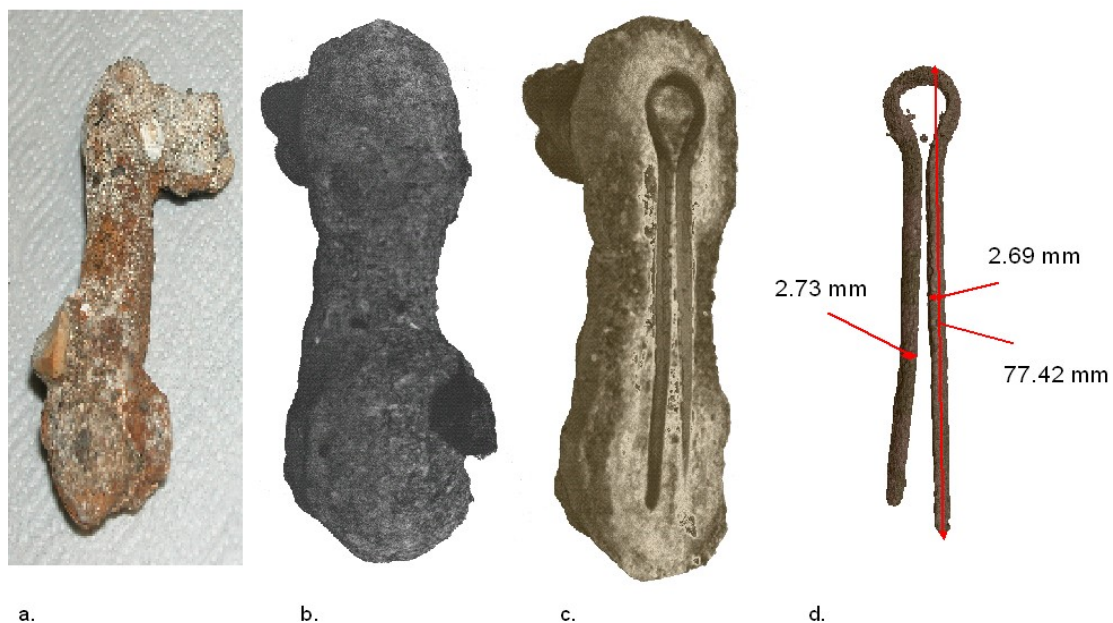


Figura 6.3.3: **a.** immagine reale del reperto – **b.** ricostruzione tomografica dell'intero reperto – **c.** ricostruzione tomografica di una porzione del reperto – **d.** ricostruzione tomografica della forcina.

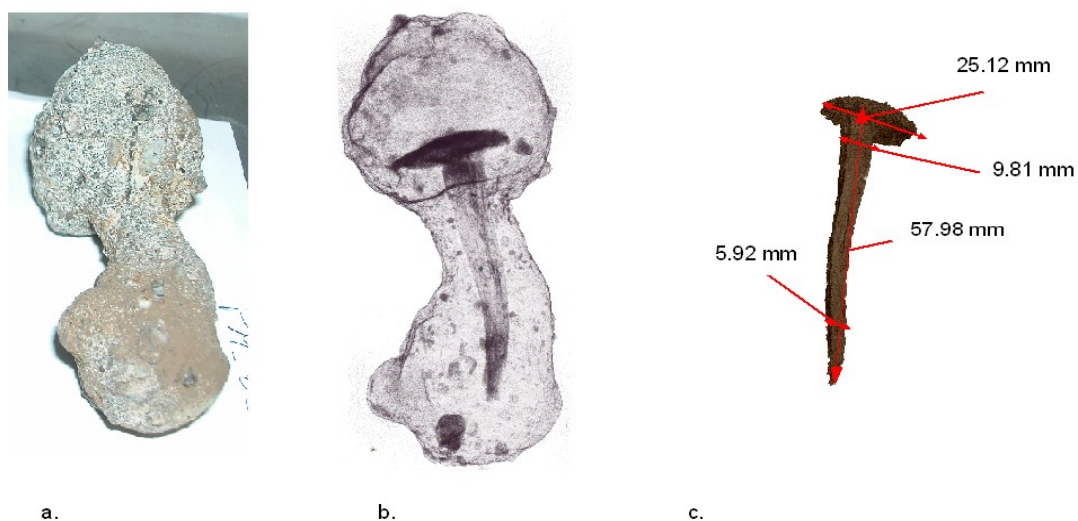


Figura 6.3.4: **a.** immagine reale del reperto – **b.** ricostruzione tomografica dell'intero reperto – **c.** ricostruzione tomografica del chiodo.

6.4 *Reperti contenenti funi*

Dalle misure di NT su dei reperti subacquei, è stato possibile vedere che tutti contenevano al loro interno una fune. Essa è caratterizzata da un corpo centrale in cui sono avvolti altri fili.

Di seguito a titolo riportiamo nella figura 6.4.1 per ogni reperto a sinistra le immagini reali e a destra quelle ricavate della NT.

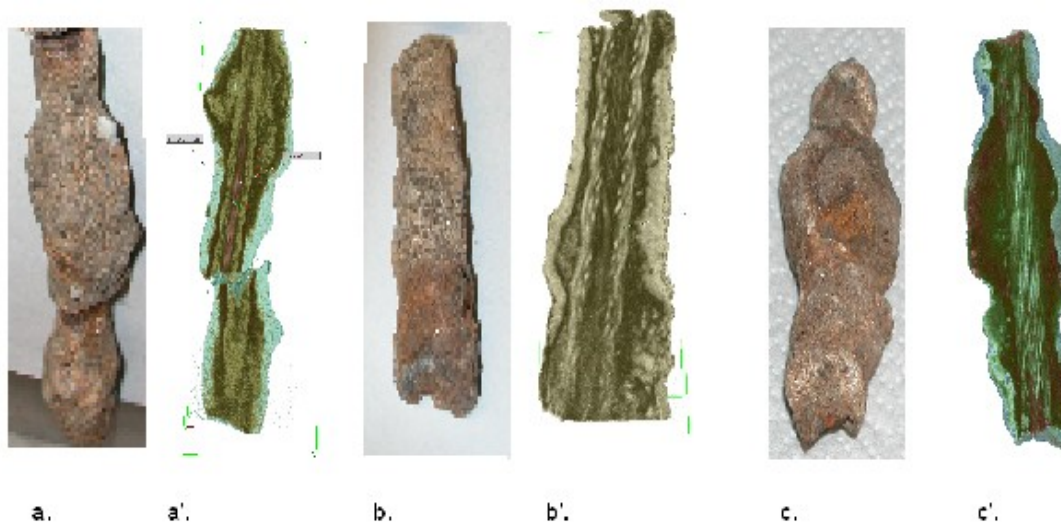


Figura 6.4.1: **a.**, **b.**, e **c.** sono le immagini reali dei reperti - **a'**., **b'**., e **c'**. sono le rispettive ricostruzioni di NT.

Per far comprendere come siamo arrivati alla conclusione che i reperti presi in considerazione contengono al loro interno ancora l'oggetto facciamo ciò che già era stato fatto per i reperti presi in considerazione prima (reperti completamente corrosi); cioè prendiamo diverse sezioni del reperto lungo la direzione xz; per ogni sezione (per esempio figura 6.4.2 a.) generiamo l' istogramma della sezione completa (curva nera della figura 6.4.2 e.); quello relativo ad una zona esterna al reperto (curva rosa della figura 6.4.2 e.); quello relativo ad una zona che contiene il reperto (curva rossa della figura 6.4.2 e.) ed infine l'istogramma relativo alla zona calcarea (curva blu della figura 6.4.2 e.). Confrontando la posizione dell'istogramma relativo alla zona che contiene il reperto con gli altri istogrammi (figura 6.4.2 e.) è possibile vedere che l'istogramma rosso è posizionato a alti valori di coefficiente di attenuazione come l'istogramma blu cioè nella seconda parte dell'istogramma completo, il che significa che l'oggetto "originale" è ancora presente; inoltre guardando la figura 6.4.2 si vede una struttura ben definita il che conferma ancora di più la presente del oggetto all'interno del reperto.

Tomografia Neutronica applicata allo studio di reperti subacquei

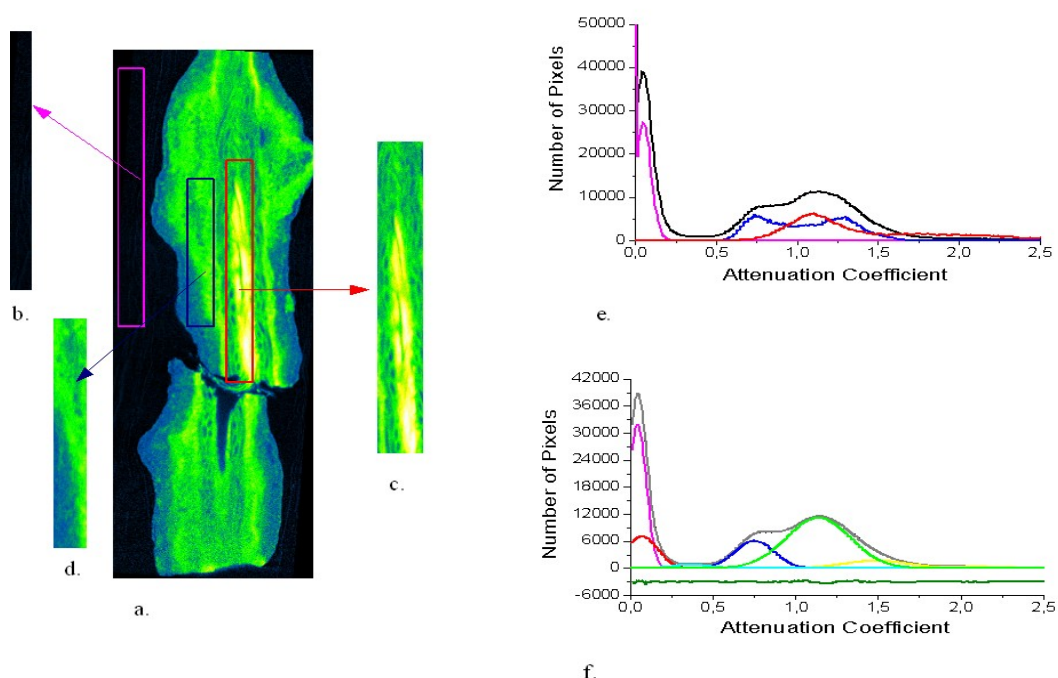


Figura 6.4.2: **a.** sezione del reperto lungo la direzione xz ricavata da misure di NT – **b.** zona esterna al reperto – **c.** zona in cui è presente il reperto – **d.** zona calcarea – **e.** istogramma relativo: alla sezione completa (linea nera); ad una zona esterna al reperto (linea rosa); ad una zona che contiene il reperto (linea rossa) ed una zona calcarea (linea blu) – **f.** fit dell'istogramma relativo alla sezione completa (figura 6.4.2 a.)

Di seguito vengono riportate, nelle figure 6.4.3 c. e d., due ricostruzioni ottenute con il programma Vgstudio in cui si vede in modo molto chiaro la struttura della fine

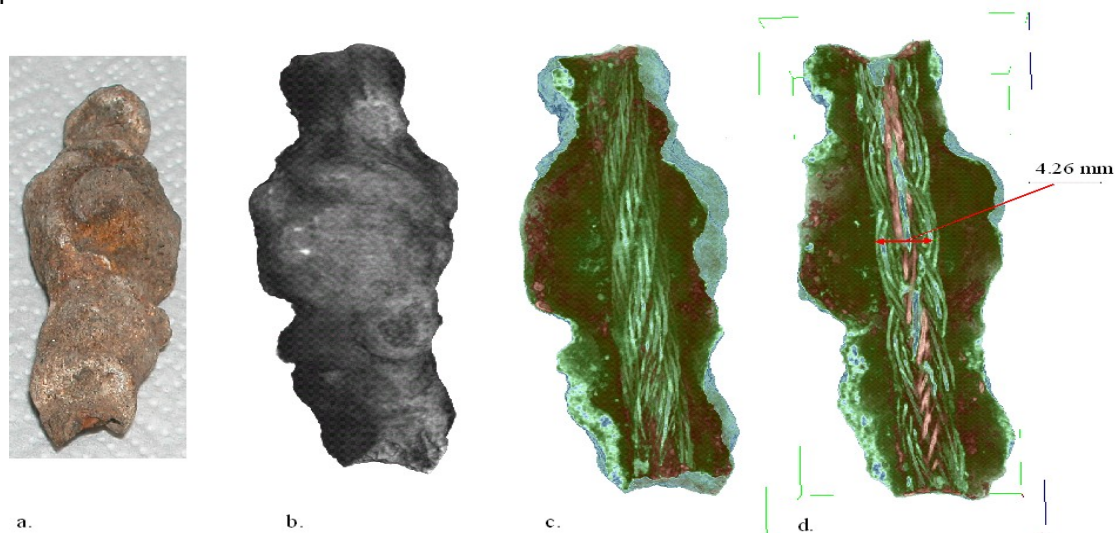


Figura 6.4.3: **a.** immagine reale del reperto – **b.** ricostruzione tomografica dell'intero reperto – **c.** e **d.** ricostruzione tomografica del reperto.

Conclusioni

I risultati ottenuti in questi tre anni di dottorato hanno evidenziato il fatto che la Tomografia Neutronica è un potentissimo mezzo di indagine non distruttivo. In particolare è prevedibile che tale tecnica troverà ampia applicazione nel campo dei Beni Culturali, poiché chi si occupa della salvaguardia e tutela dei beni culturali ha bisogno di tecniche non distruttive che lo aiutino a classificare lo stato del reperto, a valutare la necessità e la fattibilità di opere di restauro, e i risultati di tale opera.

Dalla analisi dei reperti subacquei è apparso chiaro che la NT è un potentissimo mezzo di indagine, se non addirittura l'unico mezzo, quando devono essere studiati reperti che presentano spessi strati di concrezione calcarea o quando si devono studiare reperti metallici. NT ha permesso la ricostruzione in tre dimensioni di oggetti che erano presenti all'interno di concrezioni calcaree (un esempio è la forcina); ha inoltre consentito una analisi epigrafica totalmente non invasiva di oggetti di interesse archeologico (un esempio sono i lingotti di piombo); infine ha consentito di verificare la disposizione delle diverse fasi che caratterizzano il reperto (un esempio è la fune).

Dalla analisi dei dati NT sui marmi provenienti da Villa Adriana si è arrivati alle seguenti conclusioni:

- NT permette di distinguere fra marmi (cioè rocce metamorfiche costituite prevalentemente da calcite e/o dolomite) e rocce impropriamente chiamate marmi;
- NT è sensibile ai componenti accessori che conferiscono al marmo un determinato colore;
- NT permette di vedere come sono disposte le varie fasi che costituiscono il campione di marmo.

Inoltre dal confronto tra i dati NT e quelli di Diffrazione Neutronica (ND) si è visto

Conclusioni

che nel caso di marmi bianchi NT e ND forniscono gli stessi risultati, mentre in altri casi forniscono risultati non coincidenti. Ciò è dovuto al fatto che con NT vengono analizzati campioni molto più grandi rispetto a quelli analizzati con ND e che NT è sensibile ai componenti accessori e alla loro distribuzione nel campione.

Infine per quanto riguarda i legni, NT permette di valutare la diversa entità di degrado di un legno, se e come il consolidante (materiale idrogenato) si distribuisce all'interno di un pezzetto di legno ed in genere l'efficacia del processo di consolidamento.

Dalla elaborazione dei dati NT e XT sui legni di pino degradati da Carie bruna e poi consolidati si è arrivati alle seguenti conclusioni:

1. le immagini XT hanno una maggiore risoluzione rispetto a quelle con NT;
2. i neutroni sono più sensibili, rispetto ai raggi X, al consolidante che penetra all'interno del campione, quindi dall'esame delle immagini dei legni consolidati generate con NT è possibile comprendere come il consolidante si distribuisce;
3. per effettuare un confronto fra i diversi trattamenti è ragionevole usare i neutroni come sonda in quanto essendo più sensibile al consolidante è possibile capire come esso si distribuisce e il perché.