

COMBINED APPLICATION OF X-RAY AND NEUTRON IMAGING TECHNIQUES TO WOOD MATERIALS

Roberto Triolo^{*}, Graziella Giambona, Fabrizio Lo Celso, Irene Ruffo

Dipartimento di Chimica Fisica "Filippo Accascina"
Università di Palermo

Nicolay Kardjilov, André Hilger, Ingo Manke, Andreas Paulke

Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie
Berlin (Germany)

Keywords: X-ray, neutron imaging techniques, wood materials

1. Introduction

X ray and Neutron Imaging [1-6] techniques are very important in dealing with the non-destructive investigation and conservation of Cultural Heritage finds. For example, finds from shipwrecks, including parts of the ship itself [7, 8]. Objects made from a variety of different materials might be hidden by thick heavy layers of calcareous concretions, to the point that it is impossible to gain the necessary information without seriously damaging the find. As a matter of fact, in the vast majority of cases, X-rays and Neutrons may give complementary information. This is certainly the case of wood samples (for example parts of sunken ships). In what follows, we shall highlight how X-ray and Neutron based techniques may be used in a complementary way to investigate the macroscopic structure of woods and to help conserve them. For example, the use of neutrons, a combination of Neutron Radiography (NR) and/or of Neutron Tomography (NT) enables the investigation of the macroscopic structure of degraded woods before and after any consolidation and/or restoration work. In addition, neutrons are particularly sensitive to hydrogen, and therefore are well suited to investigate the presence of organic matter and its distribution in archaeological finds. On the other hand neutrons are highly penetrating probes and so are suitable for the investigation of large artworks. Compared to neutrons, X-rays have lower penetration depth in metals and rocks, but small samples or fragments

^{*} Corresponding author: e-mail triolo@unipa.it

of artefacts can be imaged by X-ray photons with the additional advantage, as we shall see, of higher spatial resolution. In examining degraded woods, later in the paper, we shall discuss these complementary features. Clearly, the combined use of Neutron based and X-ray based techniques, seems to be well suited for use in the field of cultural-heritage investigations.

2. X ray and Neutron Imaging Experiment

Over the last decade X-ray and neutron imaging methods have significantly gained importance. One of the reasons is the rapidly developing field of digital image recording and processing, which enables the computation of tomographic reconstructions from high-resolution images on a reasonable timescale. The development of new detectors with better signal-to-noise characteristics and faster read-out electronics have allowed some of the limits of conventional radiography and tomography concerning spatial and time resolution to be overcome.

The imaging methods are based on the detection of transmitted radiation through a defined medium (sample) by using position sensitive detectors. The radiation beam is attenuated differently by the composition elements of the sample, giving contrasting variations in the recorded radiography image. For high resolution radiography purposes two kinds of radiation can be used: X-rays and neutrons. The charge-free neutron interacts with the core of the atoms, while in contrast X-rays interact with the charge distribution of the electron shells. Therefore the X-ray attenuation coefficients increase with the atomic number of the elements, i.e. with the number of electrons. The interaction probability of neutrons with the atomic core depends on the coherent scattering length a_{coh} , which does not show a systematic correlation with the atomic number of the element. As a consequence, the attenuation properties of the elements for neutrons show a non systematic correlation with the atomic number as shown in Figure 1. It should be pointed out that neutrons are very sensitive to some light elements like H, Li, B, for which X-rays do not provide a good contrast (low and similar atomic numbers). Additionally, neutrons easily penetrate thick layers of metals like Pb, Fe and Cu where standard X-ray imaging even with energies of several hundred keV would fail.

In this context the two radiations appear to be complementary in the case of the non-destructive radiography investigations.

In the case of tomography investigations, the sample is rotated around a defined axis and 2D projections are recorded under different rotation angles. The mathematical reconstruction of the matrix of the attenuation coefficients in the sample volume can be made

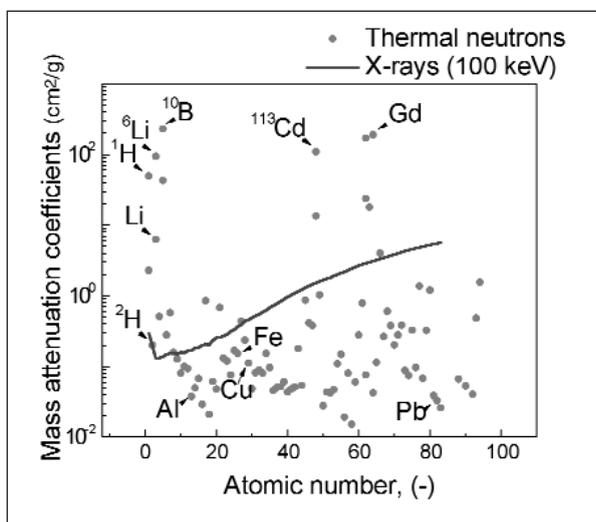


Figure 1. Mass attenuation coefficients for thermal neutrons and X-rays (100 keV) as a function of the atomic number.

using the collected set of projections [9, 10]. As an example, Figure 2 (see colour Figure 2, p. 231) shows the neutron tomography image of a small object recovered from a find whose picture is shown on the left of the tomography reconstruction. It is clear that the information has been obtained without damaging the find thanks to the high penetrability of the neutrons. In this case it would have been more difficult to obtain the information using X-rays as a probe, due to the thickness of the calcareous concretion.

All the Imaging experiments reported in this paper were performed at the Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie (Berlin, DE). For neutron based techniques we used the cold neutron imaging instrument CONRAD [11]. The beam provides neutrons with wavelengths between 0.2 nm and 1.2 nm with a maximum at 0.35 nm. The point source beam geometry is determined by pinholes placed at a distance of 5 m in front of the sample. The detector system was based on a CCD camera integrated in a light tight box with a scintillator screen (20×20 cm²) and a mirror projecting the image from the scintillator via a lens system on the CCD chip. The 16 bit CCD camera used (Andor DW-436N-BV), had a Peltier cooled chip with 2048×2048 pixels. The beam size of 10×10 cm² allowed the investigation, when necessary, of more than one sample at a time. The number of the radiographic projections was 300 over 180 degrees. The achieved spatial resolution varied, depending on the sample size from 60 μm to 100 μm. Exposure times between 2 hours and 5 hours were used per tomography experiment. For the X-ray based technique we used an X-ray CT scanner based on a micro-focus tube (Hamamatsu,

L8121-03) at 60 kV, 166 μ A in small spot mode (focus: 7 μ m). The images were recorded by flat panel sensor (Hamamatsu, C7942SK-05) with a pixel size of 50 μ m where different magnification ratios (distances between source, sample and detector) were used providing a spatial resolution between 10 μ m and 50 μ m in the reconstructed tomographic data. The exposure time per X-ray tomography experiment varied between 2 and 4 hours depending on the sample size and applied magnification. The volumetric reconstruction was made using Octopus software [9] and the visualisation and data analysis by VGStudioMax software [10]. The tomography slices were reconstructed in absolute attenuation coefficients so that a comparison could be made of the experiments carried out on different samples and at different times.

3. Materials

Four samples of *Pinus Silvestris*, indicated as PB, PD, PE and PF, artificially degraded by Brown rot, were consolidated by means of different treatments. Samples PB and PE were consolidated at 45°C by immersion in a 7% (w/w) solution of Klucell in acetone and in ethanol, respectively. Samples PD and PF were consolidated at 22°C by immersion in a 30% (w/w) solution of Colophony in acetone and ethanol, respectively. Samples were impregnated for 8 days. During this time the impregnating solutions were replaced three times with fresh ones. At the end of the impregnation, the samples were dried in a stove for about 20 days at 45°C [8].

4. Results

As pointed out earlier, in examining items of archaeological interest X-ray and Neutron based techniques may give interesting complementary information, in particular when dealing with wood samples. As an example, in Figure 3 (see colour Figure 3, p. 231) we show the images of an internal slice of an artificially degraded sample of Pine wood (Figure 3a), and of samples of the same wood consolidated by treatment with a 30% w/w solution of Colophony in ethanol (Figure 3b) or with a 7% solution of Klucell in ethanol (Figure 3c). X-ray tomography (XT, Figure 3a-3c) and Neutron tomography (NT, Figure 3d-3f) images were obtained on the very same samples. The degradation performed by the brown rot is clearly visible in the black portion of the slices.

X ray images (a, b) show a small portion of the slice where wood powder resulting from the degradation has been accumulating. The same regions are barely visible in the corresponding Neutron images (d, e). Both XT and NT images show the layered structure of the wood with the distinct region of the early wood (higher attenuation coefficient, light

color) and of the late wood (lower attenuation coefficient, dark color), respectively. Natural voids are also clearly visible in the X-ray image. It can be noticed that the XT images show higher space resolution, when compared with NT. On the other hand, the NT images are more sensitive to the presence of the consolidating medium (Colophony or Klucell) with the result that the image is less sharp, but contains more information as far as the distribution of the consolidating medium is concerned [7, 12]. This is clearly shown in the histograms (g, h) of the images (c, f) shown next to the images. The complex structure of the NT histograms is a clear indication of the variety of effects which are detected by the NT image. We may expect that, in the simplest case, one would need three Gaussians to fit the histograms: one Gaussian at very low values of the attenuation coefficient, corresponding to the voids (macro and micro voids, in general), another one describing the regions dominated by the early wood and a third one corresponding to the late wood. Eventually one more Gaussian might describe the region in between the early and the late wood. This is exactly the situation found in the case of XT. If we now consider the NT histogram, we still find a Gaussian at low attenuation coefficient describing the contribution of the voids. The remaining portion of the histogram cannot be reproduced with only three Gaussians due to the fact that neutrons are quite sensitive to hydrogen and therefore the histograms are sensitive to the distribution of the consolidating medium inside the wood. Evidently X-rays can clearly differentiate between the main components, but are not able to distinguish equally well the differences in the attenuation factor induced by the consolidating medium, made of light chemical elements. On the other hand NT images are richer in details and describe the difference in the attenuation coefficients induced by the consolidating medium; in doing so, there is less information regarding the contrast between the different regions. To further support this deduction, histograms for XT and NT were generated for different portions of the whole slice. Of course the choice of the different portions was made in an attempt to attribute the single Gaussians to well defined portions of the wood slice. In particular histograms have been generated for the late-wood areas and for the early-wood areas in different portions of the slice: far from the side surface and close to the side surface (where the consolidating medium should reach higher concentrations). Partial histograms are drawn in Figure 4. As far as the XT results are concerned, the two Gaussians identifying the late-wood contribution near the center of the slice (Figure 4b) and near the surface, are almost identical, while the corresponding early-wood contributions show a minor change in the peak position (Figure 4a). The situation is quite different for the NT data: in this case the contributions far from the surface and near the surface are significantly different (Figure 4c

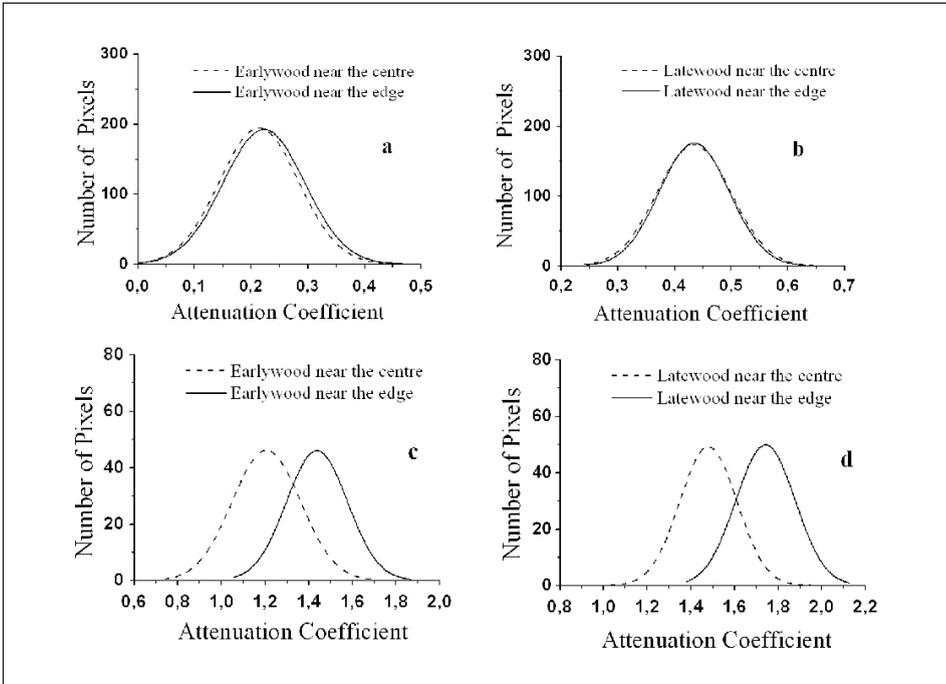


Figure 4. Histograms generated in different portions of the XT and NT slices. See text for details.

and Figure 4d). As expected, both for early- and for late wood, the peak positions of the contributions for histograms which refer to portions close to the surface, correspond to higher attenuation coefficients.

The results so far obtained for *Pinus Silvestris* were also found for other woods (Fir, Chestnut) [7, 12]. In all cases we found that, while for XT the histograms of the same material in different regions of the slice change only slightly, it is not so for the NT measurements. In these, the histograms from the early wood near the centre of the slice, differ from the histograms of the same wood near the edge of the slices. The same is true for late wood. This is of course due to the fact that neutrons are quite sensitive to hydrogen and hence may distinguish between the two zones. This means that the combined use of XT and NT is important when attempting to assess how well the consolidating material penetrates into the wood, a key point in selecting the proper consolidation medium. To further highlight the importance of the synergic use of XT and NT, in Figure 5 we show more results obtained for the samples discussed so far. We generated histograms

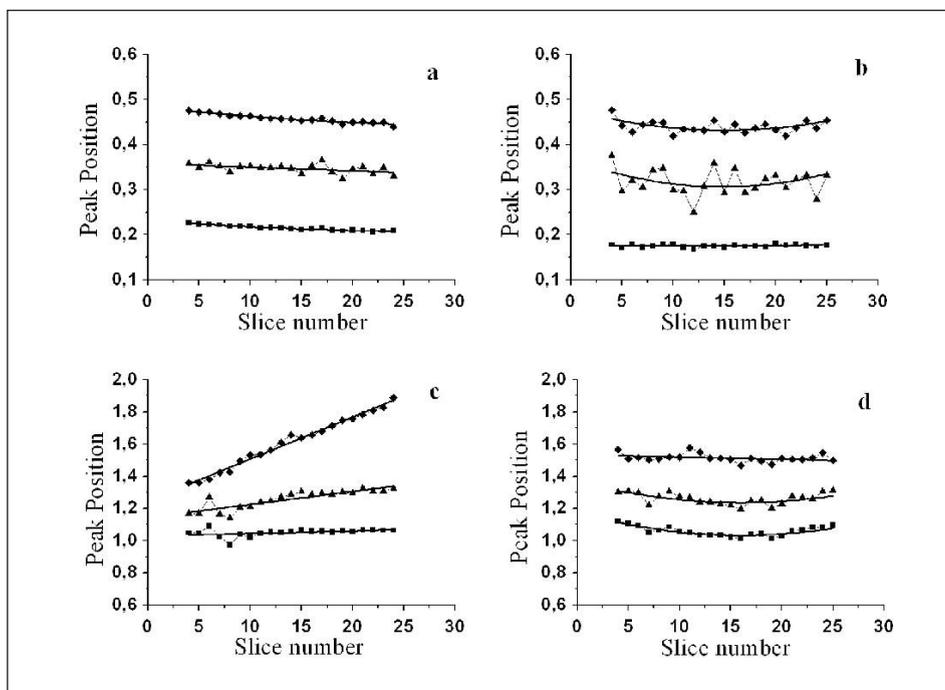


Figure 5. Dependence of the Gaussian peak positions from the distance from the surface for XT and for NT. Different symbols refer to smaller, intermediate and higher attenuation coefficient, respectively. Results refer to samples PB and PD. See text for more details.

for a series of slices with about 0.75 mm distance between each other, but excluded in the operation, the portion of the slices close to the surface (ca. 4 mm) and the region where the wood powder accumulated. The reason for not considering, in this comparison, the area close to the surface is that this area is the one which is more affected by the accumulation of the consolidating medium, and therefore the one to which neutrons are more sensitive. By not considering this area in obtaining the histograms, the fit should essentially reflect the basic structural features of the wood itself, even if some changes are produced by the diffusion of the consolidating medium. To fit each histogram we then used three Gaussians (corresponding to the early- and to the late wood, i.e. the dominating contributions, and to the intermediate region). In Figure 5 we report the peak positions obtained from the histograms obtained from the XT data for sample PB (insert a) and PD (insert b). Inserts c) and d) report the peak positions obtained from the histograms obtained from the NT data for the same samples.

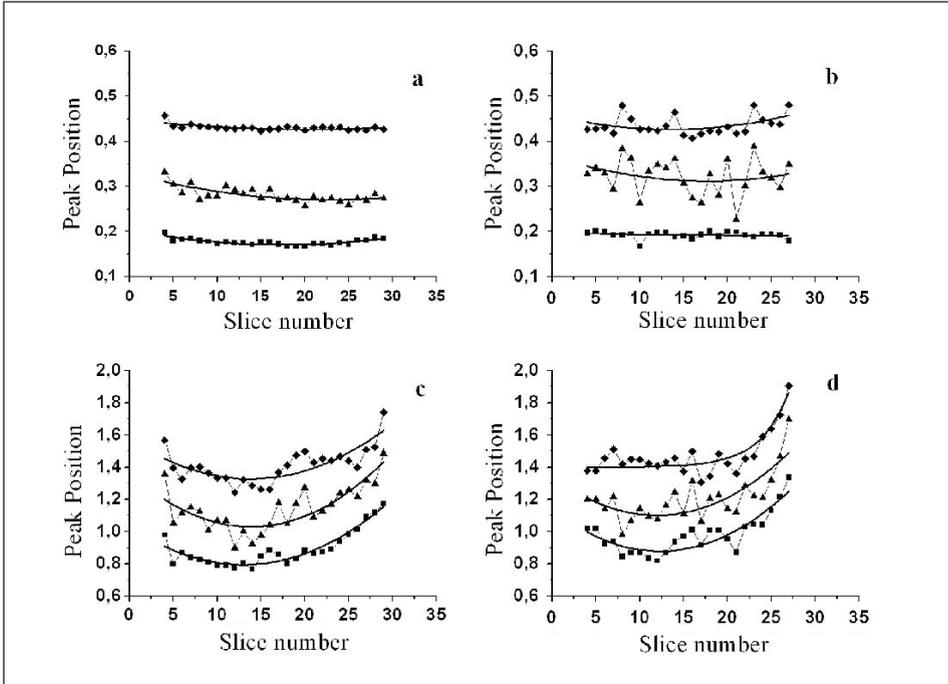


Figure 6. Dependence of the Gaussian peak positions from the distance from the surface for XT and for NT of samples PE and PF. Different symbols refer to smaller, intermediate and higher attenuation coefficient, respectively. See text for more details.

As expected, the trend shown for each peak does not seem to be heavily dependent on the probe (X-ray or Neutron), as we did not use the portion more affected by the consolidating medium, although some differences can be observed. In addition, Figure 5 clearly shows that the portion of wood which is more sensitive to the diffusion of the consolidating medium, is the one corresponding to the early wood with larger pores and a less compact structure, features which make the early wood more penetrable. The situation is expected to be different if greatly degraded samples are compared. This is the case for samples PE and PF, whose histograms for different sections are shown in Figure 6. Again inserts a) and b) show histograms obtained from the XT data (sample PE (insert a) and PF (insert b), respectively). The corresponding histograms obtained from the NT data for the same samples, are shown in inserts c) and d), respectively. Trends for XT and NT histograms are not quite as similar as those shown in Figure 5, and, as expected, the neutrons show a more systematic variation with the distance from the surface.

5. Conclusion

The role of different probes (X-rays and Neutrons) in investigating the structure of items of archaeological interest has been highlighted by showing results obtained for wood, a rather common material in items of archaeological interest. The fundamental role of neutrons in investigating the distribution of the consolidating medium inside the wood sample together with the good spatial resolution shown by X-rays (even in heavily consolidated samples where the Neutron image is not equally sharp), suggest that, whenever possible, both techniques should be used. This would mean benefiting from their complementary features when used in the field of cultural heritage.

Acknowledgements

This research project has been supported by the Framework Agreement between HZB, Technische Universität Berlin and Università di Palermo, by Fondi Ateneo of the Università degli Studi di Palermo and by the European Commission through the '**Research Infrastructures**' action of the '**Capacities Programme**'. Contract n.: CP-CSA_INFRA-2008-1.1.1 number 226507-NMI3.

References

- [1] SCHILLINGER B., GEBHARD R., HAAS B., LUDWIG W., RAUSCH C., WAGNER U. 1996, *3D Computer tomography in Material Testing and Archaeology*, presented at the 5th World Conference on Neutron Radiography Berlin, Germany, June 17-20.
- [2] HOFMANN A. 2004, *The Physics of Synchrotron Radiation*, Cambridge University Press.
- [3] RANT J., RANT A., MILI Z., RIHAR G. 2000, *Applications of Neutron radiography in Archaeology*, presented at the 15th World Conference on Non-Destructive Testing 15-21 October, Rome.
- [4] LEHMANN E.H. et al. 2005, *Non-invasive studies of objects from Cultural Heritage*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 542, 68-75.
- [5] KAK A.C., SLANEY M. 2001, *Principles of Computerized Tomographic Imaging*, Society of Industrial and Applied Mathematics.
- [6] KORECKI P. et al. 2006, *X-ray tomographic imaging of atom-crystal views from inside*, Physical Review Letters 96, 035502.
- [7] TRIOLO R. et al. 2009, *Archaeometric applications of X-ray and Neutron Techniques*, Atti Accad. Lett. Sci. Arti Palermo, XXV, 133-148.
- [8] DONATO I.D. et al. 2002, *Manufatti lignei degradati*, Arkos Scienza e Restauro, UTET, vol. 2.
- [9] www.xraylab.com

- [10] <http://www.volumegraphics.com/products/vgstudio/>
- [11] HILGER A. et al. 2006, *The new cold neutron radiography and tomography instrument CONRAD at HMI Berlin*, Physica B 385-386, 1235-1215. More recently the resolution has been improved by a factor 4 with respect to the values reported in the paper.
- [12] R. TRIOLO et al., in preparation.

Applicazione combinata a materiali lignei di tecniche di Imaging mediante raggi X e mediante Neutroni

Parole chiave: raggi X, tecniche neutroniche di immagine, materiali lignei

1. Introduzione

Le tecniche di Imaging basate su raggi X e neutroni [1-6] sono molto importanti quando si richiedono tecniche di indagine e di conservazione non distruttive di beni culturali. Un tipico esempio è quello di navi affondate, e di reperti da esse recuperati [7-8]. Oggetti di composizione estremamente variabile possono essere mascherati da spessi strati di concrezioni calcaree, al punto che non sarebbe possibile avere informazione sull'oggetto nascosto, senza danneggiare in maniera non accettabile il reperto.

Nella maggior parte dei casi raggi X e neutroni forniscono informazione complementare. Questo è particolarmente vero per i materiali lignei (per esempio parti di navi affondate). Nel seguito mostreremo come tecniche basate sull'uso di raggi X e di neutroni possono essere usate in maniera complementare al fine di investigare la struttura macroscopica dei legni e di aiutarne la conservazione. Per esempio, usando i neutroni, una combinazione di Radiografia Neutronica (NR) e/o Tomografia Neutronica (NT) consente di investigare la struttura macroscopica del legno degradato prima e dopo il trattamento di consolidamento e/o restauro. Inoltre i neutroni sono particolarmente sensibili all'Idrogeno, e quindi sono ideali nella ricerca di materiali organici e nello studio della loro distribuzione in reperti archeologici. D'altro canto i neutroni sono molto penetranti e quindi ideali per investigare reperti di dimensioni relativamente grosse. A confronto con i neutroni, i raggi X sono molto meno penetranti in materiali lapidei e metallici, anche se piccoli campioni di frammenti di opere d'arte possono essere studiati con tecniche di Imaging con fotoni X, con il vantaggio addizionale, di una maggiore risoluzione spaziale. Nell'esaminare legni degradati, nel seguito, discuteremo queste caratteristiche complementari. Ovviamente, quando possibile, l'uso combinato di tecniche basate su raggi X e neutroni è particolarmente utile nel campo dei Beni Culturali.

2. Sperimentazione con tecniche di Imaging mediante raggi X e neutroni

I metodi di Imaging sono basati sul rivelamento della radiazione trasmessa attraverso un dato mezzo (il campione) mediante "position sensitive detectors". Il fascio di radiazione è attenuato diversamente dalle diverse parti del campione, fornendo zone di contrasto diverse nell'immagine radiografica registrata. Per radiografie ad elevata risoluzione possono essere usati raggi X e Neutroni. I neutroni, interagiscono con il nucleo degli atomi, mentre i fotoni X interagiscono con la distribuzione elettronica degli atomi. Ne consegue che i coefficienti di attenuazione dei raggi X aumentano con l'aumentare del numero di elettroni in un dato atomo, e quindi sono una funzione regolare del numero atomico. La

probabilità di interazione neutrone-nucleo dipende dalla lunghezza di scattering coerente acqch, che non è correlata in maniera regolare al numero atomico degli elementi. Conseguentemente le proprietà di attenuazione dei vari elementi nei confronti dei neutroni, mostrano una variazione non regolare con il numero atomico, come mostrato in Figura 1. È importante puntualizzare che i neutroni oltre che all'idrogeno, sono particolarmente sensibili ad alcuni atomi leggeri quali Li e B, per i quali i raggi X non hanno un buon contrasto. Inoltre i neutroni possono penetrare spessi strati di metalli con Pb, Fe e Cu, in condizioni nelle quali anche raggi X di qualche centinaio di keV non consentirebbero standard esperimenti di X ray Imaging. In questo contesto le due radiazioni appaiono complementary nel caso di investigazioni radiografiche non distruttive.

Nel caso di indagini tomografiche, il campione è ruotato intorno ad un asse e proiezioni 2D vengono registrate ai differenti angoli. La ricostruzione matematica della matrice dei coefficienti di attenuazione nel volume di campione illuminato dal fascio incidente può essere effettuata usando il set di proiezioni registrate [9, 10]. A titolo di esempio la Figura 2 (vedere Figura 2 a colori, p. 231) mostra una immagine tomografica neutronica di un piccolo oggetto ricavato da un reperto. A sinistra è mostrata la foto del reperto, al centro una immagine tomografica e a destra la ricostruzione dell'oggetto contenuto all'interno del reperto. È chiaro che la ricostruzione dell'immagine è stata effettuata senza danneggiare il reperto ed è stata possibile grazie alla grande penetrabilità dei neutroni. In questo caso sarebbe stato molto difficile ottenere la stessa informazione usando i raggi X, a causa dello spessore dello strato di concrezione calcarea.

Tutti gli esperimenti riportati in questo lavoro sono stati effettuati presso il centro Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie di Berlino (DE). Per gli esperimenti che hanno usato neutroni si è fatto uso dello strumento CONRAD [11]. Il fascio incidente è formato da neutroni con lunghezza d'onda fra 0,2 e 1,2 nm. Il picco della distribuzione è a 0,35 nm. Il fascio è collimato mediante fenditure poste a 5 m dal campione. Il detector è costituito da una camera CCD con schermo a scintillazione di 20×20 cm². Il rivelatore CCD era una camera (Andor DW-436N-BV) con chip raffreddato mediante peltier con risoluzione 2048×2048 pixels. Il fascio, di 10×10 cm², consente l'investigazione di più di un campione alla volta. Il numero di proiezioni radiografiche era di 300 nell'arco di una rotazione di 180 gradi. La risoluzione spaziale ottenuta, variava, in funzione delle dimensioni del campione studiato, fra 60 μm e 100 μm. Per gli esperimenti di tomografia i tempi di esposizione dei campioni variava fra 2 e 5 ore. Per misure effettuate con fotoni X abbiamo fatto uso di uno strumento XCT [9] basato su una sorgente a micro focus (Hamamatsu, L8121-03) a 60 kV e 166 μA con dimensione focale di 7 μm. Le immagini erano registrate mediante un pannello piatto (Hamamatsu, C7942SK-05) con pixel size di 50 μm. Valori del rapporto di amplificazione variabile, ottenuti variando le distanze fra sorgente, campione e detector, hanno consentito una risoluzione spaziale fra 10 μm e 50 μm nelle ricostruzioni dei dati tomografici. Il tempo di esposizione variava fra 2 e 4 ore in dipendenza delle dimensioni del campione e della amplificazione programmata. La ricostruzione volumetrica è stata effettuata mediante software Octopus [9] e la visualizzazione ed analisi dei dati mediante il software VGStudioMax [10]. La ricostruzione delle sezioni tomografiche veniva riportata in coefficienti di attenuazione su scala assoluta al fine di consentire un confronto fra esperimenti effettuati su campioni differenti e in tempi diversi.

3. Materiali

Quattro campioni di *Pinus Silvestris*, degradati artificialmente mediante Carie Bruna, sono stati consolidati con trattamenti diversi. I campioni PB e PE sono stati consolidati a 45°C per immersione rispettivamente in una soluzione al 7% in peso di KluCel in acetone e in etanolo. I campioni PD e PF sono stati consolidati per immersione a 22 °C rispettivamente in una soluzione al 30% in peso di Colofonia in acetone e in etanolo. I campioni sono stati impregnati per

8 giorni. Durante questo tempo le soluzioni sono state sostituite tre volte con soluzioni fresche. Alla fine del trattamento i campioni sono stati seccati in stufa per circa 20 giorni a 45°C [8].

4. Risultati sperimentali

Come esposto in precedenza, nell'esame di campioni di interesse archeologico, i raggi X ed i neutroni possono fornire interessante informazione complementare, in particolare con i campioni lignei (per esempio parti di relitti di nave). A titolo di esempio, in Figura 3 (vedere Figura 3 a colori a pag. 231) sono riportate le immagini di tomografia X di una sezione interna di un campione di Pino degradato artificialmente (Figura 3a) e quindi trattato con una soluzione in etanolo di Colofonia al 30% in peso (Figura 3b) o con una soluzione di Klucel in etanolo al 7% in peso (Figura 3c). Nelle Figure 3d, 3e e 3f sono riportate le immagini delle stesse sezioni e degli stessi campioni, ricavate mediante tomografia neutronica. L'effetto della degradazione effettuata da Carie Bruna è chiaramente visibile (porzioni nere delle immagini). Nelle immagini XT 3a e 3b sono chiaramente visibili le zone nelle quali si è accumulata la polvere di legno formata a seguito dell'attacco della Carie Bruna. Le stesse regioni sono appena visibili nel caso delle immagini ricavate con NT. Sia le immagini XT che quelle NT mostrano la struttura del legno con le distinte regioni del legno primaticcio (colore più chiaro) e del legno tardivo (colore più scuro).

I vuoti naturali (canali della struttura legnosa) sono chiaramente visibili nell'immagine XT. È facile notare che le immagini XT, se raffrontate a quelle NT, mostrano una più elevata risoluzione spaziale. D'altro canto le immagini NT sono più sensibili alla presenza del mezzo consolidante (Colofonia e Klucel), per cui le immagini sono meno nette, ma contengono più informazione sulla distribuzione del mezzo consolidante [7, 12]. Questo si nota in maniera particolare negli istogrammi delle immagini 3c e 3f mostrate accanto alle immagini stesse. La struttura complessa degli istogrammi NT è una chiara indicazione della varietà di effetti evidenziati dai neutroni. Nel caso più semplice ci si attenderebbe che gli istogrammi possano essere riprodotti con tre gaussiane: una a bassi valori del coefficiente di attenuazione, corrispondente ai vuoti (in generale micro e macro vuoti), un'altra che descrive le regioni dominate dal legno primaticcio ed una terza che descrive le regioni dominate dal legno tardivo. Eventualmente una gaussiana ulteriore potrebbe rendersi necessaria per descrivere la zona intermedia. Questa è la situazione che si trova nel caso della tomografia X. Se si considera l'istogramma NT, si trova ancora una gaussiana che descrive la distribuzione di vuoti a valori bassi del coefficiente di attenuazione. La rimanente porzione dell'istogramma non può essere riprodotta solo con tre gaussiane, in quanto i neutroni sono particolarmente sensibili all'idrogeno e quindi gli istogrammi sono sensibili alla distribuzione del mezzo consolidante all'interno del campione ligneo. Evidentemente i raggi X possono chiaramente differenziare le regioni dominate dai componenti principali, ma non sono altrettanto sensibili alle variazioni del coefficiente di attenuazione indotte dal mezzo consolidante, formato da elementi leggeri. D'altro canto le immagini NT sono più ricche di dettagli e descrivono le variazioni dei coefficienti di attenuazione indotte dal mezzo consolidante, e nel fare ciò, in un certo senso pagano un prezzo, in termini di perdita di informazione sul contrasto fra le varie regioni. Per dimostrare la correttezza di queste affermazioni abbiamo generato istogrammi da porzioni diverse della stessa immagine. Naturalmente lo scopo era anche quello di attribuire un preciso significato alla posizione delle gaussiane usate nel fit degli istogrammi. Abbiamo iniziato con il calcolare istogrammi corrispondenti solo al legno primaticcio e al legno tardivo in zone diverse del campione, in particolare lontano dalla superficie (vicino al centro del campione) e vicino alla superficie (dove il mezzo consolidante si trova a concentrazioni più elevate). I corrispondenti istogrammi parziali sono mostrati in Figura 4. Negli istogrammi ricavati da misure XT, le due gaussiane che identificano il legno tardivo vicino al centro e vicino alla superficie sono praticamente coincidenti (Figura 4b), mentre i dati corrispondenti al legno primaticcio mostrano una lieve

differenza (Figura 4a). Alquanto diversa è la situazione dei dati NT: in questo caso gli istogrammi lontani dalla superficie e vicino alla superficie sono significativamente diversi (Figura 4c e 4d).

Come ci si potrebbe aspettare, inoltre, sia nel caso del legno primaticcio che in quello del legno tardivo, la posizione dei picchi negli istogrammi ottenuti nella porzione vicina alla superficie corrisponde a valori del coefficiente di attenuazione maggiore.

Risultati analoghi a quelli trovati nel caso del *Pinus Silvestris* sono stati trovati anche per altri legni (Abete, Castagno) [7, 12]. In tutti i casi abbiamo potuto constatare che gli istogrammi XT, per un dato materiale, non dipendono in maniera sostanziale dalla regione presa nel calcolare l'istogramma; comportamenti diversi si nota nel caso NT, in cui, per esempio, istogrammi della porzione di legno primaticcio nelle vicinanze del centro del campione, differiscono sostanzialmente da quelli ottenuti nelle vicinanze della superficie. Naturalmente lo stesso risultato si è trovato per il legno tardivo. Ovviamente la causa di questo comportamento è la sensibilità dei neutroni all'idrogeno e la loro conseguente abilità a distinguere le due zone. Una conseguenza di quanto detto sino ad ora è che l'uso combinato di XT e NT è importante quando lo scopo delle misure è quello di stabilire l'abilità del mezzo consolidante a penetrare nel campione ligneo, un punto chiave per valutare l'efficacia del processo di consolidamento e la scelta del mezzo consolidante. Al fine di evidenziare ulteriormente l'importanza dell'uso sinergico di XT e NT, in Figura 5 si riportano altri risultati ottenuti con i campioni sino ad ora descritti. Abbiamo generato istogrammi per una serie di sezioni distanti l'una dall'altra 0,75 mm, escludendo però la porzione vicina alla superficie (circa 4 mm) e le regioni di accumulo di polvere di legno. Il motivo per avere escluso, in questo confronto, la parte vicina alla superficie, è che questa zona è particolarmente sensibile all'accumulo del mezzo consolidante. Escludendo questa porzione nell'ottenere gli istogrammi, il risultato del fit dovrebbe riflettere essenzialmente le caratteristiche strutturali del legno, anche se cambiamenti indotti dalla migrazione del mezzo consolidante sono da attendersi. Per il fit degli istogrammi si è fatto uso di tre gaussiane (corrispondenti ai contributi dominanti del legno primaticcio e di quello tardivo ed alla regione intermedia). In Figura 6 sono riportati gli istogrammi ottenuti da dati XT per il campione PB (inserto a) e PD (inserto b). Gli inserti c) e d) riportano istogrammi ottenuti, per gli stessi campioni, mediante misure NT.

Come ci si poteva attendere, nonostante qualche differenza, la variazione mostrata dai vari picchi non sembra essere fortemente dipendente dalla sonda (raggi X o neutroni), dal momento che la porzione più ricca di materiale consolidante non è stata usata nel generare gli istogrammi. Inoltre la Figura 5 mostra chiaramente che la porzione di legno più sensibile alla migrazione del mezzo consolidante è quella corrispondente al legno primaticcio, che ha una struttura meno compatta e con pori di maggior dimensione, caratteristiche che la rendono più penetrabile del legno tardivo. Naturalmente differenze maggiori sono da attendersi per campioni degradati in maniera più consistente. Questo è il caso dei campioni PE e PF, i cui istogrammi per le differenti sezioni sono mostrati in Figura 6. Anche in questo caso gli inserti a) (campione PE) e b) (campione PF) mostrano istogrammi ottenuti dai dati XT. I corrispondenti istogrammi ottenuti da dati NT sono mostrati rispettivamente negli inserti c) e d). Gli andamenti degli istogrammi XT e NT non sono così simili come visto in Figura 5, e come ci si aspetterebbe, i neutroni mostrano una più marcata variazione con la distanza dalla superficie.

5. Conclusioni

Il ruolo di sonde differenti (raggi X e neutroni) nell'esame strutturale di oggetti di interesse archeologico è stato messo in evidenza mostrando risultati ottenuti per campioni di legno, un materiale comune in reperti di interesse archeologico. Il ruolo fondamentale dei neutroni nell'esame della distribuzione del mezzo consolidante all'interno del campione e la buona risoluzione spaziale mostrata dai raggi X, anche in campioni fortemente consolidati, la cui immagi-

ne neutronica non è altrettanto netta, suggerisce, quando sia possibile, l'uso combinato delle due tecniche, al fine di trarre vantaggio della loro complementarietà.

Ringraziamenti

Il progetto di ricerca che ha generato questo lavoro, ha ricevuto supporto economico attraverso il Framework Agreement fra HZB, Technische Universität Berlin e Università di Palermo, i Fondi di Ateneo dell'Università di Palermo e dalla Commissione Europea attraverso la 'Research Infrastructures' action of the 'Capacities' Programme. Contract n.: CP-CSA_INFRA-2008-1.1.1 number 226507-NMI3.

Summary

Conservation of Cultural Heritage is extremely important not only from a cultural point of view, but also from a practical one. It is our duty to pass on to future generations the cultural heritage left to us by our ancestors. Wood is one of the most common materials used to generate works of art which are in a state of constant change and/or deterioration. In order to optimize the knowledge of artworks together with their conservation, it is necessary to use the most advanced scientific and technological tools. In the following paper, we will show the results which can be achieved by application of complementary techniques based on the combined use of X-rays and neutrons as structural probes.

Riassunto

La Conservazione di Beni Culturali è di grande importanza non solo dal punto di vista culturale ma anche da un punto di vista pratico. Dobbiamo sentire il compito di trasmettere ai nostri discendenti il retaggio culturale che ci è stato trasmesso dai nostri avi. Il legno, uno dei materiali più comuni usato per opere d'arte, è sottoposto ad un costante processo che ne comporta variazioni e/o deterioramento. Al fine di ottimizzare la conoscenza di reperti storico-artistici e renderne possibile la loro conservazione è imperativo l'uso di tecniche scientifiche e tecnologiche di avanguardia. Nel seguito mostreremo alcuni dei risultati che possono essere ottenuti mediante l'applicazione di tecniche complementari basate sull'uso combinato di raggi X e di neutroni come sonde strutturali.

Résumé

La Conservation de biens culturels est de grande importance non seulement du point de vue culturel mais aussi du point de vue pratique. Nous devons ressentir la tâche de transmettre à nos descendants l'héritage culturel qui nous a été transmis par nos ancêtres. Le bois, un des matériaux les plus communs utilisés pour les œuvres d'art, est soumis à un constant procès qui en comporte variations et/ou détérioration. Afin d'optimiser la connaissance de pièces historico-artistiques et en rendre possible la conservation, il est impératif d'utiliser les techniques scientifiques et technologiques d'avant-garde. Par la suite, nous montrerons certains des résultats qui peuvent être obtenus moyennant l'application de techniques complémentaires basées sur l'utilisation combinée de rayons X et de neutrons comme des sondes structurales.

Zusammenfassung

Die Konservierung von Kulturgütern ist von großer Bedeutung nicht nur in kultureller Hinsicht, sondern auch unter praktischen Gesichtspunkten. Wir müssen uns der Aufgabe stellen, unseren Nachfahren das kulturelle Netz weiterzugeben, das uns von unseren Ahnen überliefert wurde. Das Holz, eines der gebräuchlichsten Materialien für Kunstwerke, ist einem ständigen Prozess unterworfen, der zu Veränderungen und/oder seinem Zerfall führt. Um die Kenntnis von historisch-künstlerischen Fundstücken zu optimieren und ihre Konservierung zu ermöglichen, ist die Anwendung wissenschaftlicher Techniken und Technologien der Avantgarde unerlässlich. Im Folgenden zeigen

wir einige der Ergebnisse, die durch Anwendung komplementärer Techniken erzielt werden können, die auf der kombinierten Verwendung von Röntgenstrahlen und Neutronen als Struktursonden beruhen.

Resumen

La Conservación de los Bienes Culturales es de gran importancia no sólo desde el punto de vista cultural, sino también desde un punto de vista práctico. Tenemos que sentir el deber de transmitir a nuestros descendientes el patrimonio cultural que nos han legado nuestros antepasados. La madera, uno de los materiales más comunes utilizados para obras de arte, está sometido constantemente a un proceso que comporta variaciones y/o deterioro. A fin de optimizar el conocimiento de las piezas histórico-artísticas y hacer posible su conservación, es imperativo utilizar técnicas científicas y tecnológicas de vanguardia. A continuación mostraremos algunos de los resultados que pueden obtenerse mediante la aplicación de técnicas complementarias basadas en el uso combinado de rayos X y neutrones como sondas estructurales.

Резюме

Сохранение Культурного Имущества имеет большое значение не только с культурной, но и с практической точки зрения. Мы должны проникнуться заданием передать нашим потомкам культурное наследие, переданное нашими предками. Древесина, один из самых обыкновенных материалов, использующихся для произведений искусства, подлежит постоянному процессу, который вызывает его изменения и/или повреждение. Для оптимизации познания исторических и художественных экспонатов, и чтобы сделать возможным их сохранение, необходимо использование передовых достижений науки и технологии. В продолжении покажем некоторые из результатов, которые могут быть получены при применении дополнительных технических приемов, основанных на комбинированном использовании рентгеновских лучей и нейтронов, как структурных зондов.

